

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica

**Modernización del sistema de control de la esterilizadora de 6 onzas en Nestlé
Panamá**

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

José E. González Vargas

Cartago, marzo 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

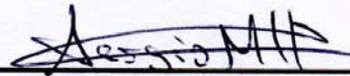
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



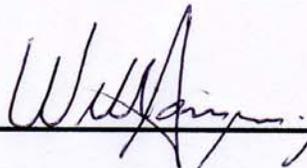
Julio Córdoba Arce

Profesor lector



Sergio Morales Hernández

Profesor lector



William Marín Moreno

Profesor asesor



TEC

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica

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, 31 de marzo del 2005

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, 31 de marzo del 2005



José E. González Vargas

Céd: 1-1108-0686

Resumen

En la industria, la automatización de procesos es muy importante ya que mejora la calidad del producto, así como la velocidad de producción. También, si es necesario, permite el monitoreo constante de la línea y su control.

El proceso actual de esterilización de leche evaporada en Nestlé, Panamá se realiza de forma manual. Además, el panel que se utiliza para monitorear y controlar el proceso está obsoleto, lo que hace que la línea de producción sea muy lenta. Otro problema que se tiene es mantener la temperatura constante, ya que si varía puede afectar el producto.

La idea de modernizar el sistema es con el propósito de mejorar la producción y el sistema de monitoreo. Así, el operador puede observar el comportamiento del sistema o variar las especificaciones de este.

Se desarrolla todo el diseño de la integración del hardware que se encarga del manejo de la línea de producción, así como la programación para el manejo automático de esta. Además, se han diseñado reguladores que permiten el control de la temperatura dentro de las cámaras para mantenerlas constantes. También se realiza la interfaz con el operador, lo cual permite una interacción efectiva con el sistema.

Palabras claves: *Automatización, reguladores, compensadores, PID, transferencia de calor, Interfaz gráfica, monitoreo, control, modernización, modelado de sistemas, esterilización*

Abstract

In the industry, is extremely important the automation of the process to improve the quality of the product, and production times. It also allows a constant monitor of the production line and if necessary its control.

The actual evaporated milk process in Nestle Panamá is controlled manually, besides the panel to monitor and control the process is obsolete, what makes the line slow. Another problem is to maintain constant the temperatures, because it may affect the product if they change.

The system idea is to improve the production and the monitoring system. This way the operator can observe the behavior or vary the specifications of the system.

The design of the integration of the hardware, and the program that will control the line of production will be developed during this work. To control and maintain the temperatures of the chambers a regulator will be designed. Also the operator's interface that allows an effective interaction with the system will be developed.

Keywords: *Automation, automatic regulators, compensators, PID, heat transfers, graphic interface, monitoring, control, modernization, systems models, sterilization.*

Dedicatoria

A mis padres quienes siempre han estado cuando los necesito y me han apoyado en todas las cosas que hago. Gracias a ellos he llegado hasta aquí y, con su inspiración, sé que llegaré mucho más lejos.

Agradecimiento

Quiero agradecerles a todas las personas que han estado en las buenas y en las malas apoyándome para salir adelante, que me han enseñado a vivir mejor mi vida y me han soportado todos estos años.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema existente y descripción de la solución	1
1.2 Solución propuesta.....	4
CAPÍTULO 2. METAS Y OBJETIVOS	9
2.1 Meta	9
2.2 Objetivo general	9
2.3 Objetivos específicos	9
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO	11
3.1 Proceso de Esterilización de la leche	11
3.2 Sensores de temperatura	14
3.2.1 RTD (Detector Resistivo de Temperatura)	15
3.2.2 Termocuplas	18
3.3 Sensor de presión	22
3.3.1 Método de Tubo U	23
3.3.2 Método de Diafragma	25
3.4 Transferencia de calor	27
3.4.1 Transferencia por conducción	27
3.4.2 Transferencia por convección.....	30
3.4.3 Transferencia por radiación	31
CAPITULO 4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	33
4.1 Reconocimiento y definición del problema	33
4.2 Obtención y análisis de información.....	33
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de la solución	35
4.4 Implementación de la solución	36
4.5 Reevaluación y diseño.....	37
CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE UTILIZADO	38
5.1 Análisis de soluciones y descripción final	38
5.2 Descripción del hardware.....	43
5.2.1 Generalidades.....	43
5.2.2 Alimentación del sistema	44
5.2.3 Motores	47
5.2.4 Sensores	50
5.2.5 Control automático	57
5.2.5.1 Método experimental	59
5.2.5.2 Método de capacidad calorífica global	68
5.2.6 Cálculo de los compensadores	72
5.2.6.1 Regulador en función del tiempo.....	73
5.2.6.2 Compensador PID	77
5.2.6.3 Compensador digital de respuesta de orden 1	81
5.2.7 Seguridad.....	85
5.3 Descripción del software	87
5.3.1 Programación PLC	87
5.3.1.1 SYS0,SYS1, PRINCIPAL	94
5.3.1.2 CONFIG IO	94

5.3.1.3	ESPEJO IO.....	95
5.3.1.4	BLK MTRS	95
5.3.1.5	BLK VALV.....	97
5.3.1.6	BLK PIDS.....	98
5.3.1.7	BLK SCP.....	100
5.3.1.8	INT MTRS.....	101
5.3.1.9	INT VALV	102
5.3.1.10	INT PIDS.....	103
5.3.1.11	INT SCP.....	103
5.3.1.12	STATUS PLC	104
5.3.1.13	CTRL SEQ.....	104
5.3.1.14	CTRL FRENO.....	105
5.3.1.15	INT SEQ	105
5.3.1.16	LUCES.....	106
5.3.1.17	PV INTRCXN.....	106
5.3.1.18	Manejo de memoria	107
5.3.2	Programación Gráfica	110
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		118
6.1	Análisis de Hardware	118
6.2	Modelo matemático	123
6.3	Reguladores.....	125
6.4	Análisis de Software	130
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		133
7.1	Conclusiones.....	133
7.2	Recomendaciones.....	134
BIBLIOGRAFÍA.....		135
Apéndice A.1	Glosario	137
Apéndice A.2	Tablas de comparación.....	138
Apéndice A.3	Información sobre la empresa	140
Apéndice A.3.1	Descripción de la empresa	140
Apéndice A.3.2	Descripción del departamento	141
Apéndice A.4	Fotografías del gabinete	142
Apéndice A.5	Hoja de información	145
Anexo A.1	Hojas de especificaciones	146

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Panel de operador existente.....	3
Figura 3. 1 Diagrama de proceso de tratamiento de la leche	13
Figura 3. 2 Relación Temperatura-resistencia de algunos materiales de construcción de RTD.....	16
Figura 3. 3 Típica conexión de una termocupla	18
Figura 3. 4 Estructura física de un Tubo U para medir presión.....	23
Figura 3. 5 Configuración de sensor electrónico de Tubo U.....	24
Figura 3. 6 Principio básico del sensor de diafragma	25
Figura 3. 7 Construcción de un sensor de capacitancia variable	26
Figura 3. 8 Dirección del flujo del calor.....	28
Figura 3. 9 Barra metálica con diferentes fuentes de temperatura.....	29
Figura 5. 1 Fotografía de gabinete de control.....	40
Figura 5. 2 Gabinete de potencia	40
Figura 5. 3 Diagrama de bloques de configuración de la alimentación.....	44
Figura 5. 4 Transmisor de temperatura Rosemount 248	52
Figura 5. 5 Transductor de Presión.....	55
Figura 5. 6 Diagrama de construcción de los tanques.....	57
Figura 5. 7 Diagrama del transporte de la latas dentro del tanque.....	58
Figura 5. 8 Diagrama de bloques a lazo abierto del tanque.....	59
Figura 5. 9 Circuito eléctrico representativo a un sistema térmico.....	60
Figura 5. 10 Respuesta al escalón del sistema	65
Figura 5. 11 Diagrama de bloques del sistema a lazo cerrado.....	66
Figura 5. 12 Respuesta al escalón del sistema a lazo cerrado	66
Figura 5. 13 Diagrama de características de los materiales de construcción del tanque	68
Figura 5. 14 Respuesta al escalón	72

Figura 5. 15 Lugar de las raíces de la planta	73
Figura 5. 16. Respuesta de la planta con el regulador de atraso	74
Figura 5. 17 Lugar de las raíces de la planta con el regulador atraso	74
Figura 5. 18 Método gráfico para calcular el punto por donde deben encontrarse los polos de lazo cerrado.....	75
Figura 5. 19 Lugar de las raíces aplicando el Regulador de adelanto y atraso.....	76
Figura 5. 20 Respuesta al escalón de la ecuación de la planta regulada.....	77
Figura 5. 21 Diagrama de bloques del sistema compensado con un PID.....	78
Figura 5. 22 Respuesta al escalón con $K_I=0.022$ y $K_P=5.39$	80
Figura 5. 23 Respuesta al escalón de la planta en tiempo continuo y tiempo discreto	83
Figura 5. 24 Respuesta al escalón de la planta compensada discreta	84
Figura 5. 25 Diagrama de distribución de la planta.....	86
Figura 5. 26 Diagrama de flujo de la secuencia básica del proceso	89
Figura 5. 27 Secuencia de activación de motores de sistema	91
Figura 5. 28 Estructura de procedimientos del programa.....	93
Figura 5. 29 Pantalla de configuración del módulo de entradas analógicas	94
Figura 5. 30 Diagrama de escalera de bloque de motores	96
Figura 5. 31 Diagrama de escalera del control de una valvula ON-OFF	97
Figura 5. 32 Diagrama de escalera de bloque de PIDs.....	98
Figura 5. 33 Pantalla de configuración del bloque PID	99
Figura 5. 34 Bloque de escalamiento.....	100
Figura 5. 35 Fragmento de programa del INT MTRS del motor 6	101
Figura 5. 36 Interconexiones de valvula de agua	102
Figura 5. 37 Interconexiones para el PID de temperatura a la mitad del precalentador	103
Figura 5. 38 Escalera donde se verifican que las temperaturas sean las correctas	105
Figura 5. 39 Fragmento de interconexiones con el panel de operador	107
Figura 5. 40 Estructura de memoria del programa.....	109

Figura 5. 41 Pantalla de inicio de panel de operador	112
Figura 5. 42 Pantalla de la línea de producción.....	113
Figura 5. 43 Pantalla de variables analógicas	114
Figura 5. 44 Pantalla de gráficos de tendencia de temperatura	114
Figura 5. 45 Pantalla de Alarmas de la Esterilizadora	115
Figura 6. 1 Foto del acabado final del gabinete	118
Figura 6. 2 Diagrama de sector de control del gabinete	119
Figura 6. 3 Diagrama de sector de potencia del gabinete	120
Figura 6. 4 Respuesta al escalón del modelo experimental	123
Figura 6. 5 Respuesta al escalón del modelo teórico.....	123
Figura 6. 6 Respuesta al escalón para diferentes valores de PI.....	127
Figura 6. 7 Pantalla de proceso durante la simulación	131
Figura A.4. 1 Fotografía del PLC Allen-Bradley SLC 500 5/5 instalado en el gabinete	142
Figura A.4. 2 Fotografía de variador de frecuencia PowerFlex 70	142
Figura A.4. 3 Fotografía de reactor de línea trifásico utilizado para el variador	143
Figura A.4. 4 Fotografía de donas de corriente.....	143
Figura A.4. 5 Fotografía de panel de operador PanelView plus 1000.....	144
Figura A.4. 6 Fotografía de panel de operador con pantalla de producción	144

Índice de Tablas

Tabla 3. 1 Algunos materiales comunes utilizados en la construcción de RTD	15
Tabla 3. 2 Coeficiente de Seedbeck para diferentes materiales	20
Tabla 3. 3 Diferentes aleaciones de materiales para la construcción de termocuplas	21
Tabla 5. 1 Lista de cargas de esterilizadora de 6onz con sus respectivos guarda motores	49
Tabla 5. 2 Tabla de temperaturas de las cámaras del proceso.....	90
Tabla 5. 3 División de archivos de datos en la memoria de un SLC500.....	108
Tabla 5. 4 Organización de palabra de control de un motor.....	110
Tabla 5. 5 Fragmento de base de datos de TAGS que se utiliza en el RSView Studio	116
Tabla 6. 1 Valores de error de estado estacionario y tiempo de estabilización	124
Tabla 6. 2 Diferentes Valores de PID	126
Tabla 6. 3 Valores de tiempo de estabilización para un valor constante de $K_p=5.39$	128
Tabla 6. 4 valores de tiempo de estabilización con $K_i/K_p=0.004$	129
Tabla A.2. 1 Comparación de diferentes modelos de PLC.....	138
Tabla A.2. 2 Comparación de diferentes tipos de paneles de operador.....	139

Capítulo 1. Introducción

1.1 Problema existente y descripción de la solución

Para el proceso de esterilización de la leche evaporada es necesario que las latas recorran varias cámaras con una temperatura. En estos momentos se esterilizan 5 marcas de leche evaporada de Nestlé, entre las cuales se encuentran *Ideal*, *La Lechera*, *0%*, etc. En el proceso el tiempo de exposición de la lata a estas temperaturas varía según la marca, pero es aproximadamente de 30 minutos.

El primer paso es tomar la lata de una llenadora y transportarla, por un cable magnético, a la cámara del precalentador. Aquí tiene que permanecer un tiempo definido con una temperatura en la mitad del precalentador de 80°C y, a la salida de este, tiene que presentar una temperatura constante de 100°C. El tiempo de exposición se regula variando la velocidad del motor de la banda del equipo.

Al salir del precalentador, pasa a otro cable que la lleva a un peco¹ que se utiliza como contador mecánico de las latas que han pasado, lo cual permite realizar cálculos de producción. De inmediato se lleva la lata por otro cable a la esterilizadora.

La esterilizadora es una cámara que expone el producto a altas temperaturas por un tiempo definido con el fin de exterminar las bacterias. Tiene que haber una temperatura de 120°C dentro de toda la cámara. Al igual que el precalentador, el tiempo de permanencia dentro de la esterilizadora lo define la marca; pero es de suma importancia que estos tiempos se mantengan constantes durante todo el proceso.

Una vez terminado el proceso de esterilización, la lata pasa por una cámara que se encarga de enfriarla para que no haya problemas para pegar las etiquetas. Esta cámara debe estar a una temperatura de 85°C a la entrada y 34°C a la

¹ Ver definición en glosario

salida. Cuando termina este paso del proceso se realizan pruebas de viscosidad para determinar la fecha de caducidad del producto en ciertas latas.

Luego, las latas entran a un soplador, o sea, una cámara de secado que se encarga de secarlas para que sea más fácil pegar las etiquetas. Desde aquí las latas son transportadas por un elevador al lugar de etiquetado. En la página 86, figura 5.25 se puede observar el diagrama de distribución de planta.

Actualmente el ajuste de las temperaturas se realiza manualmente, así que llegar a las condiciones requeridas toma mucho tiempo. Como las cámaras se calientan con vapor; existen válvulas manuales que el operario tiene que abrir o cerrar para ajustar la temperatura. Además, los sensores son analógicos con un margen de error de 1°C; lo que hace que el proceso sea inexacto con la posibilidad de que el producto no tenga la calidad deseada.

El procedimiento actual que se utiliza en esta línea de producción es ineficiente y poco preciso. Esto hace que el proceso sea lento y muchas veces el producto no tenga las características de calidad requeridas.

Cuando inicia el proceso, los operarios ajustan las temperaturas de las cámaras. Una vez que se tienen las condiciones necesarias, las latas entran al precalentador y se da un choque térmico causando un desajuste en las temperaturas, por lo cual es necesario ajustar las temperaturas una vez más. Esto se tiene que realizar cada vez que se inicia el proceso y puede considerarse un trabajo largo e inexacto donde se pierde tiempo de producción y no garantiza que los primeros productos tengan la calidad requerida. Es por esta razón imprescindible que las temperaturas se ajusten y mantengan automáticamente durante todo el proceso.

Si surge algún problema durante el proceso (que se atasque una lata, o que algún motor no esté funcionando) no hay ningún tipo de alarma que indique el lugar de la falla, por lo que se tiene que detener toda la producción mientras se encuentra y corrige el fallo. La línea de producción tiene micro-interruptores que indican cuando se atascó una lata, pero no indican el lugar. Esto significa que el operario tiene que parar el proceso para buscar el lugar de la falla, corregirla e

iniciar el proceso nuevamente. Como bien se sabe, una falla representa pérdidas de dinero para la empresa.

Todos los paros y arranques de los motores se realizan con botoneras y la velocidad se controla modificando partes mecánicas, proceso muy complicado que resta tiempo a la producción.

El panel de operador es un tablero de botones con sensores analógicos de temperatura y presión de toda la línea de producción. También tiene un graficador de carta. No obstante, carece de indicadores de alarmas que brinden información al operario del estado actual de cada motor o sensores dentro de la línea de producción. Todo esto hace que sea muy complicado para el operador controlar la línea de producción. En la figura 1.1 se puede observar el panel de operador que se desea reemplazar.



Figura 1. 1 Panel de operador existente

1.2 Solución propuesta

Lo que se necesita realizar en este proceso es básicamente automatizar la línea de esterilización. Esto implica determinar, investigar y buscar los equipos que mejor se adapten al sistema, como por ejemplo, los mejores sensores de temperatura para dicha aplicación.

También se requiere controlar las secuencias de arranque y paro de los motores, establecer mecanismos que detecten una falla e indiquen en qué lugar se dio (esto podría implicar que detenga los motores que sean necesarios) y que ajusten y mantengan automáticamente las temperaturas del precalentador y de la esterilizadora con la mayor precisión y eficacia posible.

Se requiere una interfaz gráfica que permita la interacción entre el operario y cada una de las partes de la línea de producción, la cual indique la ubicación de la falla, y cuáles motores están funcionando, etc. Para esto se va a utilizar un PanelView 700 de Rockwell Automation debido a que es el panel de operario que se tiene en Nestlé, aunque se mencionan otros tipos de paneles posibles para la solución.

Para verificar todas estas variables se visitó la planta con el fin de observar todo el proceso, investigar cuál es la mejor ubicación para los transductores y chequear los equipos existentes en la línea (motores, bandas). Esto se hizo para poder decidir el tipo de sensores a utilizar, y conocer si la ubicación que propone Nestlé es la adecuada para una buena solución del proyecto.

Debido a que la puesta en marcha está programada para principios del año 2005, en lo que respecta a este proyecto de graduación se realizará el diseño del sistema, planos, la programación y las pantallas; así como una simulación que demuestre que todo el sistema funciona correctamente.

Para el control de todo el sistema se propone utilizar el PLC Allen-Bradley SLC5/05, ya que cuenta con uno de los procesadores más nuevos en el mercado; que permite configurar controladores modulares con 4096 entradas más 4096 salidas, con una memoria de 16K, 32K o 64K palabras. Este equipo tiene puerto de red Ethernet que permite conectar el procesador a otros dispositivos para el

manejo del programa, control estadístico, control de supervisión, mantenimiento del software, etc.

Se utiliza dicho PLC debido a que es un modelo robusto construido para aplicaciones industriales. Tiene protección contra ruido y sobrecargas. Además existen muchos diferentes tipos de módulos de entradas y salidas (entradas y salidas de 4 a 20mA; salidas digitales con relé, transistores, o SCR).

Otra de las razones por las que se utiliza este modelo de PLC es porque otros trabajos de automatización dentro de la planta Nestlé se han hecho con dicha marca y modelo.

Como se ha dicho, en la línea de producción se esterilizan diferentes marcas de leche evaporada y para cada marca el tiempo de exposición es diferente. También se ha señalado que, actualmente estos tiempos se controlan variando la velocidad de la banda del precalentador y de la esterilizadora mecánicamente. Esto se hace cambiando los engranajes para obtener la velocidad deseada.

Ya que los motores son de inducción, se pueden utilizar variadores de frecuencia conectados al PLC para controlar su velocidad según sea la marca de la leche evaporada. Así, el operario sólo debe escoger el tipo de producto y las bandas se ajustan automáticamente a la velocidad programada.

Los variadores de frecuencia PowerFlex 70 de Allen-Bradley son una opción para el sistema. La ventaja que ofrecen es su compatibilidad de comunicación con el PLC. Una de ellas vía red Ethernet o por señales analógicas de 4 a 20mA. El control de velocidad se va a realizar con las señales analógicas ya que la velocidad de respuesta es más rápida, además de que el ruido no afecta a este tipo de líneas.

El resto de motores no necesitan que la velocidad varíe por lo que se pueden utilizar arrancadores normales de voltaje pleno no reversibles. Los motores son existentes. Para todos los motores se tienen que diseñar o buscar los guardamotors, para protegerlos de sobrecargas y corto circuitos. Estos se diseñarán según las características de cada motor.

Para monitorear y controlar las variables en el sistema se necesitan transductores con buena precisión, que puedan transmitir la información al PLC, las variables por sensor son:

- Temperatura en la mitad de la cámara del precalentador.
- Temperatura a la salida de la cámara del precalentador.
- Temperatura de la cámara de esterilización.
- Temperatura a la entrada del enfriador.
- Temperatura a la salida del enfriador.
- Presión en las tuberías de vapor.
- Presión del aire comprimido.
- Presión del enfriador.

Para sensor las temperaturas se pueden utilizar RTD o termocuplas² conectadas a transmisores que conviertan las señales de resistencia o voltaje a señales de 4 a 20mA. En este caso se investigó cuál de los dos tipos de sensores (RTD o termocuplas) es mejor en la aplicación. Para la presión también se deben buscar los sensores que puedan transmitir de 4 a 20mA. La ventaja de que la información de los sensores se transmita de 4 a 20mA es que no hay pérdidas en la línea y el ruido no afecta, así que los errores de lectura son mínimos (esto depende de la exactitud del transmisor que se utilice) y además se pueden transmitir a grandes distancias.

Los PLC tienen módulos analógicos que tienen la característica de generar o captar las señales de 4 a 20mA y traducirlas dentro del programa. Así es más fácil utilizar los sensores y monitorear las variables del proceso.

La temperatura se controla con vapor así que se necesitan válvulas para controlar la cantidad que pasa por la tubería. Controlar el flujo de calor dentro de las cámaras es lo más importante del proceso y se tiene que hacer automáticamente, por lo que el control electrónico es imprescindible.

² Ver definición en glosario.

Las válvulas que se utilizan son del tipo proporcional, esto es que varíe según una señal eléctrica ya sea discreta o analógica. Hay que tomar en consideración que Nestlé ya tiene válvulas neumáticas en la planta, y que estas tienen un convertidor de 4 a 20mA a 3 a 15psi.

También se diseñó un regulador que controla la temperatura en las cámaras de la mejor manera posible. Para realizar este compensador se tiene primero que realizar un modelo matemático de la planta. Como es una planta térmica se mide el volumen, la capacitancia térmica y la resistencia térmica de la cámara, además observar cuales son las perturbaciones de esta.

Una vez modelada la planta se aplica teoría de control para diseñar el PID³ o compensador digital a fin de que pueda controlar la temperatura de la forma más efectiva. Por supuesto, una vez diseñado se realizan los ajustes para que todas las ganancias funcionen correctamente, cuando se ponga en marcha el proyecto.

Se desean graficar las temperaturas de las cámaras en un dispositivo externo. Como propuesta inicial se toma el graficador de seis canales de la marca Rosemount, porque ya ha sido probado por la empresa ELVATRON.

El SLC5/05, controlará los arrancadores y los variadores de frecuencia así como también la instrumentación (sensores y válvulas). Los mandos, ingreso de parámetros y ajustes los hará el usuario por medio del panel o interfaz de operador.

Para un mejor manejo del sistema se tiene que realizar una interfaz gráfica para el operador, la cual muestre todo el proceso de esterilización y el funcionamiento general por medio de figuras y animaciones. Esto permite que el operador pueda ver cuales motores están funcionando, como están las temperaturas de las cámaras, si se dio una falla y el lugar específico de esta. Desde esta interfaz se tienen que controlar las temperaturas de las cámaras y la velocidad de las bandas.

Esta interfaz se realizó para un panel de operación, donde se van a mostrar las animaciones del proceso. Desde este panel se controlan los arranques y paros de

³ Ver definición en glosario

los motores, las velocidades de los motores, las temperaturas de las cámaras. En fin, se monitorearán todas las variables del sistema.

Se proponen varias pantallas para el control del sistema. La principal consiste en toda la línea de producción donde se puede observar el estado de los motores (apagado, en espera, sobrecarga); todos los micro-interruptores que indican que una lata se atascó y que por medio gráfico indique donde se atascó. Finalmente, se tiene que observar la temperatura en las cámaras y la presión del vapor en las tuberías.

Otra de las pantallas es la de los motores, donde se puedan controlar todas las funciones de estos: modo manual, modo automático, arranque, paro, reiniciar⁴. En cada una de estas pantallas también se va a mostrar el estado del motor.

Por otra parte, la pantalla de las válvulas sirve para controlar todas las funciones de estas: modo manual, modo automático, abrir, cerrar, etc. Al igual que la pantalla del motor también muestra el estado de las válvulas.

La programación se realizó en RSLogix 500, ya que es el software que se utiliza para programar todos los modelos de la serie SLC 500, y MicroLogix de Allen-Bradley. Es muy importante señalar que en la programación se tienen que contemplar las secuencias para su operación, tanto en modo manual como en modo automático, y las secuencias de control para controlar las temperaturas de la esterilizadora y el precalentador.

Establecer las secuencias de control significa diseñar los compensadores que se necesiten para cada caso y programarlas para que controlen los cambios de temperatura automáticamente. Para esto, se modeló la planta por métodos tanto analíticos como experimentales. Por ejemplo, utilizando información dada por el personal de Nestlé de los cambios de temperatura dentro de las cámaras se calcularon las diferentes variables físicas de una planta térmica (capacitancia térmica, resistencia térmica).

⁴ Si se dio una sobre-carga, el motor no arranca hasta que se reinicie, esto es por protección.

Capítulo 2. Metas y objetivos

2.1 Meta

El propósito de realizar este proyecto es agilizar la producción de leche evaporada, de manera que no solo sea más eficiente sino que produzca más y de una mejor calidad, con controles más estrictos y menos esfuerzo por parte de los operarios. Todo esto se traducirá en menos tiempo, más producción y por lo tanto más ganancia para la compañía.

2.2 Objetivo general

Diseñar el sistema de control automático de la máquina esterilizadora de latas de 6 onzas, para la línea de leche evaporada, en Nestlé, Panamá.

2.3 Objetivos específicos

a. Objetivos de hardware

- Diseñar el circuito de potencia que pueda manejar los diferentes equipos utilizados en la aplicación.
- Determinar los dispositivos de instrumentación que mejor se adapten a la aplicación.
- Determinar los equipos que se van a utilizar para poder controlar el sistema.

b. Objetivos de software

- Desarrollar las secuencias de arranque y paro de los motores.
- Desarrollar las secuencias de control de las válvulas.
- Desarrollar las secuencias que manejen el graficador de 6 canales para temperatura.
- Desarrollar el algoritmo del compensador para la planta.
- Desarrollar la interfaz gráfica para el panel de operador

c. Objetivos de Documentación

- Diseñar el compensador indicado para la planta.
- Realizar los planos eléctricos del sistema.

d. Objetivos de Implementación

- Diseñar la distribución de los equipos en el gabinete.
- Realizar una simulación del programa funcionando.

Capítulo 3. Marco Teórico

3.1 Proceso de Esterilización de la leche

“Según el punto de vista biológico, la leche es el producto de la secreción de las glándulas que a tal fin tienen las hembras mamíferas, cuya función natural es la alimentación de los recién nacidos.

Desde el punto de vista fisicoquímico, la leche es una mezcla homogénea de un gran número de sustancias (lactosa, glicéridos, proteínas, sales, vitaminas, enzimas, etc.) que están unas en emulsión (la grasa y sustancias asociadas), algunas en suspensión (las caseínas ligadas a sales minerales) y otras en disolución verdadera (lactosa, vitaminas hidrosolubles, proteínas del suero, sales, etc.).”⁵

La leche vacuna en su estado natural dentro de las glándulas mamarias no tiene bacterias, sin embargo al extraerse y ponerse en contacto con el medio ambiente se contamina y el crecimiento bacteriano se acelera, siendo representado este a través de la siguiente fórmula:

$$N = N_0 x 2^{t/g} \quad (4.1)$$

Donde N representa el número de bacterias por mililitro que hay en determinado tiempo t; N_0 se refiere al número de bacterias por mililitro en el tiempo 0; t es el tiempo de crecimiento en horas; y g es el tiempo de generación en horas. La leche es un alimento altamente perecedero, como se puede inferir de la fórmula anterior, de tal forma que para poder conservarla durante un tiempo prolongado debe someterse a un tratamiento térmico efectivo.

⁵ Referencia número 7 en la bibliografía

El número total de microorganismos presentes en la leche o sus derivados por unidad de volumen o de peso es indicativo de las condiciones sanitarias de producción y conservación, así como de la vida comercial del producto.⁶

Existen varios métodos para poder liberar la leche de estos microorganismos. Uno de ellos es la Pasteurización, que consiste en exponer la leche a una temperatura entre 72 y 78°C en un periodo de al menos 15 segundos o entre 62-65°C durante 30 segundos. Para que la leche se mantenga se tiene que almacenar en un ambiente frío y tiene una duración de 3 a 4 días.

Otro método que hay es el de UHT⁷ o ultra pasteurización, que consiste en someter a la leche a temperaturas de 140 a 150°C en 2 ó 4 segundos. Este método se aplica antes del envasado de la leche, al igual que el de pasteurización.

La esterilización tiene la misma meta que los métodos anteriores: eliminar al máximo las bacterias o esporas que existen en la leche para así conseguir un producto microbiológicamente estable y poder almacenarlo a temperatura ambiente durante un tiempo prolongado. Este procedimiento se aplica una vez que el producto esté envasado y las temperaturas a las que se expone van de 115 a 120°C durante un periodo de 15 a 30 minutos.

Las fases para producir leche esterilizada se muestra en el diagrama de la figura 3.1, donde se puede ver que la esterilización ya es uno de los últimos pasos en el proceso.

⁶ Referencia número 8 en la bibliografía

⁷ Ultra High Temperature

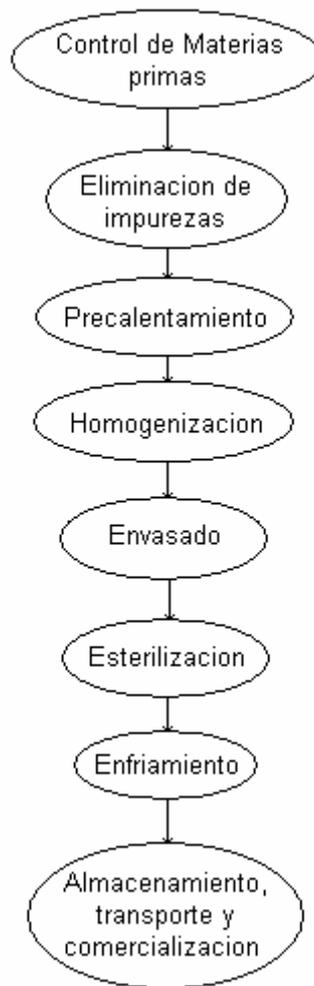


Figura 3. 1 Diagrama de proceso de tratamiento de la leche

La leche evaporada consiste en una deshidratación parcial de la leche entera. Se elimina cerca del 60% del agua que hay en la leche para así mantener su vida útil por un periodo de tiempo más largo. Con esta deshidratación se cohibe el crecimiento microbiano y la actividad enzimática, además disminuye su peso y volumen lo que se traduce en menores costos de transporte y almacenamiento. Si, además de la deshidratación, se le aplica el proceso de esterilización se asegura una conservación mayor, ya que eliminar los microorganismos y sus esporas hace que el producto sea más estable y tenga un periodo de conservación mayor.

El proceso de deshidratación se lleva a cabo por un proceso de concentración por evaporación; pero esto no impide el desarrollo de los microorganismos, así que se tiene que recurrir a la esterilización para obtener la leche evaporada. El problema que existe al esterilizar la leche es que, por la exposición prolongada a altas temperaturas, se pierden muchos de los componentes vitamínicos como lo son B1, B2 y B3 y algunos aminoácidos (componentes básicos de las proteínas).

El resultado del proceso es un producto líquido y homogéneo, con un suave aroma, color amarillento y cuyo volumen es aproximadamente la mitad de la leche antes del proceso. Una vez que se le adiciona agua se obtiene un producto con las mismas características de la leche líquida con el porcentaje graso correspondiente.

3.2 Sensores de temperatura

Para la aplicación que se está realizando se necesita el uso de transductores de temperatura, los cuales sirvan para monitorear la temperatura dentro de las cámaras de esterilización. Estos sensores también se utilizan como la entrada de retroalimentación para el sistema de control automático que permite que se mantenga una temperatura constante.

Se realizó una investigación de los tipos de sensores de temperatura que existen en el mercado con el fin de decidir cuál es el mejor para la aplicación. Se explica el funcionamiento de cada uno de ellos, y se comparan en una tabla para ver cuál es el que mejor se ajusta a la aplicación.

Para sensar la temperatura existen dos tipos de transductores: los RTD y las Termocuplas. El primero varía su resistencia conforme varía la temperatura, y el segundo genera un potencial según la temperatura.

3.2.1 RTD (Detector Resistivo de Temperatura)

Algunos materiales tienen la propiedad física de que su resistencia eléctrica incrementa proporcionalmente con el aumento de la temperatura. Algunos de estos materiales son níquel, cobre, platino, entre otros. En la tabla 3.1 se muestra una lista de materiales que se utilizan para la construcción de RTDs con sus rangos de temperatura.

Tabla 3. 1 Algunos materiales comunes utilizados en la construcción de RTD

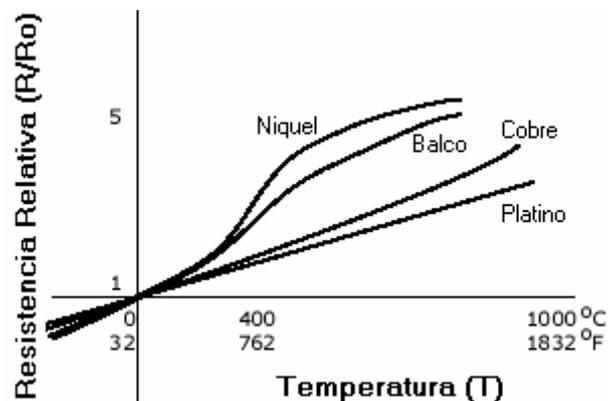
Material	Rango de Temperatura	Notas
Platino (Pt)	-260~1000 °C (-440~1800 °F)	En la mayoría de las aplicaciones la temperatura máxima es 500° C
Cobre (Cu)	-200~260 °C (-330~500 °F)	
Níquel (Ni)	-200~430 °C (-330~800 °F)	Linealidad no es muy buena
Balco (70% Ni-30% Fe)	-100~230 °C (-150~450 °F)	Linealidad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

Fuente: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/rtd/rtd_intro.cfm (17Set. 2004)

Los materiales utilizados en la actualidad para la construcción de RTDs tienen una relación temperatura-resistencia casi lineal, lo que se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$T = T_{REF} + \frac{\left(\frac{R}{R_{REF}}\right) - 1}{\alpha} \quad (3.1)$$

Donde α es el coeficiente de temperatura. Este coeficiente es una propiedad física y eléctrica según el material y el método de construcción del transductor. Esta constante describe el cambio de resistencia promedio por unidad de temperatura desde el punto de congelamiento hasta el punto de ebullición del agua. Algunas organizaciones han adoptado estándares para este coeficiente.



Fuente: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/rtd/rtd_theory.cfm (17Set. 2004)

Figura 3. 2 Relación Temperatura-resistencia de algunos materiales de construcción de RTD.

En la figura 3.2 se observa la relación temperatura-resistencia de diferentes materiales. Se muestra la resistencia relativa (resistencia normalizada con respecto a 0°C) en función de la temperatura.

Las especificaciones que se deben tomar en cuenta a la hora de escoger un RTD son el tipo de material, el coeficiente de temperatura, la resistencia nominal,

el rango de temperatura y la configuración de cableado. Esto se debe de analizar así y ya que según el tipo de material de construcción varían las características de respuesta del sensor, la resistencia nominal, mientras que el coeficiente de temperatura delimita el rango de temperatura y la linealidad del sensor. Por último la configuración de cableado ayuda a que dependiendo de la aplicación la lectura sea más precisa.

El platino es el metal más utilizado para la construcción de estos sensores ya que cubre el mayor rango de temperatura y además su variación es la más lineal. El rango de temperatura que cubre este elemento es de -260 a 1000°C , pero el estándar de ASTM⁸ dicta que este tipo de RTD solo debe medir de -200 a 650°C , y el estándar de IEC⁹ establece que el rango es de -200 a 850°C .

La resistencia nominal es un valor especificado de resistencia a una temperatura dada. Estos valores cambian según el estándar con el que se construya el sensor. Por ejemplo, el IEC especifica el estándar de 100Ω a una temperatura de 0°C . Otros valores nominales de resistencia pueden ser 500 , 1000 o 2000Ω

Un RTD puede traer 2, 3 ó 4 terminales de salida. El dispositivo de 2 cables se utiliza cuando la distancia de la conexión del sensor es corta. Por ejemplo, el transductor se conecta directamente a un transmisor de 4 a 20mA que se encarga de enviar la información en una distancia larga al sistema de procesamiento (en este caso un PLC).

El de 3 ó 4 hilos se utiliza para casos en que el sensor se conecta directamente al equipo de proceso (en este caso PLC) y la distancia entre estos es muy larga. Cuanto más grande sea la distancia, la resistencia de los cables de conexión aumenta, lo que implica un error en la lectura del RTD. El problema que existe es que la resistencia que se agrega tampoco es constante (varía con la temperatura) y el RTD no es fiable.

Los cables extras funcionan como resistencias de compensación. Para el caso de 3 hilos, la resistencia real se mide entre las líneas intermedias menos la

⁸ Asociación Americana para la Prueba de Materiales (American Society for Testing Materials)

⁹ Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission)

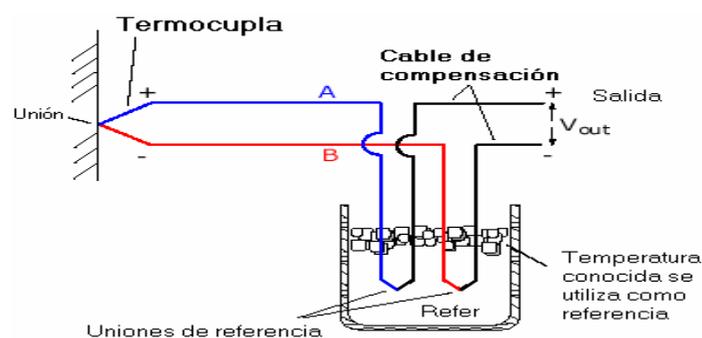
resistencia entre el hilo interno y el hilo externo. Para el caso de los 4 hilos la resistencia real se mide entre las líneas internas menos un promedio de las resistencias de los cables de compensación (R_{o1} , R_{o2}). La fórmula para calcular la resistencia de 4 hilos es:

$$R = R_i - \frac{R_{o1} + R_{o2}}{2} \quad (3.2)$$

3.2.2 Termocuplas

Las termocuplas son los sensores de temperatura más utilizados en la industria por su bajo costo y amplio rango. Estas consisten en dos alambres de distinto material unidos en uno de los extremos (ver figura 3.3). Por el efecto Seebeck¹⁰ se sabe que una corriente fluye en un circuito cerrado si las conexiones se encuentran a diferentes temperaturas; por lo tanto la corriente será proporcional a la diferencia de temperaturas en la unión.

En la práctica, este tipo de transductor tiene dos conexiones: una donde se mide la temperatura y la otra es una unión de referencia. En la figura 3.3 se muestra dicha configuración. Así, cuando hay un cambio de temperatura se genera un potencial entre los diferentes alambres del orden de milivoltios.



Fuente: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/thermocouples/thmcple_theory.cfm (17Set. 2004)

Figura 3. 3 Típica conexión de una termocupla

¹⁰ El físico Thomas Johann Seebeck descubrió el efecto Seebeck en 1821

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

Supóngase que los coeficientes de Seebeck de dos materiales A y B son S_A , S_B y el coeficiente de un alambre de compensación es S_C . Así que matemáticamente el voltaje de salida se obtiene mediante:

$$V_o = \int_{Salida}^{Re\ fer} S_C(T) \frac{dT}{dx} dx + \int_{Re\ fer}^{Union} S_A(T) \frac{dT}{dx} dx + \int_{Union}^{Re\ fer} S_B(T) \frac{dT}{dx} dx + \int_{Re\ fer}^{Salida} S_C(T) \frac{dT}{dx} dx$$

$$V_o = \int_{T_{Re\ fer}}^{T_{Union}} S_A(T) dT + \int_{T_{Union}}^{T_{Re\ fer}} S_C(T) dT$$

$$V_o = \int_{T_{Re\ fer}}^{T_{Union}} (S_A(T) - S_B(T)) dT$$

(3.3)

Donde la T_{Refer} es la temperatura en el punto de referencia y $T_{unión}$ es la temperatura en la punta de prueba. Teóricamente, la tensión inducida por los cables de compensación se cancelan, pero en realidad estos introducen ruido a la medición.

Ahora, si los coeficientes de los materiales son precalibrados y, además, se conoce la temperatura de referencia, la única variable desconocida es la temperatura en la punta de prueba y esta se puede relacionar con el potencial generado en las terminales de la termocupla. Si los coeficientes se mantienen constantes en un rango de temperatura se puede simplificar la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$T_{Unión} = T_{refer} + \frac{V_o}{S_A - S_B} \quad (3.4)$$

En la tabla 3.2 se muestra una lista de materiales y sus respectivos coeficientes de Seebeck a una temperatura de referencia de 0°C.

Tabla 3. 2 Coeficiente de Seebeck para diferentes materiales

Material	Coeficiente Seebeck ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	Material	Coeficiente Seebeck ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)*	Material	Coeficiente Seebeck ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
Aluminio	3.5	Oro	6.5	Rodio	6.0
Antimonio	47	Hierro	19	Selenio	900
Bismuto	-72	Plomo	4.0	Silicón	440
Cadmio	7.5	Mercurio	0.60	Plata	6.5
Carbón	3.0	Nicrom	25	Sodio	-2.0
Constantanio	-35	Níquel	-15	Tantalio	4.5
Cobre	6.5	Platino	0	Telurio	500
Germanio	300	Potasio	-9.0	Tungsteno	7.5

Todos los datos están medidos a una temperatura de 0°C

Fuente: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/thermocouples/thmcp/le_theory.cfm (17 Set. 2004)

En la industria existen varios tipos de termocuplas para diferentes aplicaciones. Estas se dividen en termocuplas E, J, K y T que se construyen con materiales metálicos y pueden utilizarse para temperaturas de hasta 1000°C. Las termocuplas S, R y B son construidas de materiales no metálicos y pueden soportar temperaturas de hasta 2000°C. En la tabla 3.3 se muestra un listado de diferentes materiales, su clasificación, su rango de temperatura, y su sensibilidad.

Tabla 3. 3 Diferentes aleaciones de materiales para la construcción de termocuplas

Tipo	Material (+ & -)	Rango de Temperatura °C (°F)	Sensibilidad 25°C (77°F) μV/°C (μV/°F)	Error*
E	Cromel & Constantan (Ni-Cr & Cu-Ni)	-270~1000 (-450~1800)	60.9 (38.3)	LT:±1.67°C(±3°F) HT:±0.5%
J	Hierro & Constantan (Fe & Cu-Ni)	-210~1200 (-350~2200)	51.7 (28.7)	LT:±2.2~1.1°C(± 4~2°F) HT:±0.375~0.75%
K	Cromel & Alumel (Ni-Cr & Ni-Al)	-270~1350 (-450~2500)	40.6 (22.6)	LT:±2.2~1.1°C(± 4~2°F) HT:±0.375~0.75%
T	Cobre & Constantan (Cu & Cu-Ni)	-270~400 (-450~750)	40.6 (22.6)	LT:±1~2% HT:±1.5% or ±0.42°C(±0.75°F)
R	Platino & 87% Platino/ 13% Rodio (Pt & Pt-Rh)	-50~1750 (-60~3200)	6 (3.3)	LT:±2.8°C(±5°F) HT:±0.5%
S	Platino & 90% Platino/ 10% Rodio (Pt & Pt-Rh)	-50~1750 (-60~3200)	6 (3.3)	LT:±2.8°C(±5°F) HT:±0.5%
B	70% Platino/ 30% Rodio & 94% Platino/ 6% Rodio (Pt-Rh & Pt- Rh)	-50~1750 (-60~3200)	6 (3.3)	LT:±2.8°C(±5°F) HT:±0.5%

Fuente: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/thermocouples/thmcple_intro.cfm (17Set. 2004)

Las termocuplas tienen la ventaja de que son económicas, no tiene partes móviles, es muy difícil que se dañen, el rango de temperatura es muy amplio, tienen una respuesta rápida, y su precisión y repetitividad son razonables.

Las desventajas son que su sensibilidad es baja (usualmente $50\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ o menos) por lo que el ruido puede generar problemas. Necesita aislamientos y filtros para que el ruido no la afecte. Su precisión puede que no sea la óptima en mucho de los casos que se requiera alta confiabilidad. Su respuesta no es lineal por lo que hay que alinear los datos con otro sistema. Son propensas a inducción de ruido por fuerzas electromotrices inductivas de corriente alterna que alteran la lectura de temperatura.

3.3 Sensor de presión

Existen diversas técnicas para sensar la presión. Entre ellas se encuentra la de tubo U, o de diafragma. Todas se basan en las leyes de la relación presión es igual a la fuerza ejercida dividida por el área. Así que en una tubería, si se sabe la fuerza del gas o el líquido y se conoce el área transversal de la tubería que la transporta, se puede obtener la presión a la que se encuentra el fluido.

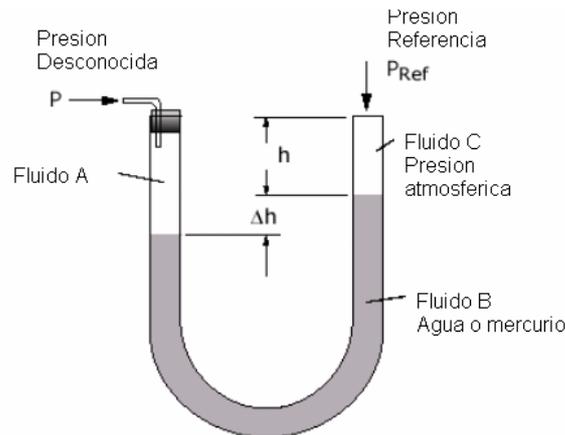
$$p = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

Donde F es la fuerza en libras (lb) o Newtons (N), A es el área medida en pulgadas (in) o metros (m) y p es la presión con unidades de lb/in^2 (psi) o N/m^2 .

En la industria la presión se genera por la operación de bombas, o compresores y es el método más utilizado para el transporte de fluidos. La presión también indirectamente indica el flujo y se puede medir el nivel del líquido.

3.3.1 Método de Tubo U

El método del tubo U es muy poco utilizado debido a su lenta respuesta, su poca precisión, se necesita un líquido dentro del tubo (usualmente mercurio o agua) y no puede interactuar con el fluido al que se le está midiendo la presión (gas o líquido). En la figura 3.4 se muestra como esta constituido.



Fuente: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/u_tubes/u_tubes_intro.cfm (17Set. 2004)

Figura 3. 4 Estructura física de un Tubo U para medir presión.

En uno de los extremos se tiene una presión desconocida (extremo izquierdo en la figura 3.4) y en el otro extremo se tiene una presión conocida, la cual usualmente es la presión atmosférica. Comparando los niveles del líquido en cada uno de los tubos se obtiene:

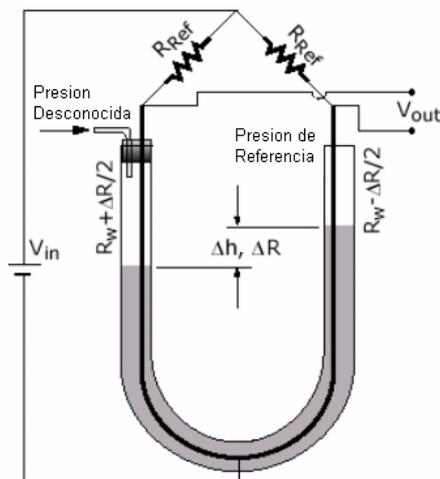
$$p + \rho_A g(h + \Delta h) = \rho_B g\Delta h + \rho_C gh + p_{REF}$$

$$p = p_{REF} + (\rho_B - \rho_A)g\Delta h + (\rho_C - \rho_A)gh \quad (3.6)$$

Donde p es la presión del fluido, ρ son las densidades de los líquidos A, B y C. Dicha ecuación nos brinda el valor de la presión desconocida, ya sea de un líquido o de un gas. Para medir esta variación de presión en un tubo U se utiliza

un puente de Wheatstone, así el movimiento del líquido dentro del tubo genera una variación de tensión que es proporcional a la variación de la presión.

Se colocan dos resistencias externas (como se muestra en la figura 3.4) y un cable de alta resistencia dentro del tubo. La corriente va a fluir proporcionalmente a la resistencia dentro del tubo. Esto es que las partes del cable de alta resistencia que están fuera del líquido (para este caso tiene que ser mercurio de alta conductividad) van a generar 2 resistencias diferentes ya que la corriente va a fluir por el mercurio en la parte que se encuentra sumergida. Así que se completa el puente, donde se tienen dos resistencias que varían su valor dependiendo de la altura del líquido en el tubo. En la figura 3.5 se muestra el modelo eléctrico de dicha configuración.



Fuente: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/u_tubes/u_tubes_intro.cfm (17Set. 2004)

Figura 3. 5 Configuración de sensor electrónico de Tubo U.

El cambio de presión va a ser proporcional al cambio en las 2 resistencias dentro del tubo:

$$\Delta p = c\Delta R = k \frac{\Delta R}{R_w} \quad (3.7)$$

Entonces, del puente de Wheatstone se puede calcular el voltaje de salida como:

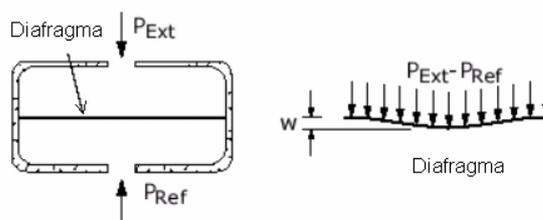
$$V_{OUT} = \frac{r}{(1+r)^2} \frac{\Delta R}{R_w} V_{in} \quad (3.8)$$

Así que se tiene que el cambio de presión es igual a:

$$\Delta p = k \frac{\Delta R}{R_w} = k \frac{(1+r)^2}{r} \frac{V_{out}}{V_m} \quad (3.9)$$

3.3.2 Método de Diafragma

El método más utilizado para medir presión es el método de diafragma, ya que tiene mejor precisión, es más fácil de construir y de mantener. Este tipo de sensores utilizan la deformación de un elástico (por ejemplo una membrana) para medir la diferencia entre una presión desconocida y una presión de referencia. En la figura 3.6 se puede observar como está constituida la membrana.



Fuente: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/diaphragm/diaphragm_intro.cfm (17Set. 2004)

Figura 3. 6 Principio básico del sensor de diafragma

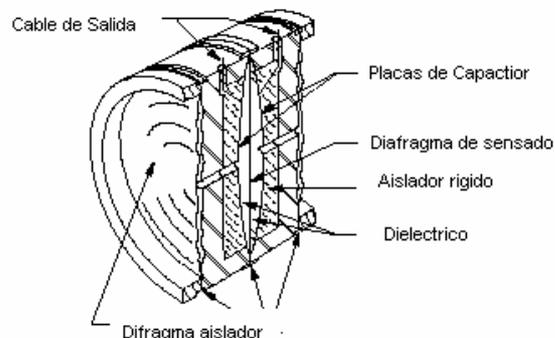
La diferencia de presión es proporcional a la deformación de la membrana (la letra w en la figura 3.6). Existen muchas formas para medir esta deformación, una de las cuales es por medio de una capacitancia variable.

Este sensor de capacitancia variable consiste en dos placas que están a una distancia definida, con un respectivo dieléctrico entre ellas (en la mayoría de

casos es aceite). Una de las placas es el diafragma o membrana que se deforma con los cambios de presión. El área de las placas y las propiedades del dieléctrico tienen que ser constantes, así cuando la membrana se deforma lo que varía es la distancia que existe entre las placas generando una capacitancia diferente. Esto se puede ver matemáticamente por la fórmula de la capacitancia

$$C = \frac{d}{A} \epsilon \quad (3.10)$$

El problema que existe es que el diafragma tiene que estar rodeado del dieléctrico, por lo que no se puede exponer directamente a los cambios de la presión. Lo que se utiliza es un marco aislador en una cámara sellada, con placas a los extremos, como se observa en la figura 3.7. Estas placas o diafragmas aisladores son las que están en contacto directo con la presión, que la transmiten al dieléctrico, que a su vez la transmite a la membrana, que se deforma por la diferencia de presión en las placas aisladoras.



Fuente: Rosemount. "Rosemount sales training, module 1: Pressure measurement".

Figura 3. 7 Construcción de un sensor de capacitancia variable

Para medir esta diferencia se utiliza una presión de referencia en la parte baja del diafragma de sensado, mientras que del otro lado se tiene la presión variable. La presión desconocida es proporcional a la deformación de la membrana. Las placas fijas detectan la variación de la membrana y la diferencia de capacitancia que se tiene en la salida después se convierte en corriente o voltaje.

Este tipo de sensores tienen muchas ventajas como, por ejemplo, que son fáciles de calibrar, duraderos, precisos, resistente a vibración. Una desventaja que tiene es que es muy sensible a los cambios de temperatura.

3.4 Transferencia de calor

Siempre que existan dos cuerpos a diferentes temperaturas se va a transferir energía. El proceso en el cual esta energía se transporta se conoce como transferencia de calor.¹¹ La rama de la ciencia que estudia estos efectos se llama Termodinámica; pero hay una ciencia más especializada que no solo estudia sistemas en equilibrio térmico sino que se encarga de predecir qué tan rápido se va a dar esta transferencia. Esta ciencia se denomina transferencia de calor.

Por ejemplo, al estudiar el enfriamiento de una barra de acero caliente que se coloca en un recipiente con agua, con la Termodinámica se puede predecir la temperatura de equilibrio final, pero no la rapidez con la que alcanza el equilibrio o la temperatura de la barra dos segundos después de que se sumergió en el agua. Existen diferentes tipos de transferencia de calor, por conducción, convección o radiación.

3.4.1 Transferencia por conducción

La conducción es un proceso en el cual el calor fluye de una región más caliente a una región más fría, dentro de un medio (sólido, líquido o gas) o entre diferentes medios en contacto físico directo¹².

Si se calienta una barra de metal en uno de sus extremos, las moléculas en esta región aumentan su vibración conforme se calienta la barra. Debido a esta vibración se transmite energía a las moléculas adyacentes haciendo que aumente su vibración, y así sucesivamente, de manera que se calienta la barra de metal. Esta transferencia de calor se da por comunicación molecular directa, pero las moléculas permanecen en su posición original.

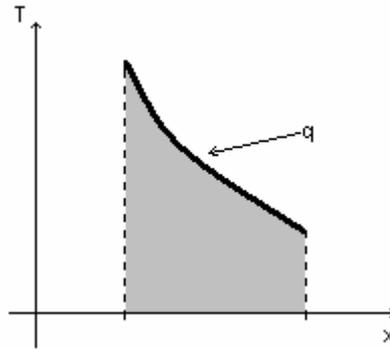
La rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura, así que la ecuación se describe como:

¹¹ Referencia número 11 en la bibliografía. Pág. 3

¹² Referencia número 11 en la bibliografía. Pág. 6

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.11)$$

Donde q es la rapidez de transferencia de calor, y $\frac{\partial T}{\partial x}$ es el gradiente de temperatura y k es la constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica del material. El signo negativo se inserta para cumplir la segunda ley de la termodinámica, como se muestra en la figura 3.8.



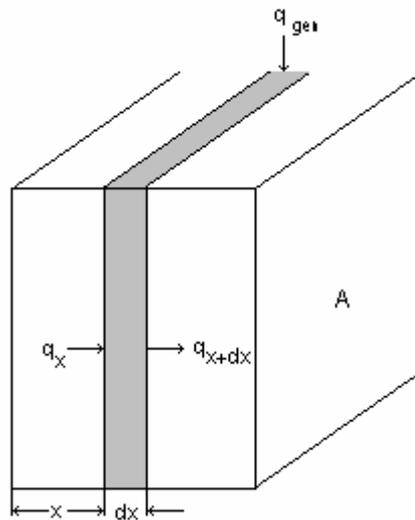
Fuente: **Referencia número 11 en la bibliografía.**

Figura 3. 8 Dirección del flujo del calor.

Las unidades del flujo de calor son watts, y la constante de conductividad está expresada en watts por metro por grados Celsius.

Si la temperatura en un cuerpo está cambiando con el tiempo debido a diversas fuentes de temperaturas se tiene que realizar un balance de temperaturas en el sólido. En el caso que sea un cálculo unidimensional, supóngase una barra como la que se muestra en la figura 3.9 de espesor dx , así que:

Energía conducida en la cara izquierda + calor generado dentro del elemento = cambio en la energía interna + energía conducida fuera de la cara derecha.



Fuente: **Referencia número 11 en la bibliografía.**

Figura 3. 9 Barra metálica con diferentes fuentes de temperatura

Para el caso de que sea multidimensional solo se tienen que considerar los casos de calor conducido unidimensionalmente en las tres direcciones de coordenadas, Así que el balance es:

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{d\tau} \quad (3.12)$$

Donde $q_{gen} = q dx dy dz$ y $\frac{dE}{d\tau} = \rho c dx dy dz \frac{\partial T}{\partial \tau}$; ρ es la densidad del material y c es la capacidad calorífica del material

3.4.2 Transferencia por convección

La transferencia de calor por convección es un proceso de movilización de energía debido a la conducción de calor, el almacenamiento de energía y el movimiento de la sustancia caliente. Como ejemplo de transferencia por convección se tiene una placa metálica caliente que se introduce en agua. El primer efecto que se da es que se transfiere un poco del calor por medio de conducción hacia las partículas adyacentes del fluido (en este caso el agua). Después, esta energía transferida va a ayudar a calentar y a aumentar la energía interna de las partículas. Estas partículas se van a mover y mezclar, transfiriéndole un poco de energía a otras partículas. Esta energía que se transfiere es almacenada y es movilizada por el flujo del líquido transmitiendo un poco de energía a otras partículas.

Este tipo de transferencia no solo se da debido a la diferencia de temperatura sino que depende en gran medida del movimiento de masas, por lo que se pueden señalar dos clases de transferencia por convección: convección forzada o convección natural.

La convección natural se da cuando no hay fuentes de movimiento externo, sino que el calor se disipa debido a los gradientes de densidad. Por ejemplo, una placa caliente expuesta en un cuarto cerrado donde el aire está en reposo. La convección forzada se da cuando la transferencia es inducida por una fuente externa, por ejemplo una bomba o un ventilador.

Si se tiene un tubo metálico a una temperatura T_x dentro de un fluido a temperatura T_a , con una velocidad de v_a , se está dando una transferencia de calor por convección.

Debido a la viscosidad que se presenta en la superficie del tubo, la velocidad del flujo del líquido se ve reducida a cero, lo que causa que no haya movimiento de partículas, así que se da una transferencia de calor por medio de conducción; se puede utilizar la ecuación 3.11 para describir el flujo de calor. Pero se tiene que considerar la velocidad del flujo, ya que esta variable afecta el gradiente de temperatura, por lo que se debe tener una ecuación que relacione la transferencia entre la superficie y el fluido.

Para esto se puede utilizar una relación que expresa la rapidez de transferencia debido a la diferencia de temperaturas y el área total de la superficie, realizada por Isaac Newton:

$$q = hA(T_x - T_a) \quad (3.13)$$

Donde q es la tasa de transferencia por convección; A el área de la superficie; T_x la temperatura de la superficie; T_a la temperatura del fluido; y h es el coeficiente de convección del material.

El valor del coeficiente de convección no solo depende del tipo de material sino de la geometría del material, de la velocidad del flujo externo, de la diferencia de temperaturas, etc. Este coeficiente puede variar dentro de una superficie del mismo material, o de un punto a otro; por lo que usualmente en ingeniería se utiliza el valor promedio de un material.

3.4.3 Transferencia por radiación

El calor también se puede transmitir en un medio vacío por medio de la radiación electromagnética. Uno de los conceptos que se utiliza para describir este tipo de transferencia es un radiador ideal o un cuerpo negro. Se le llama cuerpo negro porque es un material ideal que absorbe toda la radiación que le llega, pero no transmite ninguna, o también como un radiador, el cual emite a una temperatura específica la radiación termal máxima posible en todas las longitudes de onda posibles.

Cuando existe otro cuerpo cerca del cuerpo negro se da un intercambio de energía entre ellos, por lo que la tasa de emisión se da por la ecuación 3.14

$$q = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.14)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann; $5.669 \times 10^{-8} \text{W/m}^2$

Los cuerpos que se encuentran en la realidad no pueden alcanzar las especificaciones de un cuerpo negro por lo que se les llama cuerpos grises. Se tiene que calcular un coeficiente de emisión (ϵ), que relaciona la emisión de un cuerpo gris con la emisión de un radiador perfecto a la misma temperatura.

También la radiación viaja en línea recta y alguna se perderá en los alrededores, así que se utiliza una ecuación más exacta:

$$q = F_{\varepsilon} F_G A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.15)$$

Donde F_{ε} es la función de emisividad y F_G es la función geométrica de línea vista. Los sistemas de radiación de calor puede ser muy complejos y calcularlos mucho más complejo que la ecuación 3.15

Capítulo 4. Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

La empresa Nestlé Panamá percibió que algunas de sus líneas de producción estaban teniendo problemas técnicos a la hora de trabajar. Estos problemas se atribuyeron a que se labora con máquinas sumamente antiguas y difíciles de manejar, lo que causa problemas en los tiempos y calidad del producto final.

Se decidió que lo más conveniente para la empresa era modernizar el proceso. Se pensó en la automatización de las máquinas que controlaran la línea con estándares ya establecidos, con la opción de cambiarlos. Además, se pensó en que fuera más fácil para el operador manejar y monitorear la máquina.

Fue por estas razones por las que se recurrió a ELVATRON S.A. para que realizaran la modernización de dichas máquinas, ya que esta empresa integradora ya había realizado trabajos de automatización y mantenimiento dentro de la planta con resultados muy satisfactorios. Con este fin se dio la información del funcionamiento de la máquina y de los alcances y restricciones que se querían en el proyecto.

4.2 Obtención y análisis de información

Una vez que se contactó a ELVATRON S.A. se indicó cuál era el problema que existía y lo que se quería realizar así que se entregó la información del proyecto. Entre los documentos que se entregaron están las potencias de los motores, los motores a los que se quería regular la velocidad, las temperaturas a las que se exponen los productos, la marca de PLC, el variador de frecuencia y el panel de operador que se quería (esto por los resultados que tuvieron con otros proyectos de automatización dentro de la empresa), la acometida con la que trabajaba la línea, los diferentes micro interruptores que había dentro de las cámaras y los pasos del proceso.

Con esta información se comenzó a trabajar en el diseño del hardware. Se investigaron proyectos similares realizados dentro de Nestlé y proyectos

realizados por ELVATRON. También se utilizó Internet para buscar información acerca de los equipos que se podían utilizar en el diseño del hardware. Entre estos equipos se encuentran los sensores y transmisores, switches de Ethernet, los contactores para los motores, el transformador, indicadores luminosos, un graficador, y los módulos de entradas y salidas para el PLC.

También, por parte de ELVATRON se dio un curso de inducción para el uso de las herramientas de programación (RSView 32, RSView Studio) y otra capacitación para el diseño de proyectos de automatización, como por ejemplo uso de protecciones, tierras, tipos de cables, tipos de sensores (presión, peso, temperatura) y de los tipos de equipos que se utilizan en la Industria.

Con toda esta información se comenzó el diseño del hardware del sistema, consultando a Nestlé Panamá acerca de los costos de los equipos y sus características. Estas consultas se realizaron por correo electrónico y teléfono.

Los criterios que se utilizaron para escoger los diferentes equipos se basaron más que todo en sus costos y el desempeño de estos en otros proyectos de automatización. Esta información se utilizó para encontrar un producto confiable al mejor precio.

Una vez que se terminó el diseño preliminar del sistema se hizo una visita a la empresa para observar el proceso y como lo trabajan actualmente para así definir modificaciones del diseño de hardware, definir bien las alarmas, pantallas de operador, entre otras cosas del software. En esta ocasión se habló de reducciones de costos del proyecto, así que se tuvieron que realizar cambios en cuanto a como se quería manejar la línea y de equipos que podrían ser menos costosos para agregarles características al proyecto (por ejemplo monitoreo de potencia consumida en la línea).

En esta visita se observaron también comportamientos de los operadores con máquinas ya automatizadas, como por ejemplo, cómo manejan los paneles de operador, cómo se sienten con este tipo de modernizaciones, etc.

Para realizar las pantallas de operador se consultaron proyectos anteriores para obtener datos de qué tipo de colores, gráficos y alarmas eran los mejores para este tipo de aplicaciones y que los operadores se acostumbraran fácilmente

al el sistema automatizado. Este tipo de información también es de suma importancia para que no se fatigue la vista del operario y así pueda identificar fácilmente lo que está sucediendo dentro de la máquina.

Para el modelado de la planta se entrevistó a los operadores y al ingeniero encargado de la planta para saber el tipo de materiales que se utilizan en las cámaras, los tiempos que duraban en llegar a una temperatura definida, y lo que tardaba en enfriar cuando apagaban las máquinas. Debió procederse así porque no era posible realizar pruebas que implicaran detener la línea de producción ya que esto se traduce en pérdidas de dinero para la empresa.

También se realizaron investigaciones acerca de termodinámica para entender cómo se comporta la transferencia de calor y así ver los diferentes métodos para modelar matemáticamente sistemas térmicos.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de la solución

Una vez que se definieron los alcances y restricciones del proyecto se procedió a investigar tipos de equipos para plantear diferentes soluciones del proyecto. En cuanto al hardware se plantearon diseños que contemplaban diferentes equipos, por ejemplo tipo de sensores de temperatura, paneles de operador, contactores, variadores de frecuencia, etc. Por ejemplo, se querían utilizar dos variadores para el control de velocidad del tiempo de exposición de precalentamiento y de esterilización, pero por razones de costo se consultaron los tiempos de exposición de todas las marcas que se esterilizan en esta línea para saber qué tan crítico era controlar las velocidades y se encontró que solo se tenía que regular una de las fase del proceso (precalentado o esterilizado). Como el motor del precalentador es de menor potencia (3hp), el equipo que lo maneja es de menor costo, entonces se decidió solo variar esta fase del proceso. Con esto se disminuyeron los costos del proyecto significativamente así que se pudieron agregar otras características al sistema (como un medidor de potencia o mejorar el panel de operador).

Conforme se iba realizando el diseño se consultaba con el asesor de la empresa para verificar si el tipo de equipo ya se había utilizado en otro proyecto y cual había sido la experiencia. Después se consultó con la empresa el diseño por medio de los planos para ver que modificaciones se realizaban.

Con respecto al modelado se realizaron dos tipos de modelos matemáticos, uno experimental y el otro teórico, para comparar mediante simulaciones cual era el que más se acercaba a la realidad y así calcular el compensador para este modelo. Esto se describe en la sección 5.2.5.

4.4 Implementación de la solución

Una vez terminado el diseño de hardware, se procedió a armar el circuito eléctrico según los planos aceptados por el cliente. Se probaron todas las conexiones, todos los fusibles uno por uno, y se constató que todos los equipos estuvieran funcionando correctamente.

Los equipos se probaron por separado y en conjunto. Se probaron los transmisores de 4 a 20mA¹³, y que el PLC pudiera captar sus valores. También se probaron todos los módulos de entradas y salidas digitales del PLC para que realizaran las funciones respectivas; con estas pruebas se probaron los diferentes relés y contactores. Se conectaron motores de prueba a los contactores para ver si estos funcionaban correctamente y generaban las señales de confirmación.

Los módulos de salidas analógicas se verificaron para asegurarse de que generaran las señales de 4 a 20mA, para poder manejar los diferentes equipos. (Válvulas, variador de frecuencia.). Se probó la comunicación Ethernet entre el PLC y el panel de operador. El variador de frecuencia se probó conectando un motor y ajustando la velocidad de este desde el PLC por medio de señales de 4 a 20mA. Se probó el panel de operador que funcionara correctamente con el PLC, que los gráficos se ajustaran correctamente y que no hubiera problemas de resolución.

¹³ Los transmisores que se utilizaron fueron equipos de prueba de ELVATRON, ya que los transmisores que se van a utilizar ya se enviaron directamente a Panamá por cuestiones de costo.

Con respecto al graficador no se pudo conseguir un equipo para poder realizar las pruebas debido que el equipo lo compró Nestlé Panamá directamente del distribuidor y no se pudo enviar para realizar pruebas; pero se consultó el manual y este utiliza señales de 4 a 20mA para captar, en este caso la temperatura, e imprimirla. Así que se verificó que estas señales se dieran correctamente.

En cuanto al modelado y el controlador, se realizaron pruebas en Matlab para comparar cuál de los modelos se acerca más a la realidad y así observar cuál controlador funcionaba mejor en la aplicación.

Para probar el software se realizó una simulación de las variables del sistema a fin de ver el comportamiento con la interfaz gráfica y las señales del PLC. Con esto se comprueba que desde el panel de operador se pueden variar los parámetros con los que funciona el sistema (temperaturas, velocidades, señales digitales y analógicas).

4.5 Reevaluación y diseño

El sistema se diseñó para que tuviera opción de agregarle otras funciones. Por ejemplo, se dejaron las señales listas para dos motores más, se dejó campo en el Rack del PLC para que se agreguen otros módulos de señales digitales o analógicas, se pusieron más bornes¹⁴ para realizar conexiones futuras dentro del mismo gabinete.

¹⁴ Ver definición en glosario

Capítulo 5. Descripción del hardware utilizado

5.1 Análisis de soluciones y descripción final

Se propusieron varios equipos al cliente para la solución del sistema y conforme se iba desarrollando el sistema se le agregaron y quitaron características a la forma en que se manejaba la línea.

Primero se planteó un sistema con un PLC Allen Bradley 5/05, por su confiabilidad y características de comunicación que hacen más fácil el trabajo y de esta manera monitorearlo. También, como primera opción, se optó por un panel de operador PanelView Plus 700 “touch screen”, ya que es un elemento de bajo costo y ha tenido buenos resultados funcionando en diferentes empresas.

Se consideraron otros procesadores para el desarrollo de este proyecto, y se pudo observar que las diferentes marcas poseen características similares. Las mayores diferencias radican en la cantidad de entradas y salidas, de memoria o en el software de programación. Por ejemplo, el PLC marca CS1-H tiene 5120 I/O, mientras que el SLC 500 5/05 tiene 4096 y para el proyecto no se necesita una gran cantidad de entradas y salidas.

Los protocolos de comunicación que se van a utilizar en el proyecto son Ethernet TCP/IP y RS-485. Los diferentes PLCs manejan la comunicación Ethernet, pero la ventaja que ofrece el SLC 500 es que ya está incluido en el procesador y no hay que agregar un módulo extra. Además, el tamaño de la memoria de programa no necesita ser muy grande, por lo que un procesador de 16K de memoria es suficiente para el desarrollo del proyecto. En el apéndice A.2 se puede observar una tabla de comparación de diferentes marcas de PLC y sus características más importantes.

El cliente quería variar las velocidades de las líneas de precalentado y de esterilización, por lo que se propusieron los variadores PowerFlex 700 y PowerFlex 70. Estos equipos también ofrecen una variedad de características de comunicación, además de su panel visual en el mismo equipo, que permite monitorear su funcionamiento.

El graficador que se propuso fue el Eurotherm de 100mm y 6 canales, ya que se puede comunicar utilizando señales de 4 a 20mA, además de que no solo grafica en papel, sino que tiene una pantalla donde se pueden observar las diferentes temperaturas y como varían estas.

En cuanto a los contactores, se calcularon las protecciones requeridas por cada tipo de motor según su potencia y se compraron según las especificaciones. Se consiguieron unos contactores que tienen protecciones variables, donde según la potencia del motor se tiene que ajustar el dispositivo mediante un interruptor. Se trata de una mejor solución debido a que le deja la libertad al cliente de cambiar el motor en el momento que quiera sin tener que cambiar los equipos.

También se propuso que todos los equipos se conectaran entre ellos por medio de la red Ethernet (PanelView, PLC), ya que brinda mayor facilidad y confiabilidad en la transmisión de datos entre ellos. Y las fuentes de 24VDC se calcularon para que manejaran los diferentes componentes del circuito; como por ejemplo el PanelView.

Las fuentes que se utilizaron son de marca Weidmueller ya que tienen una excelente estabilidad, no generan mucho calor y su costo es considerablemente bajo. (Véase anexos para más información)

Todas las conexiones de los equipos se realizaron en 2 gabinetes: uno donde solo se encuentran los equipos de potencia y el otro donde solo se encuentran los equipos de control. Se realizó esta división para evitar que se introdujera ruido en las líneas de control debido a las líneas de alta tensión que manejan los motores. Todas las conexiones están hechas con regletas separadas, y los cables van por ductos para garantizar mayor seguridad y orden.

En la figura 5.1 se puede observar el gabinete de control y en la figura 5.2 se puede observar el gabinete de potencia

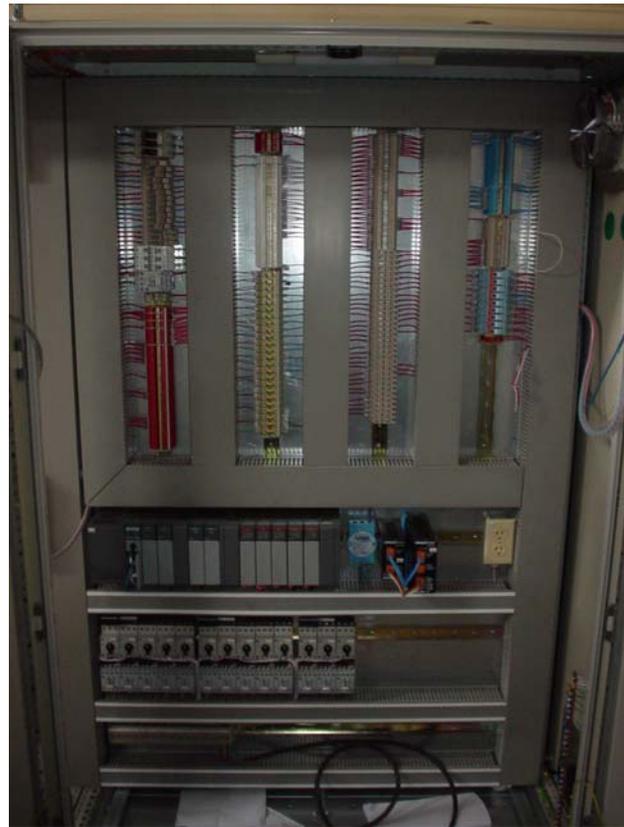


Figura 5. 1 Fotografía de gabinete de control



Figura 5. 2 Gabinete de potencia

Una vez que se tuvo el primer diseño se envió al cliente una descripción, con sus respectivos costos y limitaciones. El cliente quería después agregarle un equipo que monitoreara la potencia, pero también deseaba reducir costos. Este informó que los tiempos de exposición del producto en la esterilizadora y el precalentador eran muy parecidos, que la diferencia de exposición se podía compensar variando solo una de las líneas. Como el motor del precalentador es de menor potencia que el de la esterilizadora se quitó el variador de esta última. También se pidió que el variador no tuviera la conexión de Ethernet, porque esto reducía su costo y, además, ha dado mejores resultados comunicándolo por señales de 4 a 20mA para que el ruido no afecte las señales de comunicación. Estos cambios redujeron los costos en gran medida, y se pudo introducir el monitor de potencia.

Para escoger este monitor de potencia se recurrió a la experiencia de los ingenieros de ELVATRON que ya han trabajado con este tipo de aplicaciones, y se propuso el PowerMonitor 3000, que es un dispositivo que mide la potencia consumida por el sistema y tiene la capacidad de transmitir esta información al PLC o a un computador. Para reducir costos se omitió la pantalla que se puede agregar a este dispositivo para verlo directamente, y se conectó por RS-485.

El procesador tiene un puerto que trabaja con el protocolo DF1 o en RS-232, por lo que se tiene que utilizar un dispositivo que transforme la señal RS-485 a una señal RS-232 para poder comunicarla con el PLC, así que se utilizó el convertidor AIC plus de Rockwell Automation. El PowerMonitor 3000 se puede conseguir con conexión Ethernet, pero su costo aumenta considerablemente.

Para poder medir la potencia se requieren donas de corriente, estas son Toroides que se instalan alrededor de las líneas de 480V y miden por inducción la corriente que fluye por estas. Para poder conseguir estos toroides se tiene que calcular la cantidad de corriente máxima que fluye por las líneas y después revisar con el manual del PowerMonitor la relación de corriente a la que tiene que convertirla. En este caso se está utilizando una dona de 200A a 5A, que es lo que se necesita para su funcionamiento.

Otra de las modificaciones que se realizó fue el cambio del panel de operador. El panel que se había propuesto tiene una pantalla muy pequeña, además que los gráficos no son de muy buena calidad, así que se prefirió uno con un tamaño más grande. El PanelView Plus 1000, el cual tiene un tamaño de 211x158mm, que es casi el doble de tamaño en la pantalla que el PanelView Plus 700 (132x99mm). Como son de la misma familia, tiene las mismas características de comunicación, aunque el software que maneja el 1000 es más nuevo y más fácil de utilizar¹⁵.

En la visita a la empresa se estuvo observando a los operadores y como manejaban los equipos. Se notó que ellos ponen el dedo en la pantalla para seguir diferentes señales, o revisar datos en las pantallas, por lo que una pantalla de “touch screen” no serviría porque al presionar la pantalla se puede salir del menú o el proceso que se esta realizando. Así que se decidió utilizar un panel de operador que no fuera “touch screen”, y así también se redujeron los costos del proyecto.

Estos paneles de operador trabajan con un software por aparte del PLC. Esto hace que tomen una base de datos que genera el PLC y la transmitan al programa que se encuentra en el panel y con esto se modifican las diferentes pantallas o animaciones. Si se presionan botones o se ajustan variables en el panel, este genera una base de datos que es transmitida al PLC para que este último trabaje con los nuevos valores. El PanelView tiene dos opciones para conectarse con el PLC o con una computadora: por medio del puerto serial o vía Ethernet. En este caso la mejor opción es Ethernet, más rápida que la comunicación serie. De esta manera también se puede monitorear el sistema desde una computadora externa.

¹⁵ Ver tabla de comparación en el apéndice A.2

5.2 Descripción del hardware

5.2.1 Generalidades

Para controlar una máquina es necesario el diseño de un circuito electrónico que se encargue de activar todas las funciones físicas del dispositivo para que este sea automático. Para el diseño de un circuito se deben de tomar en cuenta las conexiones de todos los instrumentos que se utilicen (por ejemplo sensores, PLC, motores, etc.). También es de suma importancia tener protecciones eléctricas para dichos instrumentos (Fusibles guardamotores). Otra consideración es la alimentación de todo el sistema, desde motores hasta las señales de control, los tipos de cable, las comunicaciones, en fin todo lo necesario para que el sistema funcione con confiabilidad.

El diseño de todas las conexiones se va a ir explicando por partes. Primero se va a hablar sobre la alimentación del sistema. En este caso se va a hacer mención de la acometida, los voltajes de alimentación de los equipos, de los motores, los dispositivos de protección, los transformadores, las tierras, los tipos de cable necesario, etc.

El segundo tema será sobre los motores. En esta sección se verán con detalle los tipos de motores, las conexiones y protecciones de cada uno de ellos. Además, se verá el variador de frecuencia que se va a utilizar y sus conexiones.

Después se hablará sobre los sensores, el tipo, las comunicaciones y los criterios para utilizarlos en el sistema. El cuarto tema es el de control. Este tema es muy amplio ya que se mencionan todas las señales que se utilizan para el control de la máquina (válvulas, motores, etc.). Además se menciona todo el modelado matemático de la planta, así como los pasos y pruebas que se realizaron para poder tener una interpretación matemática de cómo funciona la esterilizadora.

La quinta sección es acerca todas las seguridades del sistema, para poder monitorear su funcionamiento correctamente y así evitar o localizar algún problema en la producción.

5.2.2 Alimentación del sistema

La acometida proporcionada por Nestlé S.A. es una señal trifásica de 480VAC. Sólo los motores y el monitor de potencia se pueden alimentar de esta señal directamente, así que hay que convertirla para poder alimentar los demás equipos.

Lo más conveniente es convertir la señal original a una señal monofásica 120VAC para manejar todas las señales de control, y las fuentes de alimentación de los equipos que se utilizan en el sistema (panel de operador, PLC, luces, ventiladores, etc.). Se escogió 120VAC debido a que la mayoría de los equipos que se utilizan están diseñados para este voltaje.

En la figura 5.3 se puede observar un diagrama de bloques de todas las conexiones que se derivan de la acometida principal. Las señales trifásicas de 480VAC alimentan 4 partes del circuito; equipos de 120VAC, motores, variador, monitor de potencia.

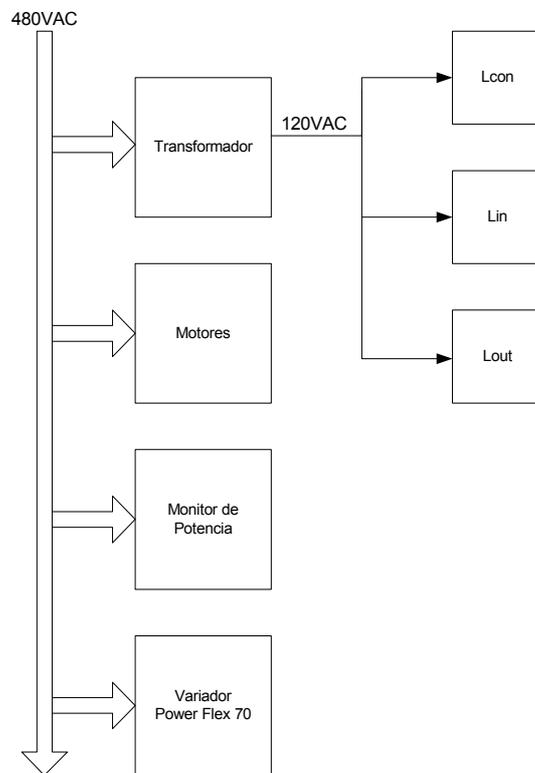


Figura 5. 3 Diagrama de bloques de configuración de la alimentación

Primero se tienen todos los equipos que trabajan a 120VAC monofásicos. Para lograr esto se utiliza un transformador de 480VAC a 120VAC monofásico. Se toman las señales de línea de la fase 1 y 2 de la acometida y se conectan al transformador.

Esta señal de 120VAC se divide en tres diferentes partes: Las señales de control, las señales de entrada y las señales de salida. También se tiene un neutro y la tierra. Dicha división se realiza con el fin de ordenarse en las conexiones que se necesitan hacer con esta señal.

Las señales de control (L_{CON}) son las que alimentan todas las fuentes de los dispositivos que se utilizan en el sistema: el panel de operador, el PLC, los dispositivos de comunicación, las fuentes de 24VCD, el graficador. También se utiliza para alimentar un toma polarizado, un ventilador y las luces que se requieren para trabajar dentro del gabinete. Estos son requisitos en los proyectos de automatización para proporcionar un mejor ambiente de trabajo a la hora de hacer reparaciones dentro del gabinete.

Como la Nestlé Panamá no dispone de un generador de energía de emergencia, se va a utilizar una UPS (proporcionada por la empresa) para poder mantener los dispositivos de control funcionando por un tiempo mientras la energía esté fuera. Este es de suma importancia ya que de esa manera se podrían mantener las condiciones de temperatura de los tanques de esterilización si la energía eléctrica fallara. Así que una UPS se conectara a esta línea y las fuentes se conectaran a la UPS.

Se tienen varias fuentes de alimentación una de las cuales es la fuente del PLC. Esta es una fuente interna que alimenta el procesador y los módulos del PLC a 24 VCD. Para la alimentación de los transmisores de los sensores, para el switch de Ethernet (ADAM)¹⁶ y para el convertidor de DH486 a RS232 (AIC)¹⁷ se necesita una fuente de 24VCD. Otras fuentes son la del panel de operador y la del graficador que también se alimentan a 24VCD.

¹⁶ Ver Anexos

¹⁷ Ver Anexos

Las fuentes del PLC, del panel de operador y la del graficador son fuentes exclusivas. Esto significa que estas fuentes no se utilizan para otra cosa más que para alimentar estos equipos. Estas fuentes ya vienen adaptadas eléctricamente para cada uno de los equipos, y les entregan el voltaje y la corriente que cada uno necesita.

La fuente que alimenta los sensores, y el ADAM y el AIC es una fuente de 24VCD que tiene que ser capaz de soportar una carga específica. Esta carga consiste en los transmisores de 4 a 20mA de temperatura y presión, y los dispositivos de comunicación. Una fuente de 2A basta para poder manejar estos dispositivos.

En el mercado existe una variedad de fuentes de poder que pueden funcionar para la aplicación, todas con características similares, lo único que varía es el precio. La fuente que se va a utilizar es una fuente de 120VAC a 24VCD/2.3A de marca Weidmueller; esta además de cumplir las características necesarias, tiene un excelente precio en el mercado y ha dado excelente rendimiento en otros proyectos realizados por Elvatron.

La línea L_{CON} se tiene que proteger de cualquier sobrevoltaje que se de en la línea. Para esto utiliza un fusible que soporte las cargas conectadas a esta línea. Sumando el consumo de todas las cargas conectadas se considera que un fusible de 6A es suficiente.

La señal de entrada (L_{IN}) se utiliza para todas las señales de entrada al módulo digital del PLC. Este módulo recibe voltajes de 0 a 120VAC, donde 0 es un cero digital y 120 es un uno digital. A este módulo se conectan todas las señales que provienen de interruptores, confirmaciones de motores, sensores de proximidad, etc. Para proteger estas entradas se utiliza un fusible de 3A ya que son 40 diferentes entradas digitales, y se utilizan 3 módulos.

La señal de salida (L_{OUT}) se utiliza para alimentar todas las señales de salida del PLC, o salidas digitales. Al igual que los módulos de entrada, los de salida entregan de 0 a 120VAC en la salida. Los que se alimentan con esta señal son relés que activan y desactivan diferentes dispositivos, como por ejemplo luces, paro y arranque de motores, ventiladores, etc. En total son 25 salidas. Se va a

utilizar un fusible de 5 A para proteger esta línea ya que maneja las bobinas de los relés (0.5A) y las luces de emergencia.

Es muy importante tener un interruptor que, en caso de emergencia, apague el sistema, o al menos los motores. Es por esto que se tienen interruptores en diferentes partes del proceso, donde sea fácil para el operador detener la línea. En total se determinaron 7 puntos críticos donde se pueda detener el proceso. En la figura 5.2 se puede observar dichos puntos. Estos lugares se determinaron porque son de fácil acceso para los operadores, y además están en lugares donde existe gran posibilidad de que una lata se atasque.

El primer lugar es a la entrada del precalentador ya que en este punto hay un cambio de banda y es más propenso a que una de las latas se atasque. Los otros puntos también tienen el mismo problema de cambio de bandas, así que existe otro interruptor en la salida del precalentador, a la salida de la esterilizadora, a la salida del enfriador, en la entrada del soplador, y por último en el elevador.

También se va a tener un interruptor en el gabinete, con un indicador de parada de emergencia. Se dispone de un fusible de protección de 1A para la luz de emergencia y los interruptores.

5.2.3 Motores

En todo el proceso de esterilización se utilizan 12 motores para el transporte de las latas. Los motores que se utilizan son trifásicos de inducción 260/480VAC, lo cual permite que se conecten directamente a la acometida sin necesidad de tener que ajustar la alimentación de estos.

Por requerimiento de Nestlé S.A. se tienen que instalar las previstas para dos motores de reserva que se utilizarían para mejoras al proceso en un futuro. De los 14 motores se tiene que controlar la velocidad de uno de ellos: el motor del precalentador. Para esto se va a utilizar un variador de frecuencia. Para los demás se tiene un contactor que los encienda y apague así como un guardamotor que los proteja de sobrecargas de corriente o de temperatura.

En la tabla 5.1 se muestra el listado de todos los motores con sus cargas respectivas y guardamotors específicos. El guardamotor térmico fusible se

calcula tomando la potencia del motor y dividiéndola entre el voltaje de alimentación, en este caso 480 VAC. De ahí se obtiene el valor de la corriente que consume a plena carga y se escoge el que se adapte a la necesidad. En el mercado existen muchos tipos de guardamotores que vienen con protección térmica fusible, así que lo único en que hay que fijarse es en la corriente de cada guarda motor y escogerlo.

Los motores de jaula de ardilla tienen la desventaja de que en el arranque se requiere de una corriente muy grande que puede causar una caída de tensión en la línea de alimentación. Para solucionar este problema se alimenta el devanado con un voltaje menor y, poco a poco, se va aumentando hasta que llega al voltaje de alimentación.

Una técnica que se utiliza es con un auto-transformador trifásico y un contactor. Primero se alimenta el motor con la mitad del voltaje de operación, cuando el motor comienza a moverse el contactor aplica todo el voltaje en las fases del motor. Esto permite que la corriente de arranque disminuya en un factor de 2.

Cuando el motor ya está en marcha, el contactor envía una señal de confirmación. Esta se utiliza para monitorear el arranque del motor. Si esta señal no se da, el sistema tiene que poder detectar que el motor falló por alguna razón. Cada uno de los motores tiene una señal de confirmación, las cuales se toman como entradas al PLC, para poder procesarlas después en el programa.

El motor número 3 requiere de un variador de frecuencia para poder modificar su velocidad de operación. En el proceso de esterilización el tiempo de exposición de la lata es de mucha importancia debido a que si no se da el tiempo suficiente esta se puede tener problemas de caducidad, y si se sobre expone puede quemar el producto.

Tabla 5. 1 Lista de cargas de esterilizadora de 6onz con sus respectivos guarda motores

	Descripción	Especificaciones			Alimentación	Guardamotor
		HP	Amperaje (A)	Fases	(V)	Térmico / fusible (A)
M1	Motor Cable de llenaje	1,5	2,6	3	230/460	2,4-4,4
M2	Motor Cable entrada Precal.	0,75	1,4	3	230/460	1-1,6
M3	Motor Precalentador	3,00	4,8	3	230/460	VFD
M4	Motor Trans. PECO #1.	0,50	1,0	3	230/460	1-1,6
M5	Motor Trans. PECO #2.	0,50	1,0	3	230/460	1-1,6
M6	Motor Esterilizador	10,00	14,0	3	230/460	10-16,0
M7	Motor transp. Secadora de latas	0,50	1,0	3	230/460	1-1,6
M8	Motor ventilador Secador de latas	7,50	11,0	3	230/460	10-16,0
M9	Motor ventilador auxiliar	0,75	1,4	3	230/460	1-1,6
M10	Motor transportador elevador de lata	1,00	1,8	3	230/460	1,6-2,4
M11	Motor cable de salida FMC	1,50	2,6	3	230/460	2,4-4
M12	Motor cable hacia embalaje	0,75	1,4	3	230/460	1-1,6
M13	Reserva	10,00	14,0	3	230/460	10-16,0
M14	Reserva	7,50	11,0	3	230/460	10-16,0

Como las temperaturas a las que se exponen las latas son muy altas, hay que pasarlas primero por una cámara que las exponga a temperaturas menos intensas para que estas comiencen el proceso de calentamiento. Dependiendo de la marca de leche evaporada que se va a esterilizar, así es el tiempo de exposición de la lata. Lo ideal en este caso sería poder variar la velocidad de la exposición del precalentador y la esterilizadora, pero por cuestiones de costos sólo se va a controlar la velocidad del precalentador.

Se escogió variar la velocidad del precalentador debido a que esta cambia para los diferentes tipos de marcas que trabaja Nestlé S.A. Cuando las latas llegan a la cámara de esterilización el tiempo de exposición es muy parecido para todas, así que, variando la exposición en el precalentador, se puede trabajar con

un tiempo fijo para el motor de la esterilizadora. Además, es de suma importancia que el motor que se encuentra en el precalentador sea de menor potencia, así que el variador que se utiliza es más pequeño y por ende menos costoso.

El PowerFlex 70 es un variador que ofrece diferentes tipos de comunicación con el PLC. Entre ellas se destaca la comunicación vía red Ethernet o por señales analógicas de 4 a 20mA. Además posee una interfase de operación que permite una rápida y fácil configuración del tipo de motor, potencia, velocidad y comunicaciones en el mismo dispositivo. Esta interfase está constituida de un panel con una pantalla y una botonera, que permiten controlar y monitorear el funcionamiento del dispositivo directamente.

El control de velocidad se va a realizar con las señales analógicas ya que la velocidad de respuesta es más rápida. Además el ruido no afecta a este tipo de líneas. No se va a utilizar la comunicación Ethernet para que se comuniquen el PLC y el variador debido a que esta red se va a utilizar para la comunicación del PLC con el panel de operador.

5.2.4 Sensores

Los sensores que se van a utilizar en este proyecto son para medir la temperatura en las cámaras de precalentador y de esterilización, la presión de las tuberías de vapor y de agua. También se van a utilizar unos sensores de proximidad y, por último, los sensores de atascamiento. Estos últimos son interruptores que se activan cuando una lata se atasca en ciertos lugares de la línea de producción. En la sección de seguridades (6.1.6) se van a retomar estos elementos.

Primero se van a analizar los transductores de temperatura. Como se mencionó en el marco teórico, los más utilizados para este tipo de aplicaciones son las termocuplas o los RTD. Tomando en cuenta los pro y los contra de cada tipo de sensor y aplicándolos al sistema, se llegó a la conclusión que el RTD es el óptimo para esta aplicación.

Las temperaturas que se van a utilizar en el proceso son de 120°C máximo. Así que más que resistencia a altas temperaturas, se necesita precisión a la hora

de medir. Además, las termocuplas no tienen una variación lineal y son propensas a ruidos. Mientras que los RTD de platino, aunque son más costosos, tienen mejor precisión y una respuesta más rápida a cambios de temperatura.

La velocidad de respuesta es muy importante debido a que la temperatura es la variable que se quiere controlar y cada vez que entra una lata a una de las cámaras se produce un choque térmico, lo que significa una perturbación en el ambiente y un cambio en la temperatura dentro del tanque.

El sistema de control automático tiene que ser capaz de ajustar las condiciones de temperatura lo más rápido que se pueda. Así que la precisión y la rapidez de respuesta del sensor son muy importantes.

El gabinete se va a instalar en un cuarto de control que se encuentra como a 10m de los tanques. Los RTD se pueden conectar directamente al PLC por un cable; pero como es una distancia considerable se introduciría un error de resistencia en la medición, por lo que habría que utilizar cables de compensación y realizar cálculos para obtener la medición real de la resistencia del sensor; con la posibilidad de que igual se den problemas en la lectura.

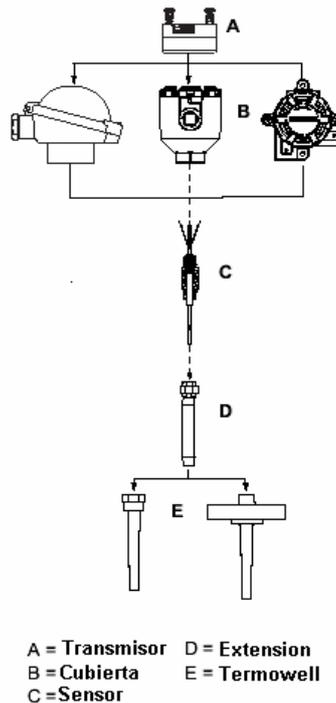
Una mejor forma de hacer la conexión de los sensores con el PLC es por medio de un transmisor de 4 a 20mA. Este transmisor se conecta directamente a la RTD, evitando así los errores que introducen los cables de conexión. Este protocolo de transmisión también evita el ruido que introducen los motores y otras máquinas cercanas. Además de que la respuesta es muy rápida y precisa.

En el mercado existen infinidad de RTD, de diferentes tipos de resistencia nominal (como se mencionó en el marco teórico), con diferentes cubiertas, de diferentes tamaños, etc. Además, hay transmisores de 4 a 20mA específicos para cada uno de estos sensores. Como ya estos circuitos están construidos y probados, es mejor buscar un sensor de RTD que contenga de una vez el transmisor de 4 a 20mA.

Se va a utilizar un RTD PT100Ω 38.5 ya que su rango de temperaturas cumple con lo necesario y es un estándar en la industria. Como los espacios donde el operario debe desplazarse son muy pequeños, se buscó un transmisor

que cumpliera las medidas necesarias para evitar problemas de espacio, así evitar un accidente.

Se encontró el transmisor Rosemount 248, que es un ensamble para monitorear la temperatura. Este está constituido por un transmisor, una cubierta o cabeza, sensor, extensiones y la termowell. En la figura 5.4 se puede observar como está constituido dicho dispositivo.



Fuente: Referencia número 15 en la bibliografía

Figura 5. 4 Transmisor de temperatura Rosemount 248

La electrónica del transmisor es la misma para cualquier tipo. Por el contrario existen tres tipos de cubiertas o cabeza, las cuales se utilizan para cubrir el transmisor y se puede escoger la forma física dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar. El sensor se debe especificar según lo que se quiera (RTD, termocupla). Después se encuentra la extensión, la cual se utiliza para alargar más el transmisor y así evitar el contacto con la superficie del tanque. Con esto se protege la electrónica del sensor por los cambios de temperatura que se pueden dar en el material del tanque. Por último está la termowell, que funciona como

protección al sensor. Esto evita el contacto con el ambiente al que está expuesto, por lo que va a resultar menos propenso a degradaciones.

Para poder ordenar el transductor se necesita especificar cada una de las partes de este. La forma en que se pide es 248ABCD, donde A es el tipo de transmisor, B es la cubierta, C es el sensor, D es la extensión y E es la termowell. En las hojas de datos se especifican las diferentes opciones que existen para configurar estos sensores. El que se va a utilizar en la aplicación es el 248HANAA2URT25U004Q4F6. Las partes que constituyen este transmisor son:

HA- Transmisor de 4 a 20mA. Solo existe este tipo

NA- Esta especifica una certificación de la cabeza. En este caso no es necesario ningún tipo de certificados. Especifica el tipo de cabeza que se va a utilizar, el conector y el material de este. En este caso es una cabeza de tipo Rosemount (la cubierta del centro en la figura 5.2), y es de aluminio.

2- Indica el tipo de cable y el tipo de rosca

UR- Indica el tipo de sensor que se va a utilizar con el transmisor. En este caso es una RTD Pt 100 de cuatro cables.

T25- Tipo de conexión de la termowell. En este caso es de rosca de tornillo.

U004- Esta indica la longitud de inmersión del sensor. En este caso se indica que es para 4 pulgadas por la forma del tanque dentro del tanque.¹⁸

Q4- Este indica que el transmisor tiene que estar calibrado y certificado por Rosemount.

F6- Este es un filtro de 60Hz para evitar problemas de ruido en la línea.

¹⁸ De la forma de los tanques se hablará en la siguiente sección

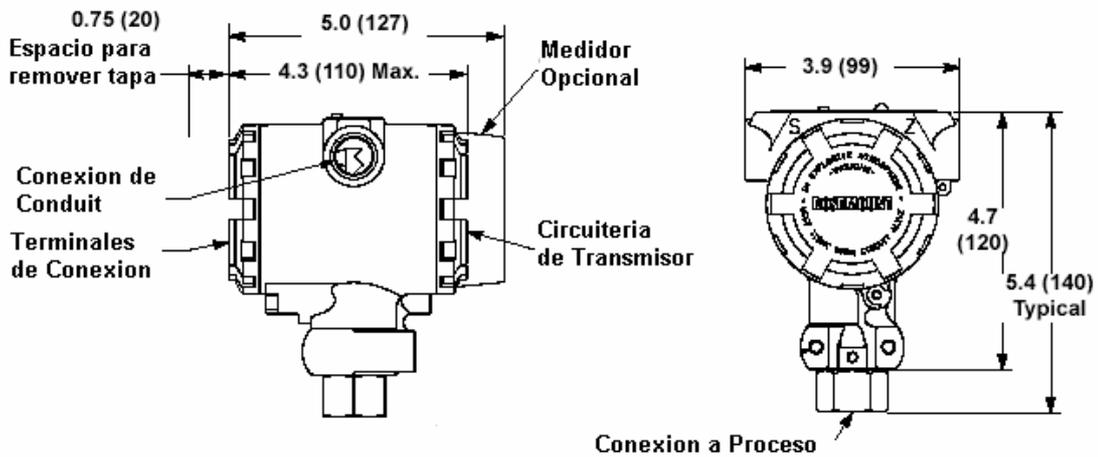
La extensión del transmisor se debería indicar después del tipo de sensor; pero en este caso no se va a utilizar extensiones. El motivo de no utilizar la extensión es por el poco espacio que existe entre los tanques y el camino de los operadores. Si el sensor es muy largo los operadores se pueden tropezar con esto y hacerles daño, por lo cual entre más cerca del tanque mejor. En este caso la electrónica del transmisor no se va a ver afectada por la temperatura ya que estos tanques tiene aislamientos térmicos, por lo que la superficie no calienta mucho.

El transmisor 248 tiene las salidas y entradas eléctricas aisladas para 500 VACrms (707 VCD) a una frecuencia de 60 Hz. El voltaje de operación es de 12 a 42.4VCD. Tiene un tiempo de respuesta de 0.5 segundos después de que se haya aplicado alimentación, Después tiene un tiempo de 0.5 segundos de refrescamiento. Las temperaturas de operación límites son de -40 a 85 °C.

Los sensores de presión que se van a utilizar son sensores capacitivos, los cuales miden la diferencia de presión dentro de la tubería con respecto a la que hay en el ambiente exterior, y la convierten en un voltaje mediante un cambio de capacitancia. Estos sensores usualmente no vienen con terminales para conectarlos directamente al PLC, sino que existen transmisores que convierten la diferencia de presión a señales de 4 a 20mA.

Se va a utilizar el sensor capacitivo de diafragma porque es sumamente preciso, duradero, resistente a vibraciones y su costo es mucho menor que otros tipos con las mismas características de desempeño.

Las presiones que se quieren monitorear no son altas ya que son las líneas de vapor (varían temperatura en los tanques) y aire comprimido (controla las válvulas). Lo que se buscó en el transductor es que esté diseñado para medir gases o vapor, que transmita las señales de 4 a 20mA, por las ventajas ya mencionadas de este protocolo. Además, interesa que sea de fácil instalación y se adapte a la tubería.



Fuente: Referencia número15 en la bibliografía

Figura 5. 5 Transductor de Presión

El sensor que se va a utilizar es de marca Rosemount (al igual que el sensor de temperatura) y el modelo es 2088 (véase figura 5.5). Este sensor está diseñado para tener confiabilidad, durabilidad y fácil mantenimiento. El tipo de aceite que se utiliza se ve muy poco afectado por la temperatura. Su diseño compacto permite que se conecte directamente al proceso, lo que significa una instalación fácil, rápida, y de bajo costo. También tiene la opción de complementarse con un medidor analógico de presión.

Este transductor envía señales de 4 a 20mA, pero también se puede ordenar para que envíe señales de 0 a 5V. Este último tipo de señales no es muy recomendado porque como es tensión se dan pérdidas en las líneas y no entregan mucha potencia, lo cual puede dar lecturas erróneas.

Una de las ventajas que tiene es la protección contra polaridad. El voltaje de operación puede ser de 10.5 a 36V, el tiempo de respuesta es de 200 milisegundos con un tiempo muerto menor a 0.1s. Los límites de temperatura son de -40 a 121°C. Este sensor tiene un sistema que se auto-diagnostica. Si se detecta una falla la señal analógica se lleva hasta un máximo o a un mínimo para alertar.

La precisión de este transductor es de $\pm 0.10\%$ del rango en que se calibra el sensor. El efecto de la vibración es de $\pm 0.01\%$ a una frecuencia de 5 a 15Hz. La posición de cómo se instale no influye en su desempeño.

El sensor que se va a utilizar es 2088G2S22A1Q4 donde:

G- Indica el tipo de presión que se va a medir. En este caso es Manométrica.

2- indica el rango de operación. En este caso es de 0 a 150psi

S- indica la salida del transmisor. Para este caso es 4 a 20mA

22- Dice el tipo de aceite que se utiliza

A- Indica que la conexión con la tubería de proceso es de $\frac{1}{2}$ -14NPT hembra.

1- Indica el tipo de rosca para el conduit $\frac{1}{2}$ -14NPT

Q4- Indica que está certificado por Rosemount.

Para la comunicación se requiere como mínimo una impedancia de 250ohms, y el máximo se obtiene mediante la fórmula:

$$R_{\max} = 43.5(V - 10.5) \quad (5.1)$$

Los sensores de presión se tienen que poner uno en cada una de las tuberías que se utiliza en el sistema. En total son 3 tuberías diferentes y una cámara, a las que hay que monitorear la presión: la tubería del aire comprimido, la presión dentro de la esterilizadora y la tubería del enfriador.

Los transmisores de 4 a 20mA utilizados son pasivos, esto es que necesitan de alimentación para su funcionamiento. Estos trabajan con un voltaje de 24VCD que se utiliza para poder dar energía al lazo de corriente que generan entre el transmisor y el receptor (en este caso el PLC).

5.2.5 Control automático

Para el modelado matemático de las cámaras, primero se van a realizar los cálculos del sistema en estado estacionario. Se van a tomar las latas de leche evaporada como una perturbación al sistema; por lo tanto para realizar dicho cálculo se va a suponer que no haya latas dentro del tanque.

Todos los tanques tienen las mismas dimensiones, así que el modelo de uno de ellos es equivalente a todos. Lo que cambia es la posición donde se encuentran los sensores y las temperaturas a las que estos tienen que estar. Los tanques están constituidos de una lámina de hierro de 3/8 de pulgada de espesor forrada con 2 pulgadas de fibra de vidrio, la cual a su vez está forrada con otra lámina de hierro de media pulgada.

En la figura 5.6 se pueden observar las dimensiones de los tanques y su construcción. Se puede distinguir que se forman 5 cilindros diferentes. El primer cilindro, formado por la lámina de hierro de media pulgada, tiene un diámetro de 1.66m. Además, tiene una longitud de 5.12m de largo. El segundo tiene un diámetro de 1.6473m y un largo de 5.1073m, el tercer cilindro tiene un diámetro de 1.5965m y una longitud de 5.0565m. El cuarto cilindro tiene un diámetro de 1.586975m y una longitud de 5.046975m.

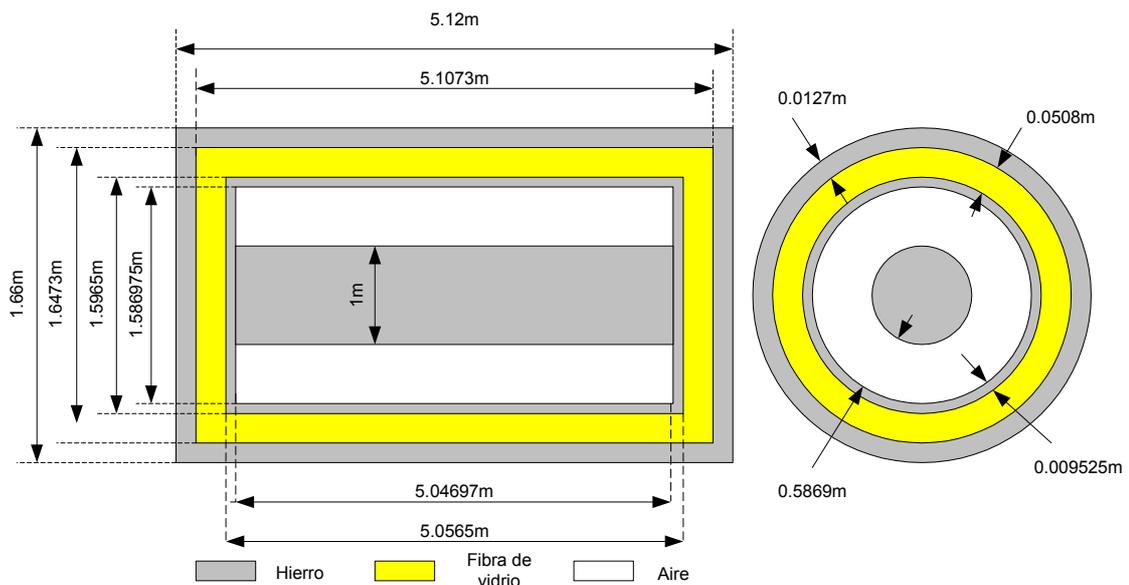


Figura 5. 6 Diagrama de construcción de los tanques.

El último cilindro es el que se encarga de transportar las latas dentro del tanque. Este tiene una cinta magnetizada que se mueve en forma de tornillo sin fin, la cual lleva las latas en un recorrido circular desde la entrada del cilindro hasta la salida de este. Al girar, este cilindro mueve un ventilador que es el que se encarga de distribuir la temperatura dentro del tanque. En la figura 5.7 se muestra este funcionamiento.

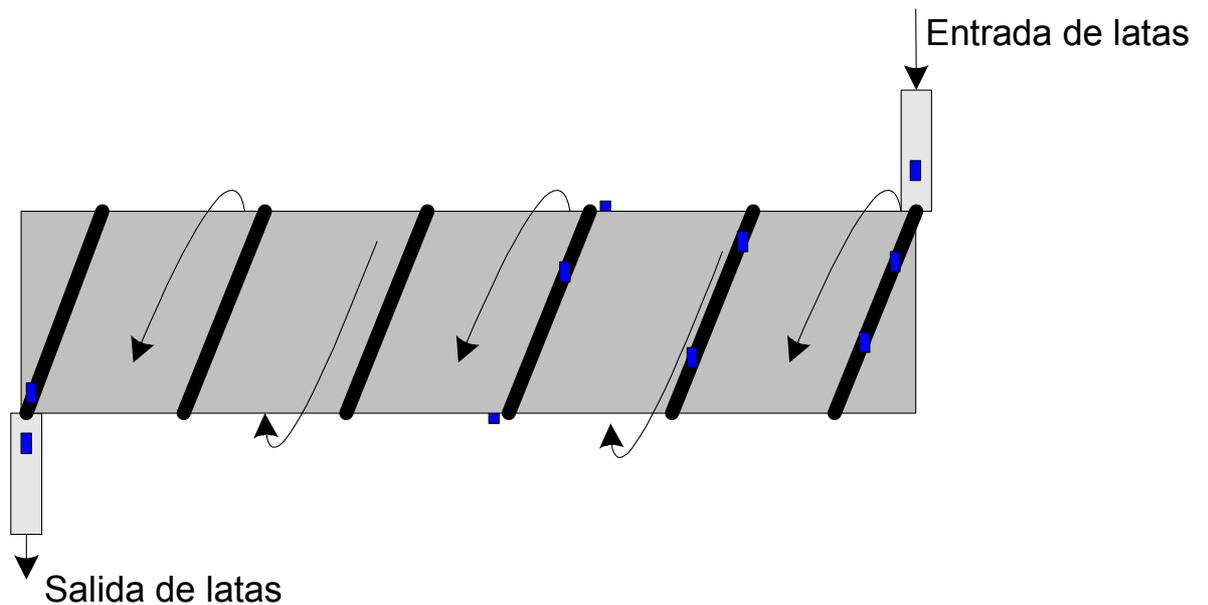


Figura 5. 7 Diagrama del transporte de la latas dentro del tanque.

El tanque del precalentador tiene dos fuentes de temperatura, una se utiliza para mantener la temperatura a 80 grados Celsius a la mitad del tanque y la otra para ajustar la temperatura a 100 grados en la salida del precalentador. Existe un flujo de aire que genera el ventilador, el cual hace que el calor se transfiera hacia la salida del tanque. Esto permite que a la mitad haya una temperatura y a la salida otra, ya que el aire caliente se mueve hacia la salida del tanque.

El tanque del enfriador solo tiene una fuente de temperatura y el enfriador tiene dos fuentes más, una a la entrada y la otra a la salida. Estos tanques también transportan las latas mediante el cilindro del centro con la cinta magnética y mueve un ventilador que transfiere la temperatura por todo el tanque.

Ya que es un sistema térmico, lo que toma en cuenta es la transferencia de calor existente entre la tubería de vapor hacia el aire dentro del tanque y hacia fuera del tanque. La tubería de vapor se va a considerar como la fuente de calor, y el forro del tanque, constituido por las dos láminas de hierro y el forro de fibra de vidrio, es el material que contienen dentro del tanque.

Se van a calcular dos modelos diferentes para el tanque. El primero es un método experimental el cual ignora la convección de temperatura existente dentro del tanque y se concentra solo en la conducción de los materiales. Como el sistema es térmico, este es un sistema en que la temperatura varía lentamente por lo que su comportamiento se puede aproximar a un sistema de primer orden.

El segundo método que se va a utilizar se llama método de capacidad calorífica global, suponiendo que el tanque es uniforme en temperatura. Este método es mucho más exacto, debido a que se toman en cuenta las condiciones de transferencia de calor desde dentro del tanque a los diferentes materiales que lo cubren; esto es, el coeficiente de transferencia de calor por convección en las diferentes superficies del tanque.

5.2.5.1 Método experimental

El diagrama de bloques a lazo abierto del tanque se muestra en la figura 5.8. Para el cálculo del modelo estático vamos a despreciar las perturbaciones que tiene el tanque, ya que el controlador debe ser capaz de compensar estas se hablará más adelante. Así que se tiene una fuente de flujo calorífico $Q(s)$, la planta $G(s)$ y una temperatura de salida $V(s)$.

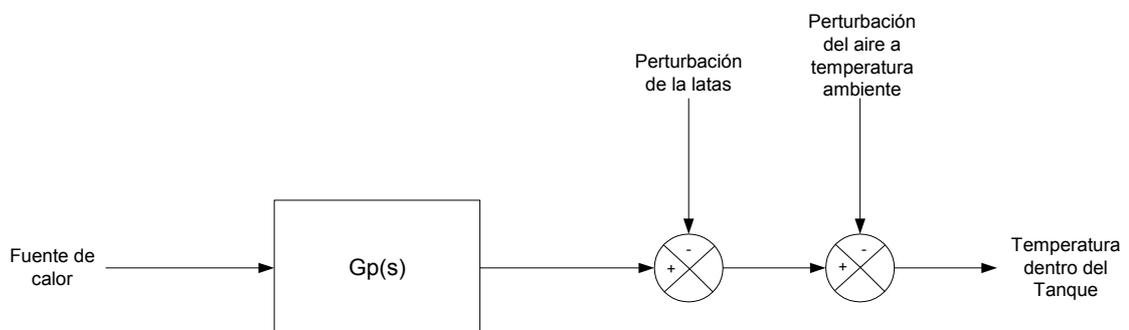


Figura 5. 8 Diagrama de bloques a lazo abierto del tanque

Un sistema térmico se puede representar mediante una analogía con un circuito eléctrico. Se considera un circuito RC en paralelo, donde $Q(s)$ es la fuente de corriente, R_{TH} es la resistencia térmica de la cubierta del tanque, y C_{TH} es la capacidad térmica del aire. En la figura 5.9 está el circuito eléctrico análogo al funcionamiento del tanque en estado estacionario.

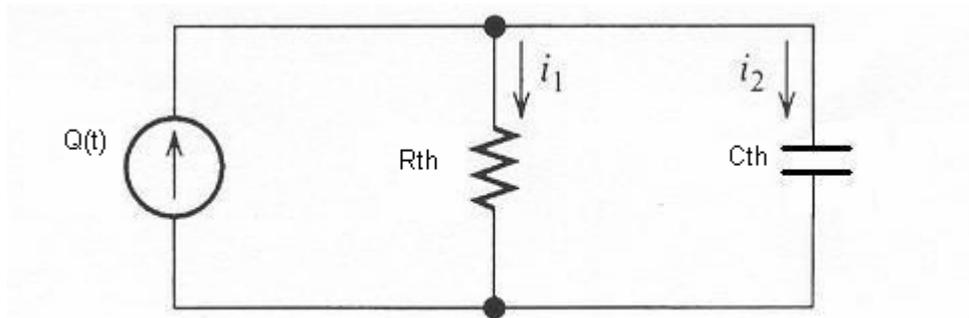


Figura 5. 9 Circuito eléctrico representativo a un sistema térmico

Como se mencionó anteriormente, se van a despreciar las capacidades térmicas de los materiales que conforman el tanque y solo se van a tomar en cuenta los coeficientes de conductividad de estos materiales.

Con un análisis de nodos obtenemos la ecuación diferencial del circuito:

$$q(t) = \frac{V(t)}{R_{TH}} + C_{TH} \frac{dV(t)}{dt} \quad (5.3)$$

Aplicando la transformada de Laplace se obtiene:

$$Q(s) = \frac{V(s)}{R_{TH}} + V(s)sC_{TH}$$

$$V(s) = \frac{Q(s)R_{TH}}{sR_{TH}C + 1} \quad (5.4)$$

Así que la función de transferencia $G(s)$ es:

$$G(s) = \frac{V(s)}{Q(s)} = \frac{R_{TH}}{1 + sR_{TH}C_{TH}} = \frac{1}{C_{TH} \left(s + \frac{1}{\tau} \right)} \quad (5.5)$$

Se necesita calcular el valor de la resistencia y la capacitancia térmica para obtener un modelo numérico de la planta, así que se va a encontrar la resistencia térmica de los materiales que forman los tanques. Primero se va a calcular la resistencia térmica del hierro de adentro, el cual lo vamos a llamar Fe_1 .

La resistencia térmica está dada por la ecuación:

$$R_{TH} = \frac{1}{K} \quad (5.6)$$

Donde K es un coeficiente de transferencia de calor con unidades de $\frac{W}{^\circ C}$ que está dado por:

$$K = \frac{kA}{\Delta X} \quad (5.7)$$

Teniendo que k es la conductividad térmica del material, A es el área que cubre el material, y ΔX es el grosor de de material.

La conductividad térmica de la lámina de hierro interna se obtuvo de la literatura, así que:

$$k = 79.5 \frac{W}{m^\circ C}$$
$$d = 1.586975m$$

$$\begin{aligned}
 L &= 5.0563\text{m} \\
 \Delta X &= 0.009525 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (68) se tiene que:

$$K = \frac{79.5 \cdot [\pi(1.5965)(5.0563)] [\pi(1.5965)^2]}{0.009525} = 2288310.5 \frac{W}{^\circ C}
 \tag{5.9}$$

Por lo que R_{TH} es igual a:

$$R_{Fe_1} = 4.38 \times 10^{-6} \frac{^\circ C}{W}
 \tag{5.10}$$

La resistencia térmica de la fibra de vidrio se calcula de la misma manera, con los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 k &= 0.048 \frac{W}{m^\circ C} \\
 d &= 1.6473\text{m} \\
 L &= 5.1073\text{m} \\
 \Delta X &= 0.0508 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

Por lo que la resistencia térmica de la fibra de vidrio es igual a:

$$R_{FV} = 0.03705 \frac{^\circ C}{W}
 \tag{5.12}$$

Y la resistencia térmica de la lámina de hierro externa es igual a:

$$R_{Fe_2} = 5.45 \times 10^{-6} \frac{^\circ C}{W}
 \tag{5.13}$$

La resistencia térmica total del tanque es la suma de todas las resistencias del sistema. Como se puede notar, las resistencias de las láminas de hierro son despreciables, ya que son muy pequeñas. Es por esta razón que se utiliza la fibra de vidrio para poder minimizar las pérdidas en el tanque. La resistencia total es igual a:

$$R_{TH} = 0.03706336 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (5.14)$$

Ahora se necesita calcular la capacidad térmica del aire. Este cálculo se realizó experimentalmente y teóricamente para comparar los valores y la exactitud del modelado. Se tomó el tiempo que duraba calentando el tanque a máxima potencia y cuanto duraba el tanque enfriando una vez que se le habría quitado la potencia. El primer caso, el tanque duró 20 minutos para pasar de 28 °C a 100°C, y para enfriar de 100°C a 27°C duró 20 minutos.

Continuando con la analogía eléctrica, el tiempo que dura el tanque enfriando es equivalente a la descarga de un capacitor en un circuito RC cuando se apaga la fuente de corriente y donde el voltaje se disipa en la resistencia. Así que se tiene una constante de tiempo $\tau=RC$. Un condensador se considera que está descargado en un tiempo de 5τ , que en este caso sería 20 minutos ó 1200 segundos. Por lo que τ es igual a 240 segundos y como ya se sabe el valor de la resistencia térmica del tanque se despeja la capacidad térmica del aire.

$$C_{TH} = \frac{\tau}{R_{TH}} = 6475.3978 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (5.15)$$

La capacitancia térmica del aire se puede calcular teóricamente conociendo los valores del calor específico, y la masa del aire; y está dada por la ecuación:

$$C_{TH} = c \cdot m = c \cdot \rho \cdot V \quad (5.16)$$

Donde el calor específico del aire (c) a una temperatura de 27 grados centígrados y 1atm es igual a $1005.7 \frac{J}{Kg^{\circ}C}$, la densidad del aire a esa misma temperatura es de $1.1774 \frac{Kg}{m^3}$, y el volumen que ocupa el aire es igual a:

$$V_{aire} = \frac{\pi}{4}(5.046975)(1.5869^2 - 1) = 6.0181746m^3 \quad (5.17)$$

Por lo que la capacitancia térmica teórica del aire es igual a $7126.1824 \frac{J}{^{\circ}C}$, que tiene una diferencia de $650 \frac{J}{^{\circ}C}$, que equivale a un error del 8% aproximadamente. Esta diferencia puede tener varias explicaciones ya que son muchas las variables que no se toman en cuenta, o se utilizan valores aproximados. Por ejemplo, la capacidad calorífica del aire depende en gran medida de la presión a la que está sometida, y los valores teóricos que se utilizaron están a una temperatura definida. Además, en el cálculo experimental no se tomaron en cuenta las transferencias de calor debidas a la convección entre las superficies y se despreció la capacidad térmica de los materiales que conforman el cilindro, así como no se tomaron en cuenta las turbulencias dentro del tanque.

Lo que se tiene que tomar en cuenta es que el modelo es una representación matemática aproximada de la realidad, por lo que nunca se va a tener un modelo completamente exacto. Se trata de buscar la mejor aproximación para predecir el comportamiento de este.

Se sustituye en la ecuación (5.5) el valor de la capacidad térmica y se obtiene:

$$G(s) = \frac{V(s)}{Q(s)} = \frac{0.00015443}{s + 0.0041667} \quad (5.18)$$

La ecuación 5.18 describe matemáticamente el tanque en estado estacionario a lazo abierto. En las figuras 5.10 se puede observar la respuesta a lazo abierto del sistema.

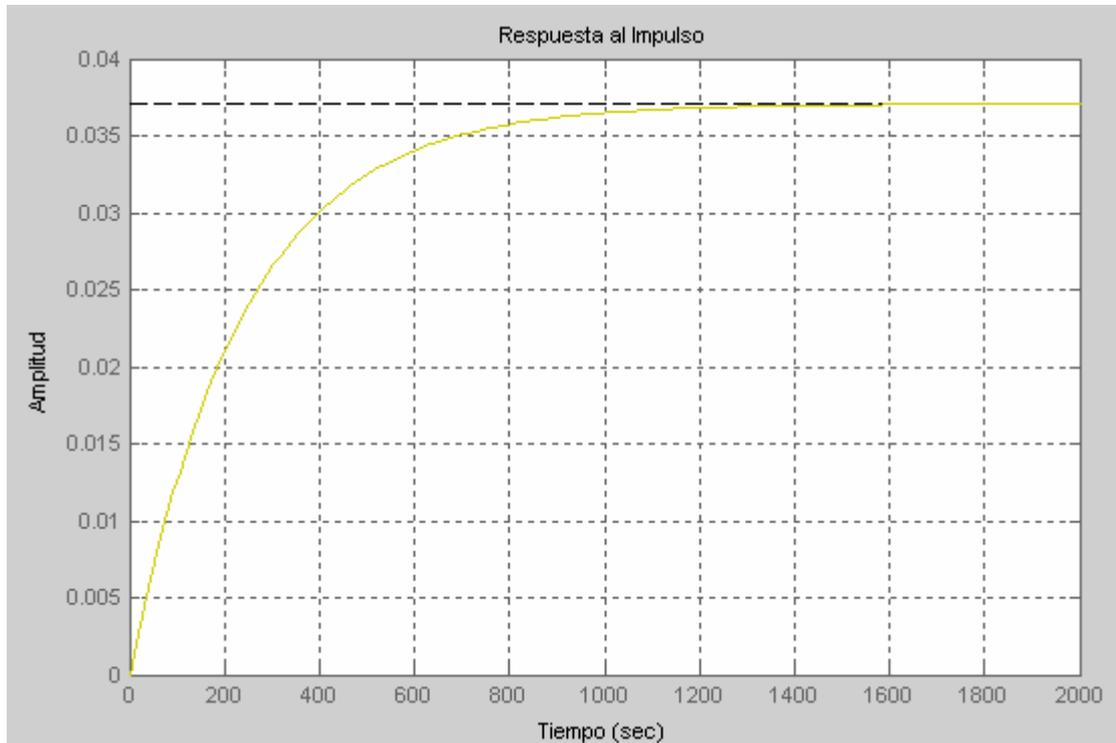


Figura 5. 10 Respuesta al escalón del sistema

Se puede notar que la temperatura llega a estabilizarse en 1200 segundos; pero el error de estado estacionario a lazo abierto está dado por la ecuación:

$$e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad (5.19)$$

Así que representa un error de un 96.29%, que es sumamente grande. Este error se debe compensar con el diseño del controlador para que la respuesta al escalón llegué al 100% lo más rápido que se pueda.

Tomado el sistema a lazo cerrado que se observa en la figura 5.11, con retroalimentación de ganancia 1 se obtiene la respuesta, como se observa en la figura 5.12.

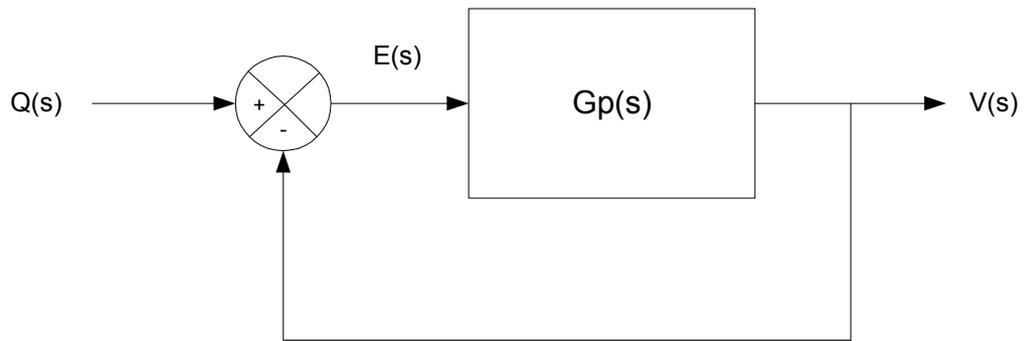


Figura 5. 11 Diagrama de bloques del sistema a lazo cerrado

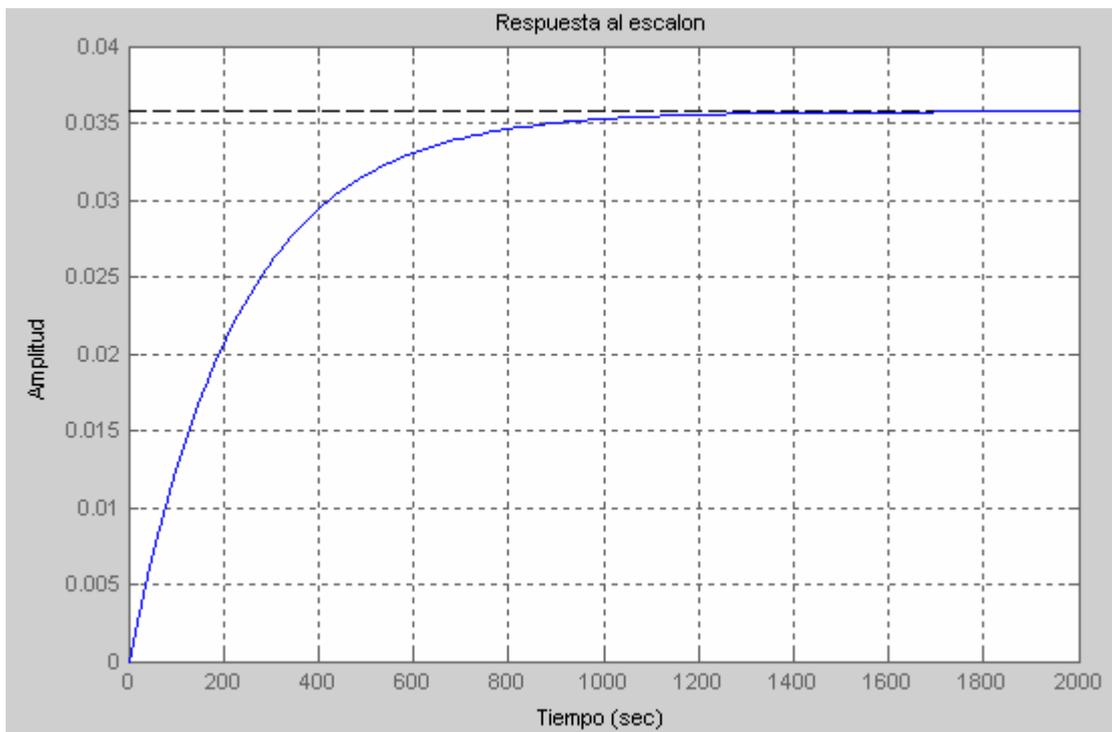


Figura 5. 12 Respuesta al escalón del sistema a lazo cerrado

En este caso el error de estado estacionario está dado por la ecuación:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)} \quad (5.20)$$

Por lo que el sistema a lazo cerrado tiene un error de estado estacionario de 96.4264%, que es muy grande. Esto hace que sea muy ineficiente a la hora de hacer su trabajo. Aplicando un controlador se puede hacer que el sistema tenga un error de estado estacionario muy cercano a cero, mejorando la eficacia y eficiencia.

5.2.5.2 Método de capacidad calorífica global

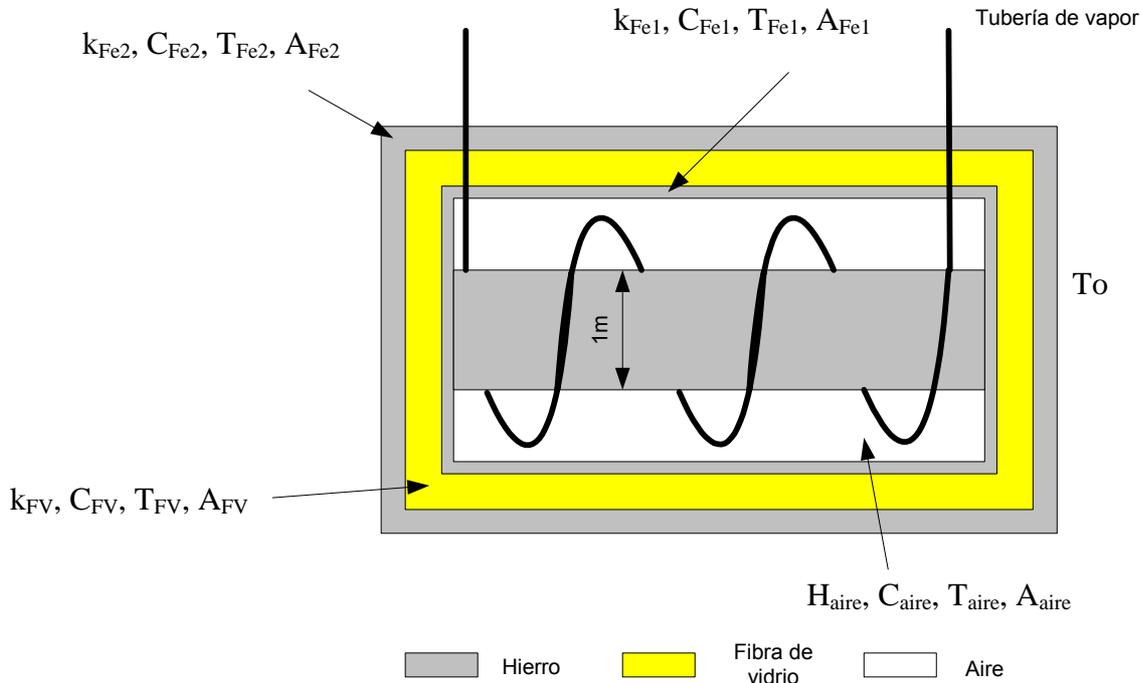


Figura 5. 13 Diagrama de características de los materiales de construcción del tanque

La figura 5.13 muestra las características que tiene cada uno de los materiales de construcción del tanque. La figura indica que el aire dentro del tanque tiene un coeficiente de transmisión de temperatura (h_{aire}). También tiene una capacitancia térmica (C_{aire}), y un área definida y una temperatura que varía en el tiempo ($T_{aire}(t)$). Para simplificar el cálculo se va a tomar la tubería como la fuente calorífica del sistema constante.

Se realiza un cálculo de balance de energía en el tanque y se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 h_{aire} A_{aire} (T_{aire} - T_{Fe1}) &= -C_{aire} \frac{dT_{aire}}{dt} - Q(t) \\
 h_{aire} A_{aire} (T_{Fe1} - T_{aire}) + \frac{k_{Fe1} A_{Fe1}}{\Delta X_{Fe1}} (T_{Fe1} - T_{FV}) &= -C_{Fe1} \frac{dT_{Fe1}}{dt} \\
 \frac{k_{Fe1} A_{Fe1}}{\Delta X_{FV}} (T_{FV} - T_{Fe1}) + \frac{k_{FV} A_{FV}}{\Delta X_{FV}} (T_{FV} - T_{Fe2}) &= -C_{FV} \frac{dT_{FV}}{dt} \\
 \frac{k_{FV} A_{FV}}{\Delta X_{Fe2}} (T_{Fe2} - T_{FV}) + h_{AF} A_{Fe2} (T_{Fe2} - T_o) &= -C_{Fe2} \frac{dT_{Fe2}}{dt}
 \end{aligned} \tag{5.21}$$

Donde h_{aire} es el promedio del coeficiente de transferencia de calor que se da entre el aire dentro del tanque y la primera lámina de hierro. Y h_{AF} es el promedio del coeficiente de transferencia de calor que se da entre la lámina de hierro externa y el aire en el ambiente. Se utilizan estos coeficientes debido a la transferencia por convección que se da entre el aire y el hierro.

Los coeficientes de transferencia de calor dependen de muchas variables, y estas cambian según la temperatura, presión, área, turbulencias, etc. Por ello se deben utilizar aproximaciones en un sistema estático. Se tiene una aproximación del valor de estos coeficientes y está dado por la siguiente ecuación:

$$h = 0.332(\text{Re})^{\frac{1}{2}}(\text{Pr})^{\frac{1}{3}} \frac{k}{x} \tag{5.22}$$

Donde Re es el número de Reynolds, Pr es el número de Prant, k es la conductividad térmica del aire, y x es el grosor del hierro. Para el aire a una temperatura de 27°C, el número de Prant tiene un valor de 0.708. Para calcular el número de Reynolds se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Re} = \frac{u_{\infty} X}{\nu} \tag{5.23}$$

Teniendo que u es la velocidad del aire dentro del tanque, se puede realizar una suposición de 2m/s, X es el grosor del material y ν es la viscosidad del aire. Para este caso se tiene que la viscosidad del aire a una temperatura de 27°C es igual a 16.84×10^{-6} .

Así que el valor del Reynolds para el aire dentro del tanque es igual a: 1131.2352.

Se sustituyen estos valores y se obtiene que:

$$h = 27.417287 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (5.24)$$

Para que este método funcione se tiene que cumplir la siguiente relación:

$$\frac{h(V/A)}{k} < 0.1 \quad (5.25)$$

Ya que el coeficiente de convección no es igual en todos los puntos de la frontera entre el aire y el hierro se debe calcular un promedio. Una aproximación se puede calcular multiplicando este coeficiente por 2. Así que se tiene que el promedio de h es $\bar{h}_{aire} = 54.83457 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$.

Realizando los mismo cálculos para el coeficiente de transferencia de calor entre el aire del ambiente y la lámina externa de hierro, se tiene que $\bar{h}_{AF} = 47.488132 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$.

Entre los materiales que conforman el tanque se utilizó la transferencia por medio de conducción entre los materiales. Para esto se supuso que las uniones entre los materiales son perfectas. Por lo que se calcularon los coeficientes de transferencia de calor por conductividad que existen entre los materiales.

Realizando la matriz de transición para las ecuaciones anteriores se tiene que:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_{aire}}{dt} \\ \frac{dT_{Fe1}}{dt} \\ \frac{dT_{FV}}{dt} \\ \frac{dT_{Fe2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.19362 & 0.19362 & 0 & 0 \\ 0.00321 & -0.5346 & 0.53140 & 0 \\ 0 & 2.1486 & -0.00027417 & 0.00025396 \\ 0 & 0 & 0.00044338 & -0.002273 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{aire} \\ T_{Fe1} \\ T_{FV} \\ T_{Fe2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.00014033 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} Q(t) \quad (5.26)$$

Resolviendo este sistema se obtiene la función de transferencia:

$$\begin{aligned} G(s) &= C(sI - A)^{-1} B = [1 \ 0 \ 0](sI - A)^{-1} B \\ &= \frac{0.0001403s^3 + 7.536 \times 10^{-5}s^2 - 0.00016s - 3.642 \times 10^{-7}}{s^4 + 0.7308s^3 - 1.037s^2 - 0.2234s - 0.0005025} \\ &= \frac{0.0001403(s - 1.369)(s - 0.834)(s + 0.002274)}{(s + 1.369)(s - 0.8342)(s + 0.1935)(s + 0.002274)} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Donde se cancelan algunos polos con los ceros y se obtiene una función de transferencia de primer orden igual a:

$$G(s) = \frac{0.0001403}{(s + 0.1935)} \quad (5.28)$$

La cual tiene un error de estado estacionario igual al 99.927%, y un tiempo de asentamiento igual a 20.2 segundos

Entonces la respuesta al escalón unitario se puede observar en la figura 5.14.

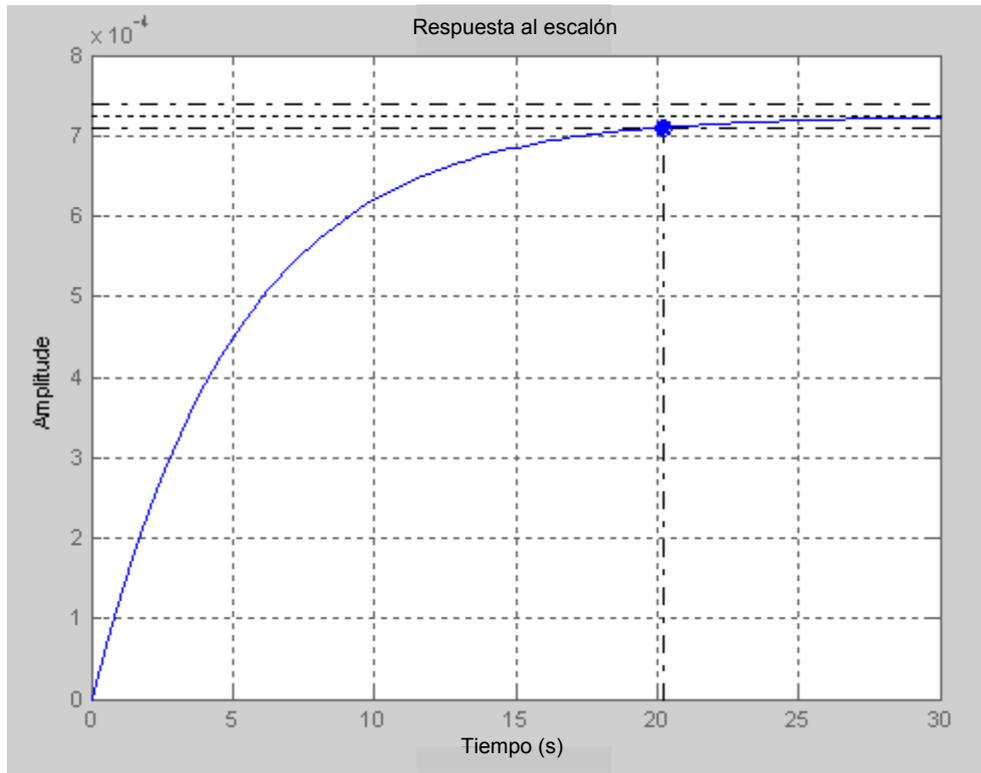


Figura 5. 14 Respuesta al escalón

5.2.6 Cálculo de los compensadores

Para poder controlar las condiciones de las cámaras de precalentado, esterilización y enfriamiento se deben diseñar unos compensadores que logren evitar variaciones en las temperaturas deseadas dentro de los tanques sin importar las perturbaciones que se introduzcan.

Para este caso las perturbaciones del sistema son las latas de leche evaporada, ya que estas entran dentro de los tanques a una tasa de 264 unidades por minuto, a una temperatura que varía entre 5 y 7°C, lo que causa un choque térmico en la temperatura dentro del tanque al iniciar la producción. Una vez que el movimiento de latas se ha estabilizado (esto es que dentro del tanque siempre hay cierta cantidad de latas) el ambiente dentro del tanque se mantiene más estable, por que el controlador no va a percibir cambios tan drásticos en la temperatura.

El controlador tiene que actuar lo más rápido que pueda ante este tipo de perturbaciones, así que se procedió a realizar dos tipos de compensadores: uno es un controlador digital de respuesta de orden 1, y el otro es un compensador PID.

5.2.6.1 Regulador en función del tiempo

El modelo matemático de la planta térmica es un sistema de orden 1. Esto significa que solo tiene un polo, como se observa en la figura 5.15.

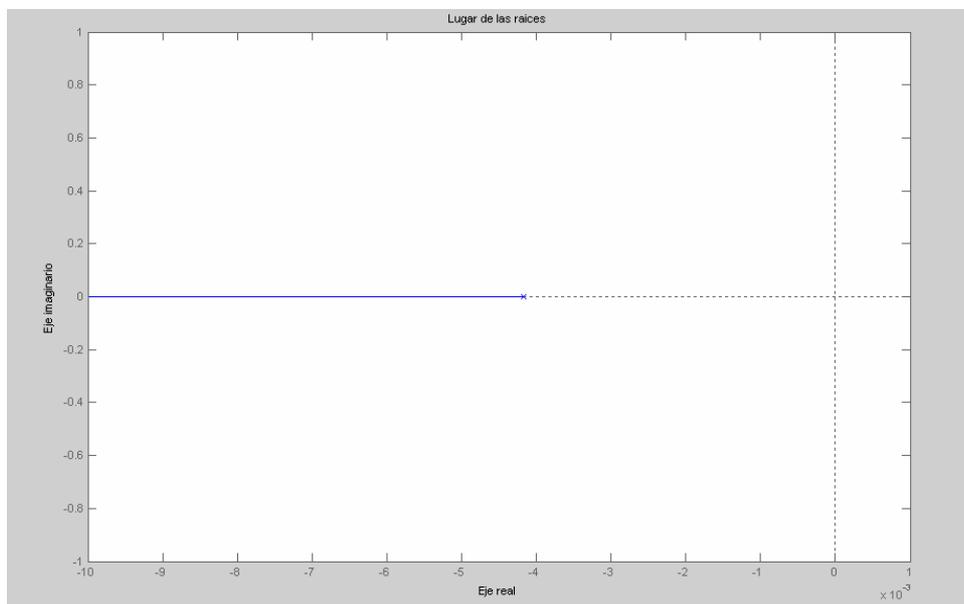


Figura 5. 15 Lugar de las raíces de la planta

Los métodos de cálculo de compensadores en el tiempo trabajan bien en sistemas de segundo orden. Como este sistema es de primer orden, lo que hay que hacer es aproximarlos a un sistema de segundo orden. Una de las características que se quiere es que el error de estado estacionario sea igual a 0. Para esto se aplica un regulador PI, que es un compensador de atraso con un polo exactamente en cero.

La expresión característica de un compensador de atraso se puede observar en la ecuación 5.29.

$$K_{PI} = \frac{(s - z_0)}{(s - p_0)} \quad (5.29)$$

Donde el cero es mayor que el polo en magnitud. Como se quiere error de estado estacionario, el polo (p_0) se hace igual a cero. De esta manera se convierte el sistema en uno de segundo orden cuya función de transferencia es igual a:

$$G(s)K_{PI}(s) = \frac{0.00015443}{s(s + 0.0041667)} \quad (5.30)$$

Esto causa que la respuesta sea inestable con un sobreimpulso de un 60% y un tiempo de estabilización de 1840 segundos. Pero se eliminó el error de estado estacionario por completo, lo cual se puede observar en la figura 5.16. El siguiente paso es calcular un regulador de adelanto que logre controlar el sobreimpulso y mejore el tiempo de estabilización de la planta.

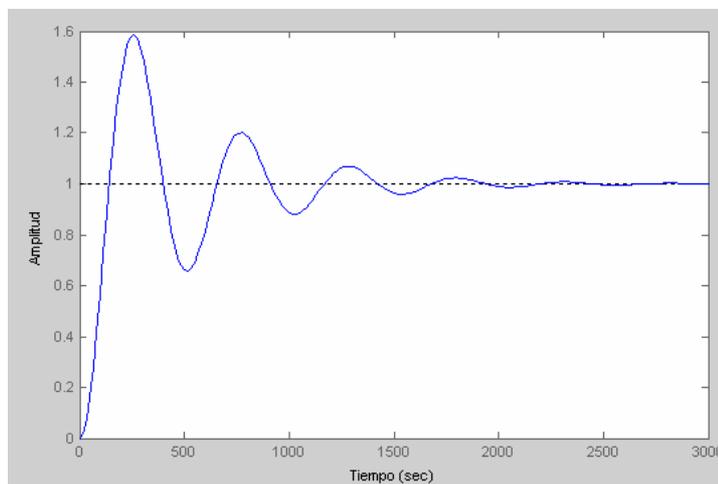


Figura 5. 16. Respuesta de la planta con el regulador de atraso

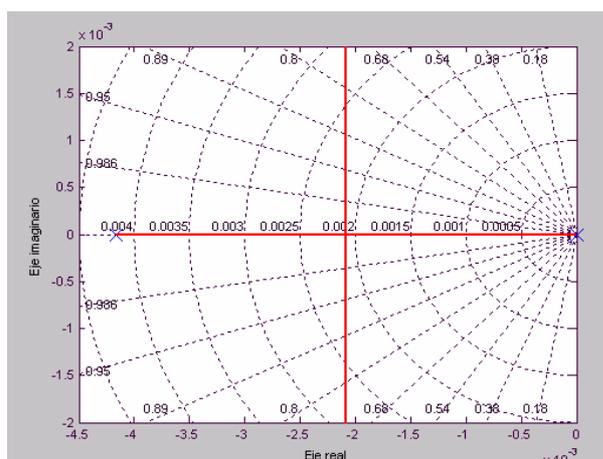


Figura 5. 17 Lugar de las raíces de la planta con el regulador atraso

Se va a tomar como ejemplo el diseño del regulador con un sobreimpulso del 2% y un tiempo de estabilización de 1200 segundos, al 5%.

Se obtiene el valor del coeficiente de amortiguamiento (ξ) y el valor de la frecuencia natural no amortiguada (ω_n) con las ecuaciones 5.31 y 5.32, respectivamente.

$$M = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (5.31)$$

$$t_{5\%} = \frac{3}{\omega_n \xi} \quad (5.32)$$

Se vuelve a graficar el lugar de las raíces con las restricciones, como se muestra en la figura 5.18, y se selecciona el punto de intersección entre las curvas (las líneas de color verde en la figura). En este caso, el punto es $-2.35 \times 10^{-3} + 1.75 \times 10^{-3}j$.

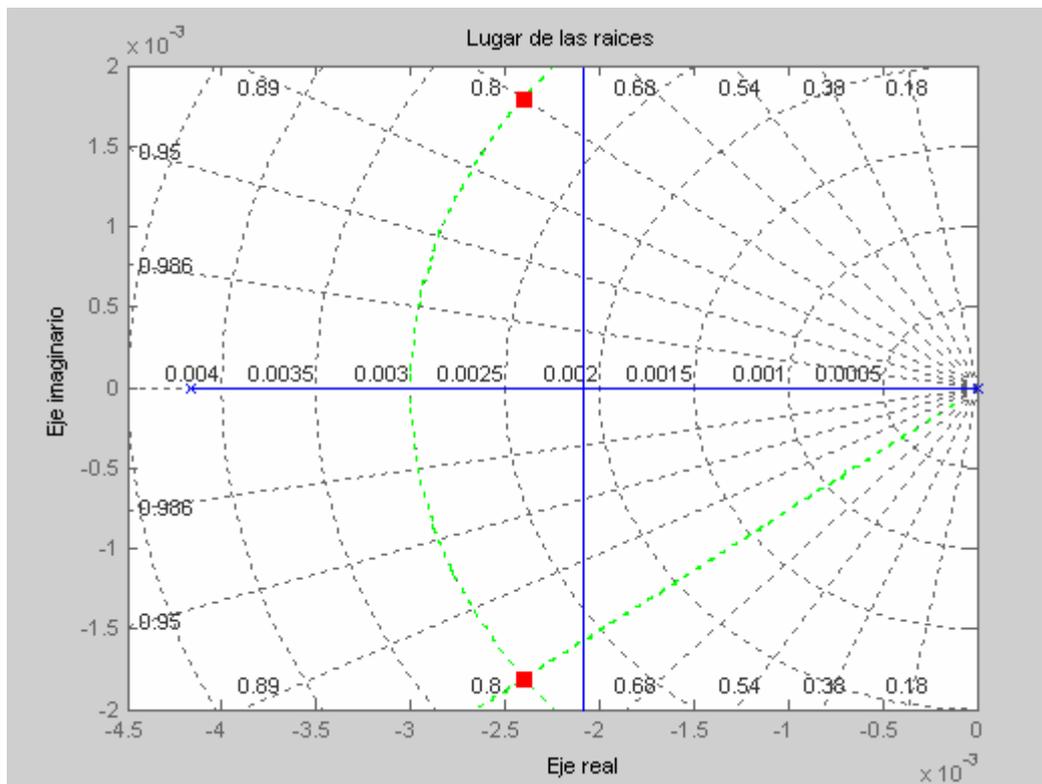


Figura 5. 18 Método gráfico para calcular el punto por donde deben encontrarse los polos de lazo cerrado.

Ahora se aproxima el cero y el polo del regulador por medio de las ecuaciones 5.33 y 5.34. Donde Φ es el ángulo que falta para alcanzar 180.

$$z_0 = -|s_1| \frac{\cos(\frac{\theta + \phi}{2})}{\cos(\frac{\theta - \phi}{2})} \quad (5.33)$$

$$p_0 = -|s_1| \frac{\cos(\frac{\theta - \phi}{2})}{\cos(\frac{\theta + \phi}{2})} \quad (5.34)$$

$$K_C = K \frac{s + 0.00250306}{s + 0.002509} \quad (5.35)$$

Se procede a calcular la ganancia por medio de la fórmula:

$$K = \left| \frac{1}{G(s)|_{s=s_1}} \right| \quad (5.36)$$

$$K = 0.04775$$

El nuevo lugar de las raíces se puede observar en la figura 5.19 y la ecuación del compensador es igual a:

$$K_C = 0.04775 \frac{s + 0.00250306}{s + 0.002509} \quad (5.37)$$

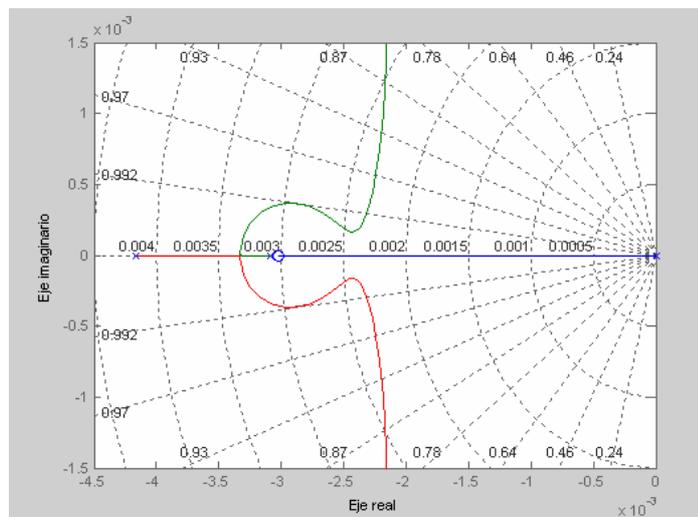


Figura 5. 19 Lugar de las raíces aplicando el Regulador de adelanto y atraso

El regulador completo que se tiene que aplicar a la planta es igual al que se muestra en la ecuación 5.38. Este tiene una respuesta como la que se muestra en la figura 5.20.

$$\frac{0.00015443(0.004775)(s + 0.0025306)}{s(s + 0.0041667)(s + 0.00259)} \quad (5.38)$$

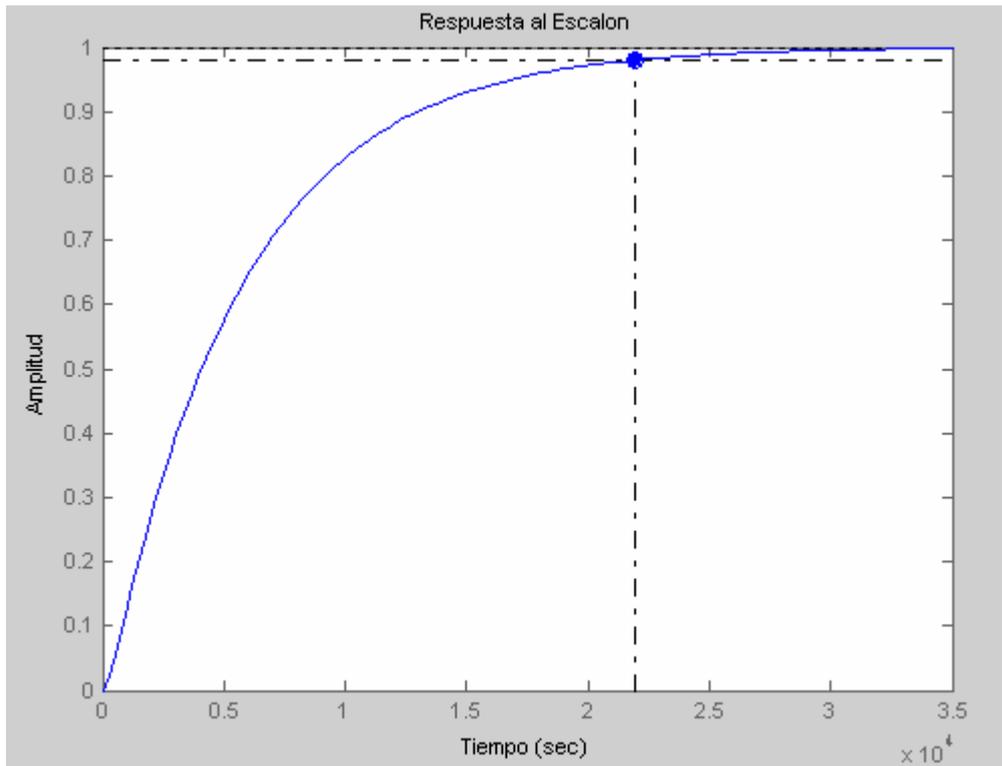


Figura 5. 20 Respuesta al escalón de la ecuación de la planta regulada

Si se quiere utilizar este compensador, se tiene que discretizar y después obtener la ecuación de diferencias para poder programarlo en el PLC. Así que es mejor utilizar los métodos de compensadores discretos para calcular el compensador que se tiene que programar en el PLC.

5.2.6.2 Compensador PID

A la hora de diseñar un compensador se quiere que cumpla ciertos requisitos para que mantenga las condiciones deseadas a pesar de las perturbaciones que entren en el sistema. Con este fin se realizan cálculos matemáticos que predicen

el comportamiento de la planta para que puedan ser controlados por un circuito electrónico una computadora digital.

El control PID es el sistema de control más utilizado en la industria por sus diferentes aplicaciones a todos los sistemas, ya que este es muy fácil de operar y elimina el error de estado estacionario. Además, la respuesta de este compensador es rápida. Este tipo de compensador aplica una señal al proceso que es una combinación proporcional, integral y derivativa de la señal de actuación¹⁹. En la figura 5.21 se muestra un diagrama de bloques de un sistema con compensación PID.

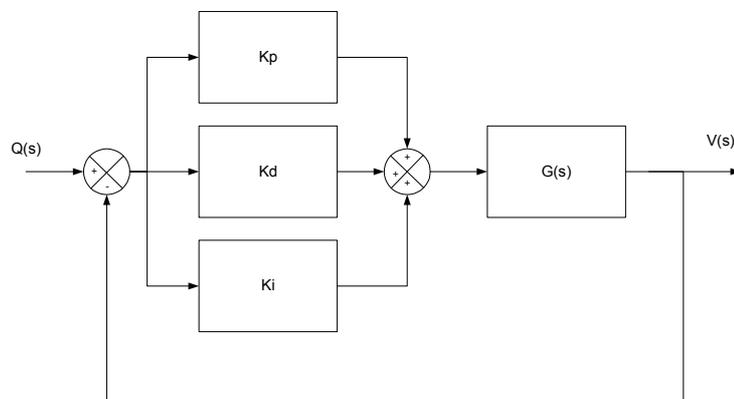


Figura 5. 21 Diagrama de bloques del sistema compensado con un PID

La ecuación que se aplica a la planta es como se muestra en la ecuación 5.39. Lo que queda es buscar las constantes para que el sistema quede compensado.

$$G_{PID} = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (5.39)$$

Como el sistema es de orden 1, hace que el cálculo de las constantes sea mucho más sencillo, ya que no tiene problemas de sobreamortiguamiento o sobreimpulso (véase figura 5.14).

Una de las características deseables es que el error de estado estacionario sea igual a 0. Para esto se utiliza un regulador PI, que consiste en agregar un cero y polo, como se muestra en la ecuación 5.40.

¹⁹ Kuo B., Sistemas de Control Automático; 7ed, pag. 669

$$K_{PI} = \frac{K_p(s - z_0)}{(s - p_0)} = \frac{K_p(s - \frac{K_I}{K_p})}{(s - p_0)} \quad (5.40)$$

De aquí se pueden obtener las constantes K_I y K_p del PID. Como se quiere error de estado estacionario, el polo (p_0) se hace igual a cero y su función de transferencia es igual a:

$$G(s)K_{PI}(s) = \frac{0.00015443K_p(s - \frac{K_I}{K_p})}{s(s + 0.0041667)} = \frac{0.00015443K_p}{s(s + 0.0041667)} \quad (5.41)$$

El valor de K_I/K_p se escoge que sea menor al polo original (0.004167) ya que el lugar de las raíces se puede aproximar a la función sin este cero. Por ejemplo, si se toma un valor de $K_p=1$ esto hace que la respuesta sea como la que se observó en la figura 5.16.

Para obtener un valor de K_p que cumpla con el sobre impulso deseado se obtiene la función característica de la ecuación 5.41, que se muestra en la ecuación 5.42.

$$s^2 + (0.0041667 + 0.00015443K_p)s + 0.00015443K_I \quad (5.42)$$

Se vuelven a tomar las condiciones para calcular el regulador un sobreimpulso del 2% y un tiempo de estabilización de 5% de 1200 segundos. Y se calcula un valor para la K_p .

$$(0.0041667 + 0.00015443K_p) = 2\omega_n\xi \quad (5.43)$$

$$K_p = \frac{0.005 - 0.0041667}{0.00015443} = 5.396$$

Como el valor de K_I/K_p tiene que ser menor a 0.004167 se toma el valor de 0.004, lo que da un valor igual a $K_I= 0.02248$. En la figura 5.22 se muestra la respuesta al escalón aplicando este compensador PI.

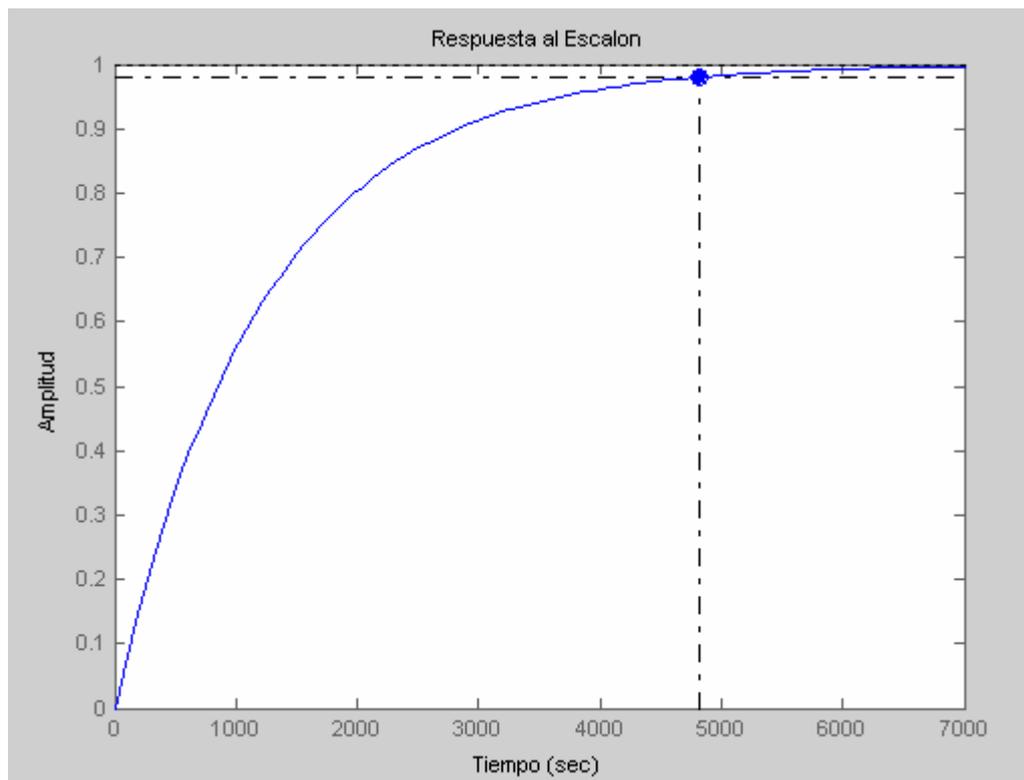


Figura 5. 22 Respuesta al escalón con $K_I=0.022$ y $K_P=5.39$

En el análisis de resultados se van a observar los diferentes comportamientos del sistema para tener una mejor respuesta de velocidad, cuando se varían estas constantes.

Ya que el sistema es de orden 1, este no tiene sobreimpulso que se quiera regular. Además dado que la velocidad de levantamiento no es tan crítica no es necesario calcular el compensador PD, ya que con solo la parte proporcional e integral basta para controlar las temperaturas del sistema, como se va a observar en el análisis de resultados. El PLC Allen Bradley tiene una función interna que genera el PID ya digitalizado, al que solo se le tienen que poner las constantes proporcional, derivativa e integradora, y él realiza los cálculos necesarios para responder.

El uso del PID es la solución más utilizada en la Industria debido a su facilidad de aplicación, ya que para ajustar un PID se puede realizar por el método de Ziegler-Nichols con el fin de obtener las constantes e ir ajustándolas hasta que se tenga la mejor respuesta.

5.2.6.3 Compensador digital de respuesta de orden 1

Como el dispositivo electrónico que va a controlar el sistema es un sistema digital, se puede utilizar un controlador digital o discretizado al cual se realiza una ecuación que se programa en el PLC para que controle la planta.

Lo primero que se tiene que hacer es discretizar el modelo matemático de la planta. En las ecuaciones 5.5 y 5.18 se tenían las expresiones en función de s para las diferentes cámaras de temperatura (estas se repiten por conveniencia).

$$G(s) = \frac{1}{C_{TH}} \frac{1}{s + 1/\tau} \quad (5.5)$$

$$G(s) = \frac{V(s)}{Q(s)} = \frac{0.00015443}{s + 0.0041667} \quad (5.18)$$

Se le aplica el método de retenedor de orden 0 (ZOH) para discretizar esta función de transferencia. Así que:

$$G(z) = (1 - z^{-1})Z\left\{\frac{G(s)}{s}\right\} \quad (5.44)$$

$$G(z) = (1 - z^{-1})Z\left\{\frac{1}{C_{TH}s(s + 1/\tau)}\right\}$$

$$G(z) = (1 - z^{-1}) \frac{\tau}{C_{TH}} \frac{1 - e^{-T/\tau}}{(z - 1)(z - e^{-T/\tau})}$$

$$G(z) = \frac{\tau}{C_{TH}} \frac{(1 - e^{-T/\tau})z^{-1}}{(1 - e^{-T/\tau}z^{-1})} \quad (5.45)$$

Donde T es el periodo de muestreo de la señal. Se recomienda que se tomen al menos 10 muestras en un periodo, para que la discretización sea lo más exacta posible. Para obtener ese valor se revisaron todos los periodos de las diferentes cámaras. Por ejemplo, el precalentador dura aproximadamente 20 minutos para llegar a su temperatura de operación, así que se tomó que el periodo de muestreo

tenía que ser menor a 120 segundos. Se revisó la cámara que llegaba más rápido a su temperatura, y fue la del enfriador, que dura 480 segundos para llegar a su temperatura de operación, así que se tomó el tiempo de muestreo menor a 48 segundos.

Lo que se quiere es hacer un mismo controlador digital para todos los lazos de PID que hay en la línea, ya que todas las cámaras tienen el mismo comportamiento estacionario. Se vio que las latas pasan a una tasa de 270 unidades por minuto, así entran una cada 0.22 segundo al tanque. Como ellas son las perturbaciones del sistema, este debe ser capaz de controlar la temperatura lo más rápido que se pueda, así que se decidió realizar el tiempo de muestreo cada vez que entra una lata a la cámara para estar seguros de que el cambio de temperatura se compense rápidamente.

Por lo que se escogió T igual a 0.22 segundos y la función de transferencia discretizada quedó igual a:

$$G(z) = \frac{3.395 \times 10^{-5}}{z - 0.9991} \quad (5.46)$$

Donde la respuesta se puede observar en la gráfica 5.23. En esta figura se graficaron las respuestas del sistema en tiempo continuo y en tiempo discreto. Como el tiempo de muestreo es tan breve, las gráficas son exactamente iguales, lo que es una ventaja para el sistema porque puede reaccionar más rápido ante cambios en el ambiente.

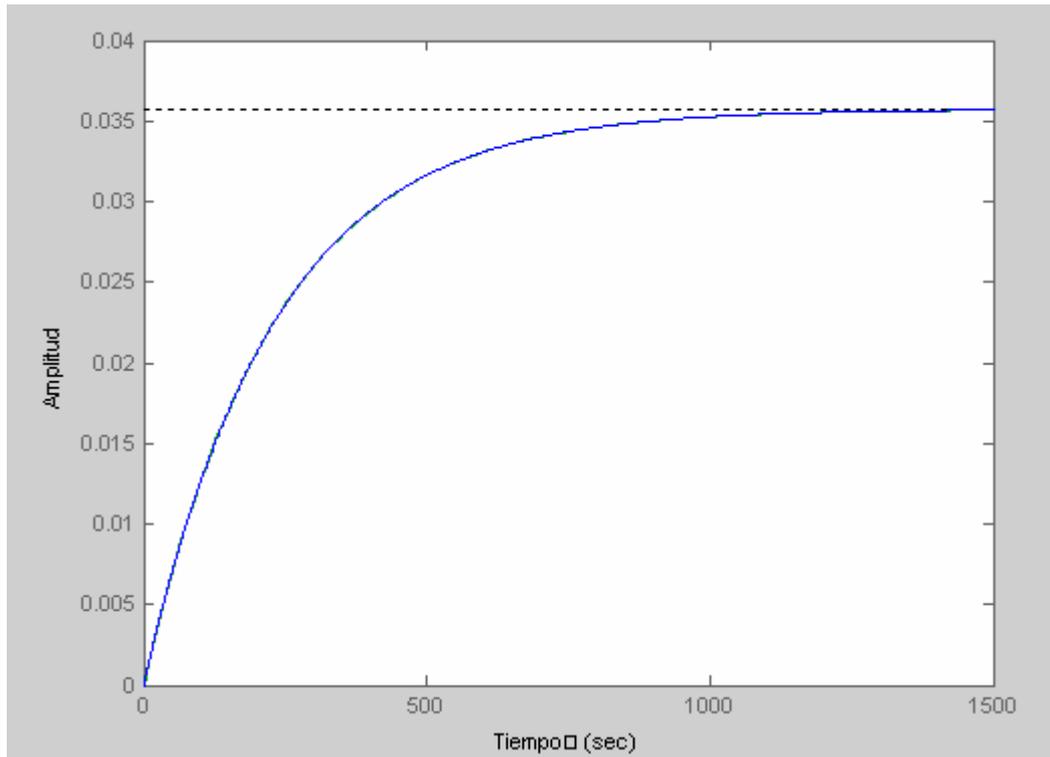


Figura 5. 23 Respuesta al escalón de la planta en tiempo continuo y tiempo discreto

Una vez que se tiene discretizada la planta se procede a realizar el cálculo del compensador. Se va a utilizar un compensador de respuesta de orden 1 debido a que este produce que la salida tenga un error de estado estacionario de orden 1.

El compensador se calcula con la fórmula 5.47.

$$K_z = \frac{A(z)}{B(z)} \frac{1 - e^{-T/\tau}}{(z - e^{-T/\tau}) - (1 - e^{-T/\tau})z^{-d}} \quad (5.47)$$

Donde A (z) es el denominador de la función de transferencia, B (z) es el numerador de la función de transferencia, T el tiempo de muestreo, y d el tiempo muerto de la planta (en este caso es 0).

Sustituyendo los valores en la ecuación se obtiene la expresión para el compensador digital:

$$K_z = \frac{53.9476(z - 0.9991)}{z - 1} \quad (5.48)$$

Y la respuesta al escalón de sistema se puede observar en la figura 5.24.

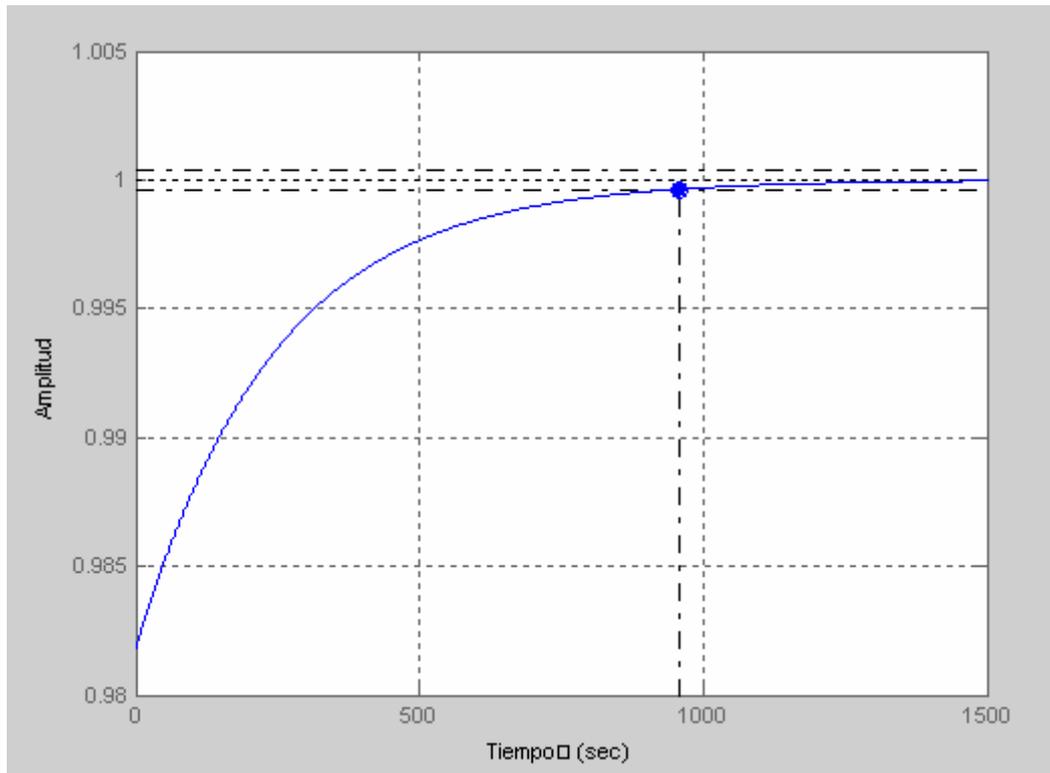


Figura 5. 24 Respuesta al escalón de la planta compensada discreta

Una vez que se ha calculado el compensador, se tiene que convertir el modelo discreto en una ecuación de diferencia para que pueda ser programado en un computador. Por lo que:

$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{53.9476(z - 0.9991)}{z - 1} \quad (5.49)$$

$$\begin{aligned} zM(z) - M(z) &= 53.9476zE(z) - 53.899E(z) \\ M(z) &= -53.899z^{-1}E(z) + 53.9476E(z) + z^{-1}M(z) \end{aligned} \quad (5.50)$$

Aplicando la transformada inversa Z, se obtiene la ecuación de diferencias que tiene que ser programada en el procesador para que funcione.

$$M(k) = -53.899E(k - 1) + 53.9476E(k) + M(k - 1) \quad (5.51)$$

Teniendo en cuenta que M (k) es la salida del compensador, y E (k) es la entrada, los valores que tienen k-1, son valores anteriores.

5.2.7 Seguridades

Las señales de seguridad son de suma importancia ya que estas son las que indican fallas en el sistema o en el proceso. Así se pueden activar señales de alarma y detener partes del proceso para poder solucionar el problema en el menor tiempo posible y deteniendo solo lo necesario para no retrasar la línea de producción.

Los módulos 1746-IA16 se van a utilizar para las entradas digitales del PLC. Estos son módulos con 16 entradas de 120VAC con colector abierto. Cada uno tiene dos bornes que se utilizan para el común de la señal, y en los demás bornes se ponen señales las señales digitales (120VAC para indicar un 1 digital y 0VAC para indicar un 0 digital).

Las primeras señales que se van a mencionar son las confirmaciones de los motores. Todos los contactores que se utilizan para arrancar los motores tienen la señal de confirmación o CNF que indica cuando el motor ya está en funcionamiento. Como se sabe, los contactores primero aplican un voltaje más bajo del voltaje de operación de los motores para que estos arranquen, evitando pérdidas en las líneas de alimentación por la corriente de arranque de los motores.

Una vez que el motor se encuentra a máxima potencia, el contactor activa un relé que indica que el motor ya arrancó. Si el motor no arranca en un tiempo determinado esta señal no se activa, lo que indica la existencia de algún problema ya sea en el motor o en algún otro dispositivo. Los 14 motores tienen su propia señal de confirmación. El motor 3 que está controlado por el variador, también tiene una señal de confirmación, que la genera el mismo variador.

Existe un botón para JOG del motor del precalentador (M3). Consiste en un dispositivo que pone a funcionar mientras permanezca presionado. Este tipo de señal se utiliza para probar o darle mantenimiento al motor.

En todo el proceso de esterilización se tienen diferentes microinterruptores, normalmente abiertos, que indican cuando se ha atascado una lata. En la figura 5.25 se pueden observar cuáles son estos lugares críticos donde se pueden

atascar las latas. Son un total de 11 interruptores que indican cuando se atascó la lata.

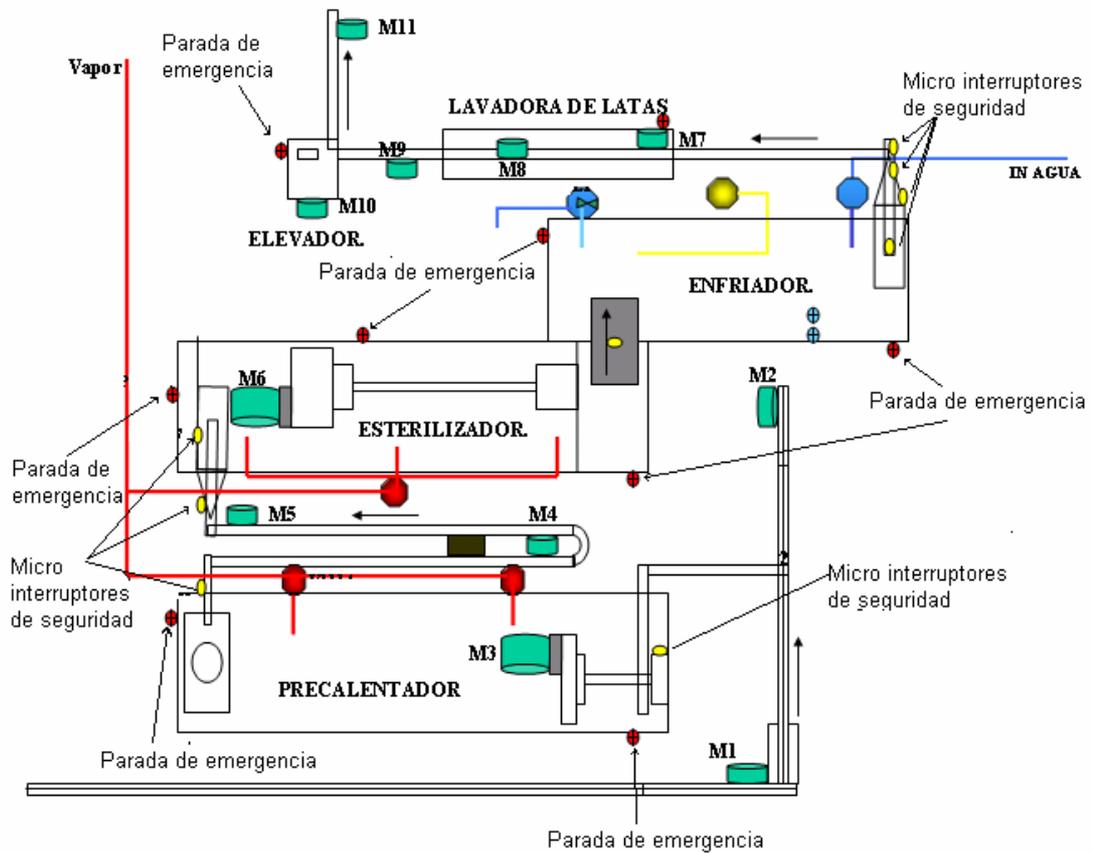


Figura 5. 25 Diagrama de distribución de la planta

También se tienen dos sensores de proximidad de inducción. Estos se utilizan para ver si se están acumulando las latas a la salida del precalentador o a la entrada de la esterilizadora.

Como ya se mencionó, se tienen diferentes paradas de emergencia en todo el proceso que permiten detener parte o todo el proceso en caso de emergencia. Son un total de 7 botoneras normalmente cerradas. Porque se activan sólo para desconectar la alimentación de las líneas en caso de la emergencia.

El enfriador tiene unos sensores de nivel de agua. Estos indicadores son interruptores que se activan cuando el tanque está vacío o lleno. Si el depósito esta vacío, el sensor de vacío se activa. Mientras tenga agua el sensor está desactivado. En el momento que se llena y el sensor de nivel alto se activa. Estas

señales se utilizan para controlar una válvula de llenado del tanque de agua y así mantener esta con agua para su operación.

5.3 Descripción del software

En los proyectos de automatización industrial es de suma importancia la programación del sistema que va a manejar los equipos, en este caso el PLC. Para poder realizar esta programación se necesita tener un conocimiento total del sistema y todas sus características tanto eléctricas como mecánicas.

Igual de importante que poder controlar los motores y poder monitorear los sensores de forma automática, es realizar una interfaz gráfica que permita al controlador o supervisor observar el funcionamiento de la planta, o atender algún problema en el proceso lo más fácil y rápido posible.

Así que la programación se divide en dos partes. Una es la programación del PLC, para que controle automáticamente el funcionamiento de la planta; otra es la programación gráfica.

5.3.1 Programación PLC

Lo que se quiere es que el PLC pueda realizar la secuencia de operación del sistema como se realiza manualmente. Este programa tiene que ser capaz de trabajar en forma automática, manual o estar listo para mantenimiento.

En la forma manual todos los arranques de motores o las temperaturas de las cámaras las pueden realizar el personal desde el panel de operador. Así que si se quiere ajustar la temperatura de una de las cámaras, el encargado solo tiene que ir al panel de operador (interfaz gráfica) y cambiar la temperatura de la cámara, o encender y apagar los motores que se quiera. Este modo de operación no debería utilizarse, pero se tiene como una forma de prevención para el caso que el modo automático no esté funcionando correctamente.

El modo de mantenimiento se utiliza cuando se realiza una revisión de los equipos de la línea de producción, por ejemplo motores, sensores, bandas, cámaras, etc. Este modo lo que hace es que bloquea todos los motores y los sensores para evitar algún accidente mientras se realiza la inspección.

El modo automático hace la secuencia de operación de forma autónoma, esto es que el sistema se inicializa en automático y comienza la producción. Por supuesto, hay que considerar muchas variables para que este sistema pueda imitar el funcionamiento de forma manual. En la figura 5.26 se puede observar un diagrama de flujo explicando la secuencia básica del proceso.

En el momento que se presiona el botón de arranque (en el panel de operador) el sistema comienza a buscar las condiciones del proceso. Primero verifica que el suministro eléctrico sea el adecuado para operación; verifica el relé de monitoreo de la fuente de poder en corriente alterna. Si este está abierto (posición normal) indica que hay una falla en el fluido eléctrico así que activa una alarma de error en el panel de operador que, al igual que el PLC, trabaja bajo la protección de una UPS.

El segundo paso que se realiza es verificar que las presiones en las tuberías de vapor, aire y agua estén correctas. Estas presiones deben estar en 40psi la línea de vapor; 45psi en la tubería de agua y en un rango entre 85 y 100psi para la tubería de aire comprimido. Estas variables son solo de monitoreo ya que no se controlan, pero cuando una de estas presiones no esté correcta se tiene que activar una señal de alarma que indique que la tubería está en problemas. Además, no permite que la secuencia continúe, en su etapa de inicialización, ya que una vez que el proceso haya arrancado este no puede ser detenido por una falla de estas, sino que solo se activan las alarmas respectivas

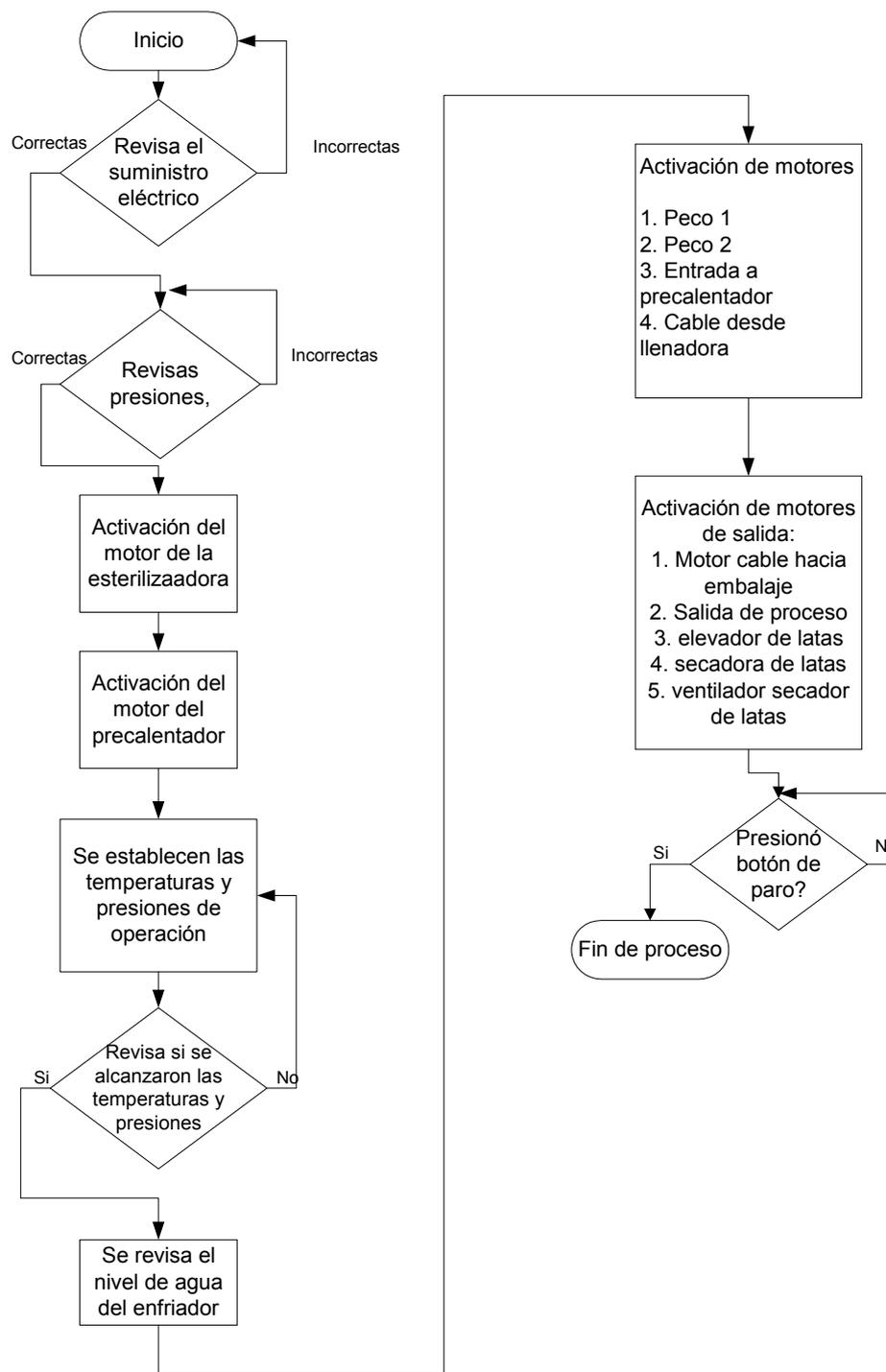


Figura 5. 26 Diagrama de flujo de la secuencia básica del proceso

En esta etapa también se revisan las seguridades, esto son los micro-interruptores que detectan cuando una lata se atasca en el proceso. Aquí se hace un barrido para revisar que ninguno de los sensores esté activo (estos permanecen normalmente cerrados). Si se da el caso de que haya un interruptor abierto, inmediatamente se activan las señales de alarma en el panel de operador, indicando cuál fue el interruptor que se abrió.

El siguiente paso es activar el motor principal, o el motor de la esterilizadora, seguido del motor del precalentador. Para poder establecer las temperaturas estos dos motores deben estar activados, ya que ellos afectan la temperatura dentro del tanque. Una vez que se da la confirmación de los motores, comienza el proceso de estabilización de las temperaturas dentro de los tanques.

Estas temperaturas deben ajustarse a los valores mostrados en la tabla 5.2. Los cambios en la temperatura se deben registrar en el panel de operador, y se pueden visualizar por medio de gráficas.

Tabla 5. 2 Tabla de temperaturas de las cámaras del proceso

Posición del sensor	Temperatura (°C)
Medio del precalentador	70
Salida del precalentador	96
Esterilizadora	117.6
Entrada del enfriador	80
Salida del enfriador	34

Para revisar el nivel de agua del enfriador se tienen también tres sensores de nivel que indican si el tanque está en nivel bajo, nivel normal o en nivel alto (estos interruptores permanecen normalmente abiertos). Si está en nivel alto cierra la

válvula de agua fría y se abre la válvula de drenaje, y por el contrario si está en el nivel bajo abre la válvula de agua fría y cierra la de drenaje (un lazo de histéresis). Cuando está en nivel normal, las dos válvulas se encuentran cerradas.

Una vez que se realizan los pasos anteriores y se tienen las condiciones de operación, comienza el proceso de producción. Con este fin se activan los motores de entrada y de salida al sistema. Los motores se tienen que encender de uno en uno para evitar picos o caídas en las líneas de alimentación cuando se da la confirmación de un motor se procede a encender el próximo.

Primero se activan los motores que están antes de la esterilizadora: Motor del Peco 2, Peco 1, entrada al precalentador y cable de llenadora. Y por último entran los que están después de la esterilizadora: motor de cable hacia embalaje, elevador, transporte secador y ventilador. Esto se realiza de esta manera para aprovechar tiempo, ya que para cuando se están activando los motores de salida ya estén entrando latas a la esterilizadora. La secuencia de encendido se muestra en la figura 5.27.

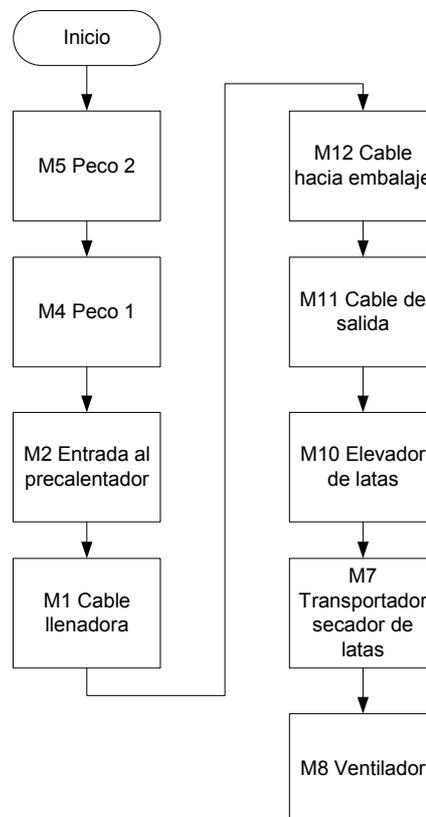


Figura 5. 27 Secuencia de activación de motores de sistema

El sistema tiene que mantener las condiciones mencionadas hasta que se de un paro de producción. Este paro puede ser programado o de emergencia, caso en el cual se genera mediante un botón en el panel de operador. En este caso se detienen todos los motores y se cierran todas las válvulas.

La secuencia antes descrita muestra el funcionamiento en condiciones normales, pero se pueden dar fallas en el proceso como por ejemplo que se atasque una lata, que un motor falle, o que haya una falla en el fluido eléctrico.

Si se atasca una lata, dependiendo del lugar se tienen que apagar ciertos motores del sistema para que no se amontonen otras. Así que el motor de la esterilizadora se apaga cuando se atasca una lata ya sea a la salida del precalentador, a la entrada del esterilizador, en el elevador, entre la esterilizadora y el enfriador o a la salida del enfriador.

Al apagarse el motor de la esterilizadora se tienen que apagar los motores que se encuentran antes de esta: Peco 2, Peco1, Precalentador, Entrada precalentador y cable de llenadora. Así no se amontonan las latas antes del fallo, pero las que ya pasaron la esterilizadora pueden continuar su camino hacia el embalaje, reduciendo los tiempos muertos de la planta.

Si se da un atascamiento en el elevador se apagan todos los motores que están antes de este: transporte secador de latas, esterilizadora, y todos los motores de entrada.

De la misma manera, si se da una falla en uno de los motores se tienen que apagar todos los motores que se encuentren antes de este. Por ejemplo si se da una falla en el precalentador, se tienen que apagar los motores de entrada al precalentador y cable de llenadora, para así evitar que se acumulen latas y continúe el proceso que no está en falla.

Hay varios paros de emergencia en la planta. Por ejemplo hay dos para el precalentador y 5 para la esterilizadora. Al igual que los procedimientos anteriores, si se para el motor de la esterilizadora se tienen que detener los motores que se encuentran antes de esta.

En el caso que falte el fluido eléctrico, se tiene una UPS que permite mantener funcionando los equipos de control (PLC, sensores, válvulas, panel de operador, etc.). Con esto se garantiza que las temperaturas se mantengan mientras regresa el fluido, y no haya que volver a realizar todo el procedimiento de inicialización de la planta.

Si se da la falla eléctrica se activa un BIT de fallo que hace que el sistema esté detenido completamente aún cuando el fluido regrese, manteniendo las condiciones de operación. Hasta que se presione un botón de reinicio en el panel de operador el sistema comienza de nuevo. Cuando se presiona este botón se tiene que comenzar por encender el motor principal M6, y después continuar con la secuencia antes mencionada. Esta secuencia no puede durar más de 60 segundos.

Si el sistema se encuentra en modo mantenimiento, todos los motores se encuentran bloqueados, con excepción del motor del precalentador que solo se puede activar con el modo JOG. Este modo es un sistema donde el motor se mueve a una velocidad baja, establecida por el operador, para realizar pruebas. El motor solo se va a mover si se tiene el botón presionado; en el momento que el botón se suelta el motor se detiene.

El lenguaje de programación que se utiliza es el RSLogix500 de Allen Bradley, que es programación tipo escalera. A efecto de tener un programa ordenado se realizan varios procedimientos para cada una de las funciones del sistema. En la figura 5.28 se muestra como están divididos estos procedimientos.

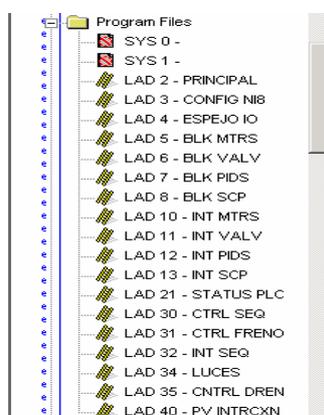


Figura 5. 28 Estructura de procedimientos del programa

5.3.1.1 SYS0,SYS1, PRINCIPAL

Los dos primeros procedimientos son espacios de memoria reservada del PLC. El SYS0 contiene información de operación del controlador, como por ejemplo tipo de procesador, configuración de entradas y salidas, etc. SYS1 es memoria reservada del PLC y el tercer procedimiento se le llama PRINCIPAL, ya que es el que se encarga de llamar a todos las demás rutinas de trabajo.

5.3.1.2 CONFIG IO

Los módulos analógicos tienen que ser configurados para que funcionen correctamente. Esta configuración se realiza por medio de palabras que se encargan de decirle al módulo si son entradas de 4 a 20mA u otro tipo. También indican en que escala se van a procesar estos datos, estos pueden ser en formato del módulo estos es que 4mA equivale a un valor de la palabra de 3277 y 20mA es 16384. En la figura 5.29 se puede observar la pantalla de configuración.

Si se utilizan las unidades de ingeniería 4mA equivaldrían a un 4000 en la palabra y 20mA a 20000, que es más fácil de trabajar para realizar cálculos, por ejemplo temperaturas.

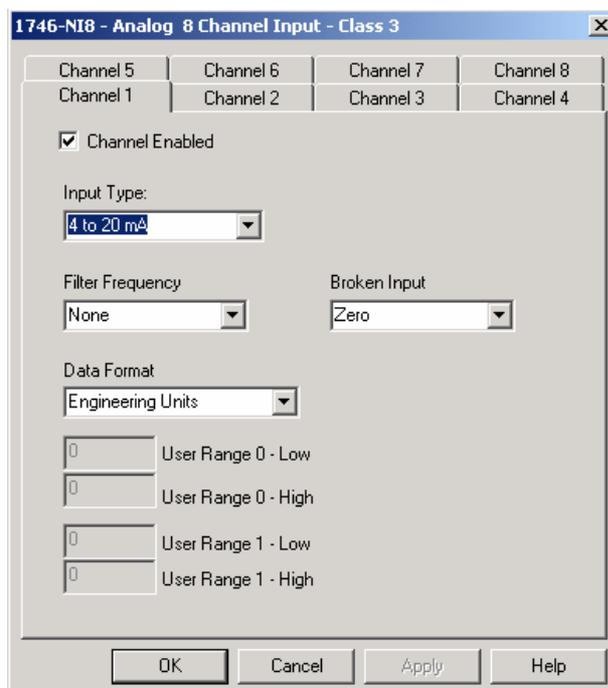


Figura 5. 29 Pantalla de configuración del módulo de entradas analógicas

5.3.1.3 ESPEJO IO

Con el tiempo se le hacen modificaciones o renovaciones al programa y al hardware de los sistemas, por lo que cambian las entradas y salidas de los sistemas. Por ejemplo si se realiza una ampliación a un módulo de entradas digitales, las entradas puede que no queden en los mismos sectores de memoria, así que una entrada que antes se encontraba en I3/3 ahora esta en la I4/2. Esto afecta en gran medida ya que se tendría que buscar por todo el programa donde se utiliza esta entrada y cambiarle su puntero de memoria para que el sistema funcione correctamente.

Para evitar este trabajo tan tedioso e innecesario se utiliza un procedimiento que se le llama Espejo IO. En este se asigna a bits de memoria todas las entradas y salidas digitales que tenga el sistema. Por ejemplo la entrada de confirmación del motor de Peco 1 se encuentra en la primera entrada del módulo analógico en el campo del Rack (Slot) 10, por lo que el programa la mapea en I10/1 y se le asigna el BIT de memoria B10.0/13.

Ahora en todo el programa se va a trabajar con el BIT B10.0/13 cuando se quiere revisar la confirmación del Peco 2, así que si eventualmente se cambia de posición la confirmación del Peco 2 a otro módulo, lo único que se tiene que modificar en el programa es la asignación al BIT dentro de este procedimiento.

5.3.1.4 BLK MTRS

El bloque de motores es una rutina que se utiliza para arrancar y parar los motores del sistema. Para arrancar un motor se tiene que enviar una señal al contactor que haga que este comience su arranque, primero se le induce una corriente menor a la corriente nominal del motor para evitar caídas de voltajes muy grandes en la líneas de alimentación, y una vez que el motor esté en movimiento el contactor envía una señal de confirmación para indicar que el motor ya esta con trabajando a plena carga.

Como medida de seguridad si en cierto tiempo no se recibe la señal de confirmación se tiene que indicar que el motor tiene algún problema y apagar la señal de funcionamiento del motor.

Cuando se crea este bloque se le asigna una palabra de control a cada uno de los motores que contiene información del estado del motor. La condición OK, este es un BIT que indica que el motor está listo para arrancar. La condición auto, indica el arranque del motor cuando el sistema se encuentra en modo automático; la condición Man_Start indica el arranque del motor cuando el sistema está en modo manual. El BIT de confirmación del motor (M1_CNF), etc. más adelante se detallará más sobre la estructura de memoria en el PLC.

En la figura 5.30 se muestra el diagrama de escalera de cómo está constituido este bloque.

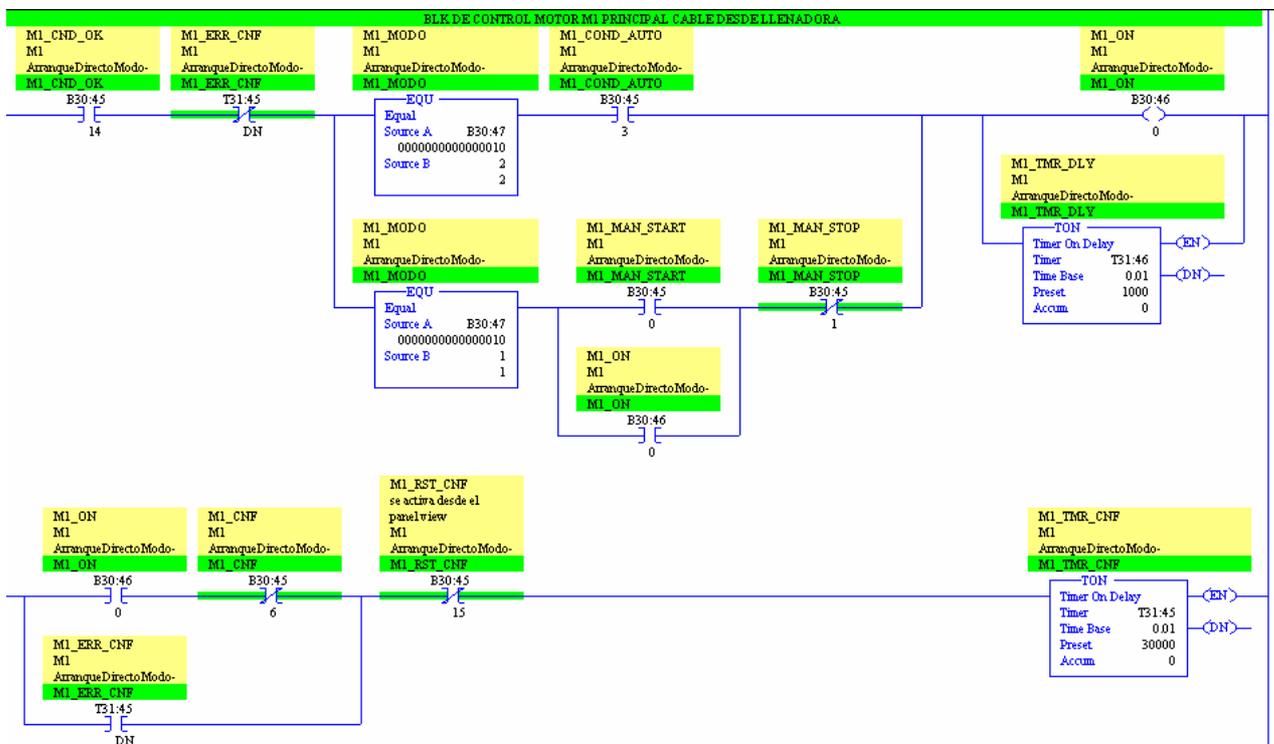


Figura 5. 30 Diagrama de escalera de bloque de motores

Cuando se da la condición OK del motor indica que el motor está listo para arrancar, ahora revisa que no se de la señal de error de confirmación. Después verifica el modo de operación del sistema (manual o automático). Si es automático revisa si ya es hora de que el motor arranque según la secuencia, y este envía la señal de arranque al contactor del motor. Si fuera el caso de que el modo de operación está manual revisa si el BIT de arranque está activado (este BIT se

activa desde el panel de operador por medio de un botón) o si ya el motor estaba arrancado (esto es para enclavar el sistema). Se tiene un temporizador para darle tiempo a que las señales se estabilicen, antes de mandar la señal de arranque al contactor.

Una vez que el contactor comience a funcionar se activa un temporizador para esperar la señal de confirmación por parte del motor; esta es la siguiente línea del programa. Mientras no se de la señal de confirmación el temporizador sigue contando, cuando este llega al tiempo programado se activa la señal de “Done” que es el BIT de error de confirmación. Este BIT desactiva el renglón de activación del motor (renglón anterior) y la señal de arranque se apaga. Si la señal de confirmación llega antes de que el temporizador termine, este renglón se desactiva y este deja de contar, por lo que no se da la señal de “Done”.

Este procedimiento de motor se aplica para todos los motores del sistema, con esto se puede tener control del motor y saber cuando fallan.

5.3.1.5 BLK VALV

Para las válvulas de dos posiciones también se tiene un procedimiento de control. Este tipo de válvulas solo abren o cierran completamente con una señal; si está activa deja pasar aire a la válvula lo que hace que deje pasar el fluido en la tubería, si la señal se desactiva no deja pasar aire y esta vuelve a su posición normal. En la figura 5.31 se puede apreciar el diagrama de escalera. Se tiene una condición OK que establece que ya está lista para abrir, se revisa si está en modo automático o manual y con todo esto se activa la válvula.

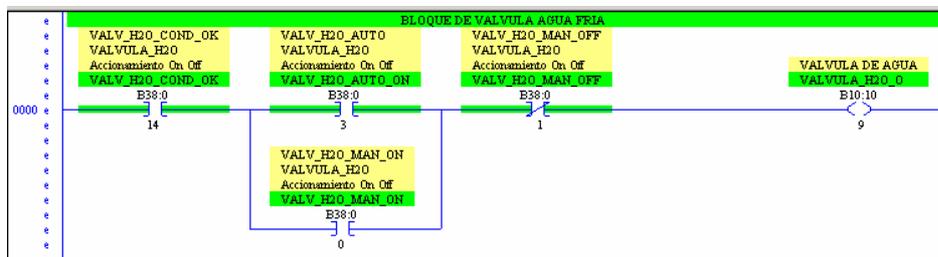


Figura 5. 31 Diagrama de escalera del control de una valvula ON-OFF

5.3.1.6 BLK PIDS

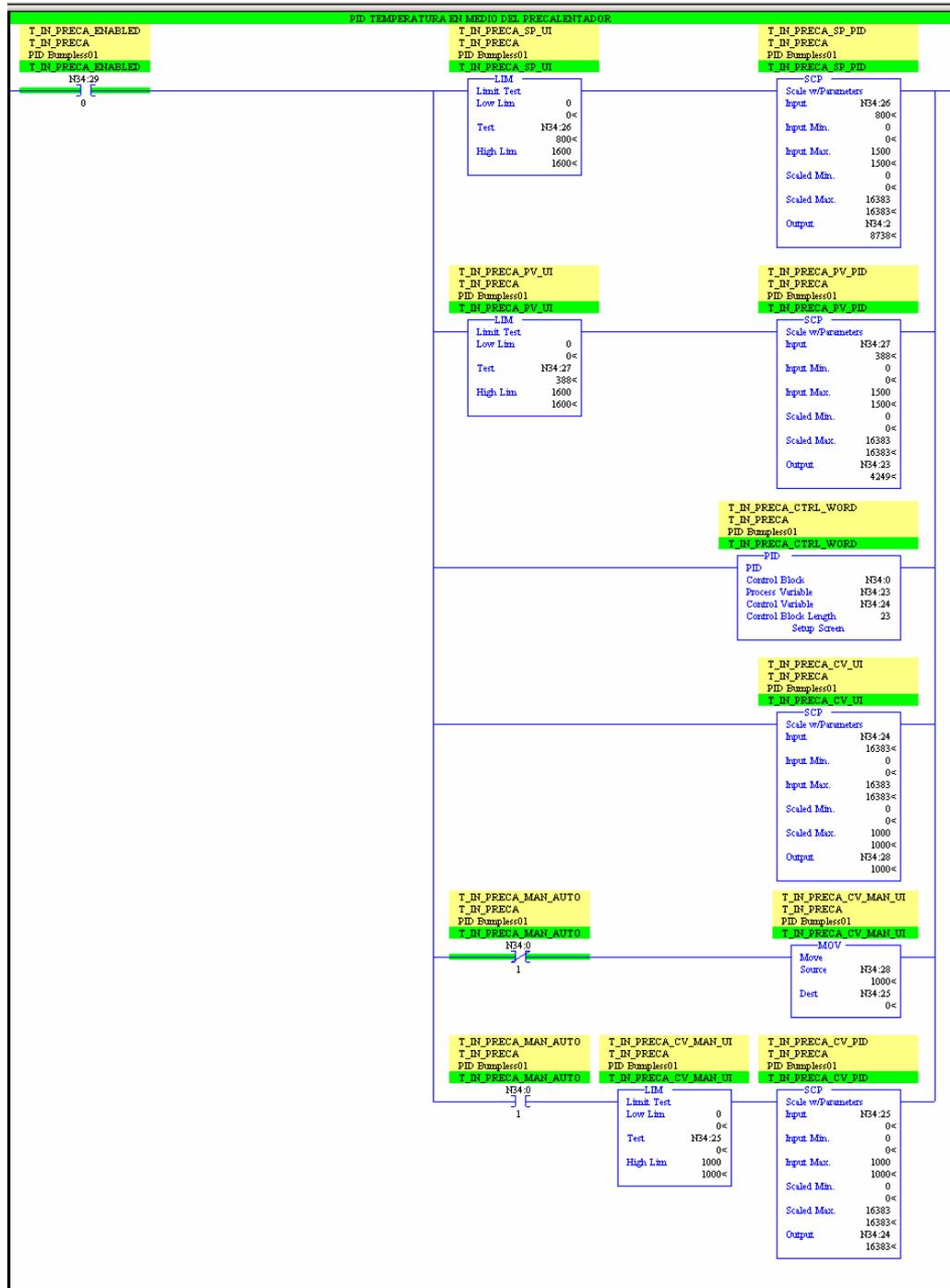


Figura 5. 32 Diagrama de escalera de bloque de PIDs

El procedimiento, que se muestra en la figura 5.32, es el que se utiliza para controlar las temperaturas de las cámaras en la esterilizadora. Se utiliza un regulador PID que se encarga de mantener las temperaturas estables a lo largo de la producción.

Lo primero que se realiza es revisar si el setpoint y la variable de proceso estén dentro del rango designado por el proceso. Después se escalan las variables para que se puedan procesar los datos por el PID.

Después se llama al bloque de PID, este bloque es donde se configura el modo de regulador que se quiere, las constantes derivativa, integral y proporcional, el tiempo de muestreo, la banda muerta, límites máximos y mínimos, etc. En la Figura 5.33 se muestra la pantalla de configuración de este regulador.

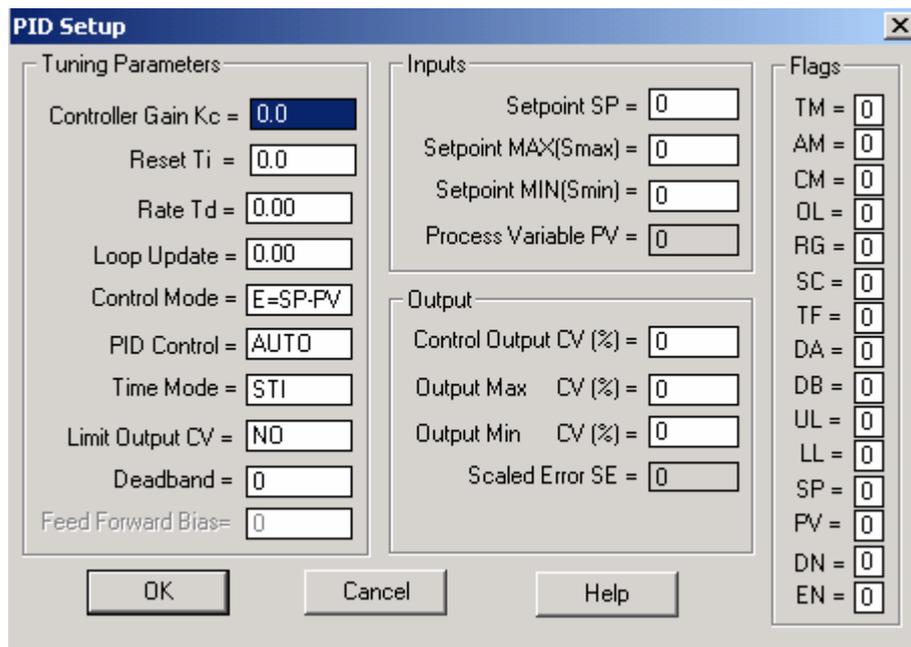


Figura 5. 33 Pantalla de configuración del bloque PID

Después de que se llama al bloque de PID, se escala la variable de control, para que se pueda desplegar en la pantalla de operador. El siguiente renglón revisa si el control de temperatura se encuentra en automático o manual. Si el control está en automático la variable de proceso se le asigna a la salida de la válvula proporcional. Si se encuentra en modo manual el valor de la variable de control se tiene que introducir desde el panel de operador, así que se revisa que esté dentro del rango entre 0 o 100% y se le asigna el valor a la salida de la válvula proporcional.

Para todos los controles de temperatura se utiliza este mismo procedimiento.

5.3.1.7 BLK SCP

El siguiente procedimiento es el BLK SCP, que es donde se escalan todas las variables físicas del sistema (temperaturas, presiones) que se transmiten en el protocolo de 4 a 20mA. Como ya se mencionó los módulos de entradas analógicas se tienen que configurar cuando se arranca el programa. Se tiene que especificar el formato en el que se quiere procesar los datos, si en formato del módulo o formato de ingeniería, escalado para PID, etc.

El que se utiliza en el programa es el escalamiento de ingeniería, donde 4mA equivale a un 4000 (decimal) y 20mA equivale a 20000 (decimal) en la palabra asignada. La ventaja de este formato es que es más fácil de visualizar a la hora de resolver problemas.

Para poder escalar estos datos se utiliza un bloque de escalamiento (ver figura 5.34) Por ejemplo los transmisores de temperatura están calibrados para transmitir 4mA a 0°C y 20mA a 150°C, así que estos son los datos que se utilizan para el escalamiento. En la entrada se pone la dirección de la palabra del sensor, en la entrada mínima y máxima se pone como se reciben los datos en este caso 4000 y 20000, en la escala mínima y máxima se ponen sus equivalentes ya escalados, en este caso 0 y 1500. Se utiliza 1500 para poder tomar en cuenta un decimal ya que la variable donde se guarda es un entero. Y en la salida se pone la dirección donde se quiere el valor escalado.



Figura 5. 34 Bloque de escalamiento

Estos escalamientos se utilizan para desplegar las temperaturas en la pantalla de operador y para poder activar las alarmas cuando no se está dentro del rango que se quiere²⁰.

5.3.1.8 INT MTRS

El procedimiento de interconexiones es donde se realizan todas las conexiones entre el panel de operador y sensores que afectan el funcionamiento de los motores. Por ejemplo el motor de la esterilizadora (M6), tiene una condición OK si no se da ningún atascamiento de latas en el proceso, y si no hay paros de emergencia. El BIT que indica que el motor se encuentra en automático se activa si se presiona el botón del automático desde el panel de operador. De la misma manera si se encuentra en modo manual y se arranca, o se detiene desde el panel de operador. En la figura 5.35 se puede observar un fragmento de este procedimiento de interconexiones.

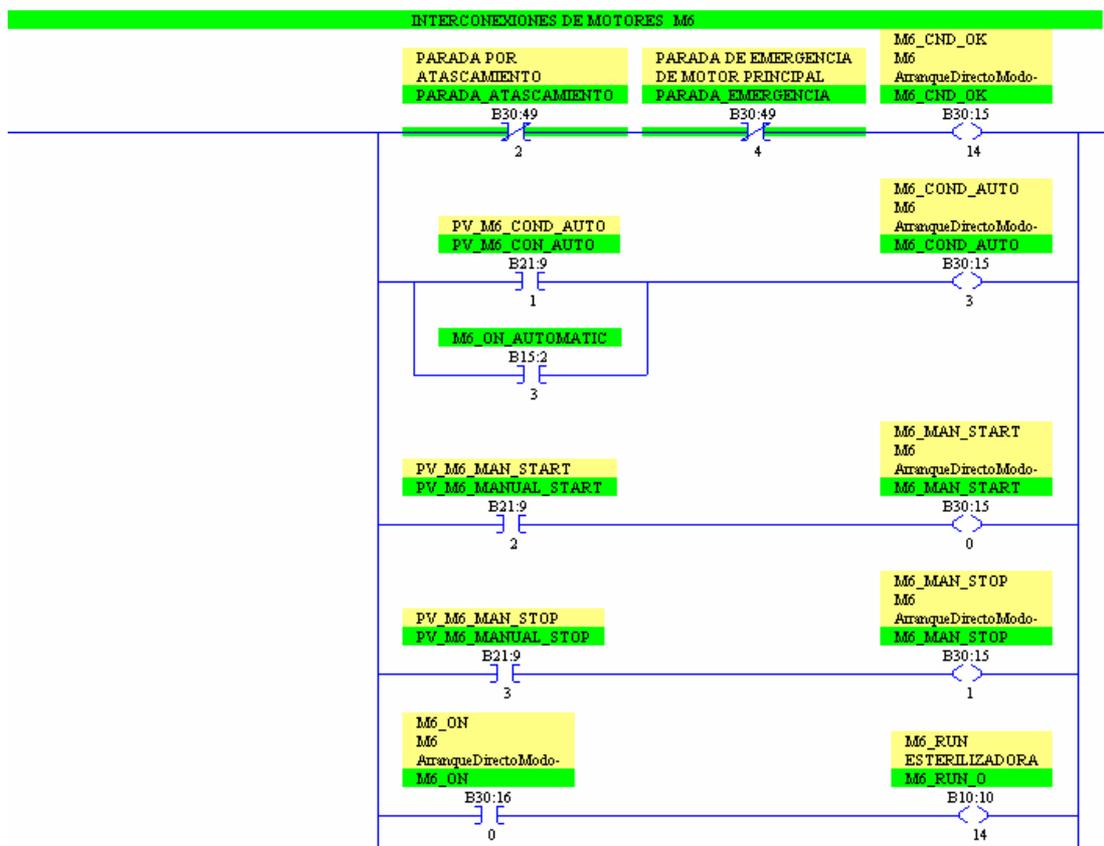


Figura 5. 35 Fragmento de programa del INT MTRS del motor 6

²⁰ Sobre las alarmas se hablara en la sección programación gráfica

Este procedimiento tiene la ventaja que cualquier condición que afecte uno de los motores se encuentra dentro de este procedimiento, así que es más fácil de revisar por problemas en el funcionamiento, o si se le quiere agregar otras condiciones.

5.3.1.9 INT VALV

Al igual que el procedimiento de interconexiones de motores, aquí se encuentra la lógica de funcionamiento de las válvulas que hay en el sistema. En la figura 5.36 se puede ver las interconexiones de la válvula de agua del enfriador.

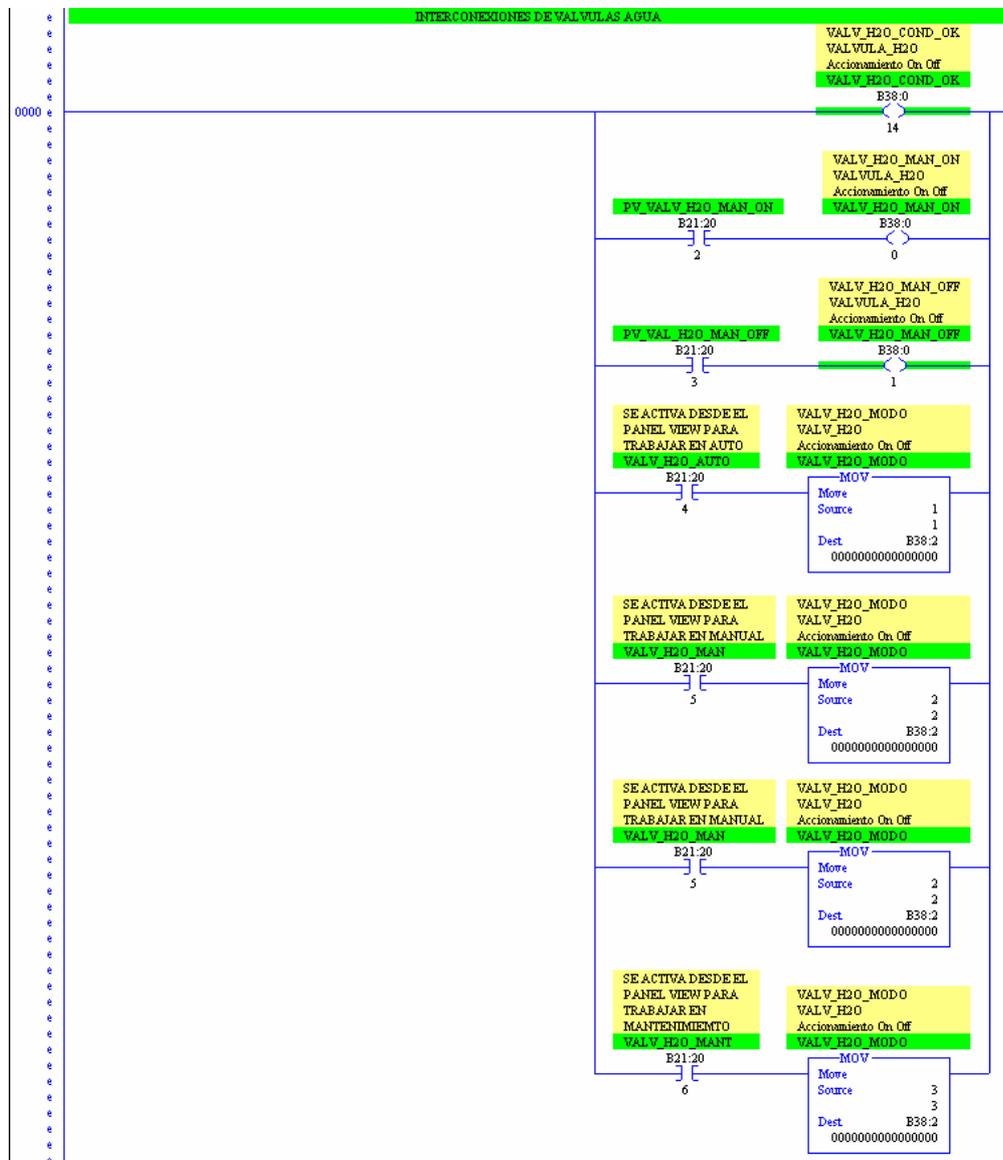


Figura 5. 36 Interconexiones de valvula de agua

5.3.1.10 INT PIDS

Las interconexiones de PIDs son las que se encargan de unir las variables del PID con el panel de operador, para que cuando se modifique el valor del setpoint, o de la variable de proceso o de la variable de control en el panel de operador sea modificado también en el programa, y así se pueda trabajar el sistema de control de temperaturas. En la figura 5.37 se puede observar las interconexiones entre el panel de operador y las variables que se ocupan para el PID. Esta lógica se utiliza para todos los reguladores PID del sistema.

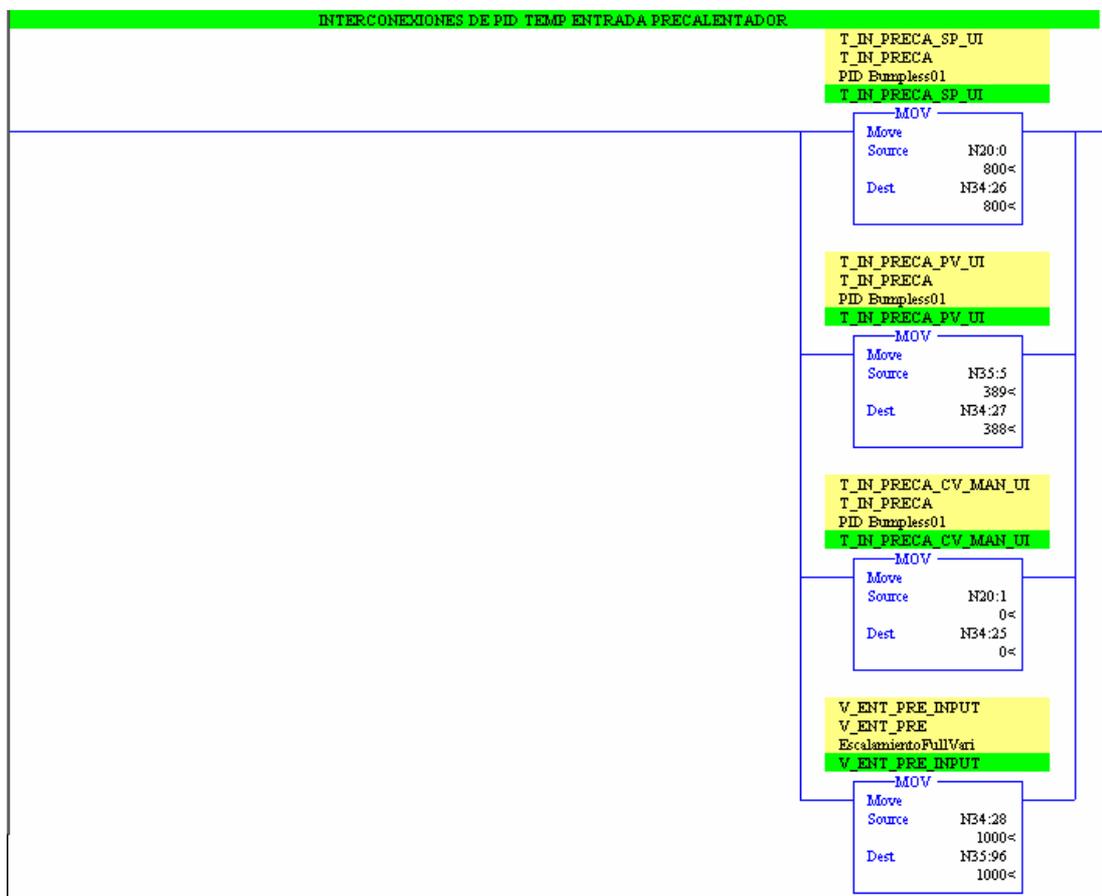


Figura 5. 37 Interconexiones para el PID de temperatura a la mitad del precalentador

5.3.1.11 INT SCP

Al igual que el procedimiento de Espejo IO, este se encarga de asignar las entradas analógicas a sectores de memoria dentro del PLC. De esta manera se puede trabajar dentro del programa con las variables de memoria y no con las

entradas directamente; si se da un cambio en las entradas analógicas solo se tiene que modificar este procedimiento para que el programa continúe funcionando correctamente.

5.3.1.12 STATUS PLC

En este procedimiento simplemente se realizan las interconexiones de banderas del sistema con el panel de operador, así de esta manera el operador puede darse cuenta si el PLC se encuentra en falla, o tiene batería baja, o si hubo un overflow en alguna operación aritmética.

5.3.1.13 CTRL SEQ

Este procedimiento es el que se encarga de realizar la secuencia automática del proceso. Cuando el sistema se ponga en modo automático y se presione el botón de inicio de proceso, el sistema tiene que establecer las condiciones de trabajo y empieza la secuencia de arranque de los motores. Primero se encienden los motores m6 y m3, después se establecen las temperaturas automáticamente. Una vez que las condiciones de operación sean las correctas, comienza la secuencia de encendido de los motores.

Primero se activan los motores de entrada y luego los de salida como se mencionó al principio de esta sección. Una vez que todo el proceso haya arrancado y ya estén entrando latas en la esterilizadora las temperaturas tienen que mantenerse constantes. Si se da algún problema en los motores, o se detiene la línea las temperaturas también deben de permanecer constantes.

Se tiene que tomar en cuenta las paradas de emergencia o los interruptores de atascamiento de latas para que automáticamente detenga los motores que sean necesarios para continuar la producción. La secuencia de funcionamiento se muestra en la figura 5.26 y la secuencia de encendido en la figura 5.27.

También es capaz de mantener las temperaturas si el fluido eléctrico falla esperando que se presione el botón de re-arranque. Y si se presiona el botón o se cumple el tiempo programado para el paro de producción este procedimiento realiza una secuencia de paro de motores, comenzando desde el motor1 hasta el motor12.

5.3.1.14 CTRL FRENO

Este procedimiento activa el freno neumático. Si se da algún atascamiento o algún paro de emergencia el motor de la esterilizadora tiene que detenerse, así que se activa el freno neumático.

5.3.1.15 INT SEQ

Aquí se realizan todas las interconexiones necesarias para el funcionamiento de la secuencia automática. Se verifican que las presiones y temperaturas estén dentro de los rangos requeridos y activen el BIT que habilita las secuencias en el procedimiento de CTRL SEQ.

Por ejemplo en la figura 5.38 se observa el renglón de programación que verifica que todas las temperaturas del sistema se encuentren a la temperatura de operación. Si este es el caso se activa el BIT de condiciones listas, este es una condición para que los motores de entrada y de salida puedan arrancar. Este BIT se tiene que activar cuando la línea está buscando condiciones, una vez que el proceso arranca se tiene que mantener activo hasta que se presione el botón de fin de proceso.

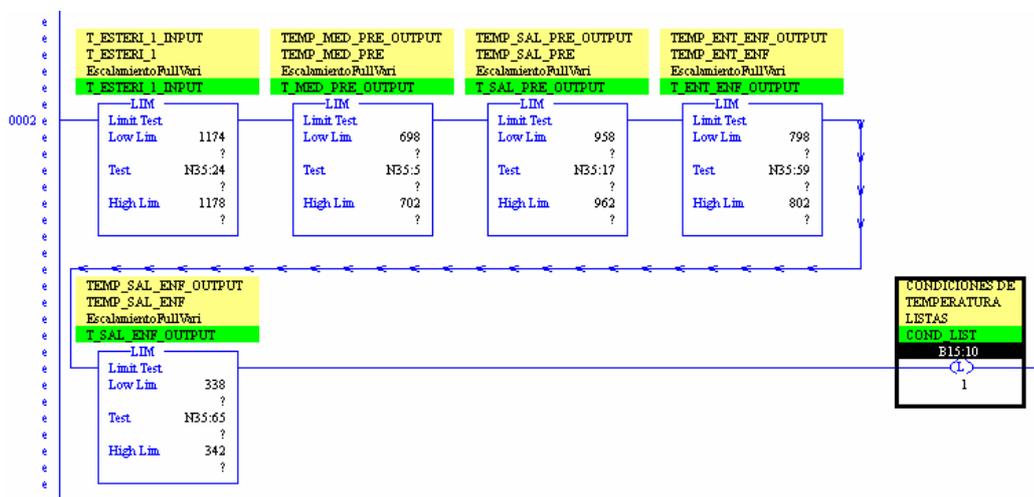


Figura 5. 38 Escalera donde se verifican que las temperaturas sean las correctas

Si se activa alguna parada de emergencia o un interruptor de atascamiento, también se activa una bandera que sirve para controlar los arranques y paros en la secuencia automática.

5.3.1.16 LUCES

Este procedimiento básicamente lo que realiza es revisar las condiciones de falla y si se da alguna activar las luces o las alarmas sonoras de seguridad del sistema. El sistema cuenta con un semáforo de 4 luces y una alarma sonora.

La luz roja indica que se dio una falla en el sistema, ya sea por atascamiento de lata, por paro de emergencia o por algún error de confirmación de algún motor. Esta se desactiva con un BIT de reset que proviene desde el panel de operador. Con la luz roja se enciende la alarma sonora.

La luz verde se da si el nivel del agua está bajo. Y la luz anaranjada indica si la temperatura en la esterilizadora no está dentro del rango que se requiere. Este rango puede ser variado desde el panel de operador por los supervisores de la planta según sean las condiciones de operación que ellos requieran. La luz amarilla indica que se dio una falla o se detuvo la llenadora de latas.

5.3.1.17 PV INTRCXXN

En este espacio del programa lo que se realiza son las interconexiones de las señales de alarma, sensores, confirmaciones de motores, etc. entre el PLC y el panel de operador. Por ejemplo en la figura 5.39 se muestra el enclavamiento para la señal de parada de emergencia #1 y de la parada de emergencia #2 del motor principal. Cuando se da esta señal en el panel de operador se tiene que mostrar mediante una animación que se presionó este botón de seguridad. La única manera de que este BIT se desactive es que se presione el botón de reset en el panel de operador, y así el sistema pueda continuar su funcionamiento.

Los bits que se utilizan para conectar con el panel de operador son los que se encuentran en el espacio de memoria N20 Y B21, de esto se hablará más adelante.

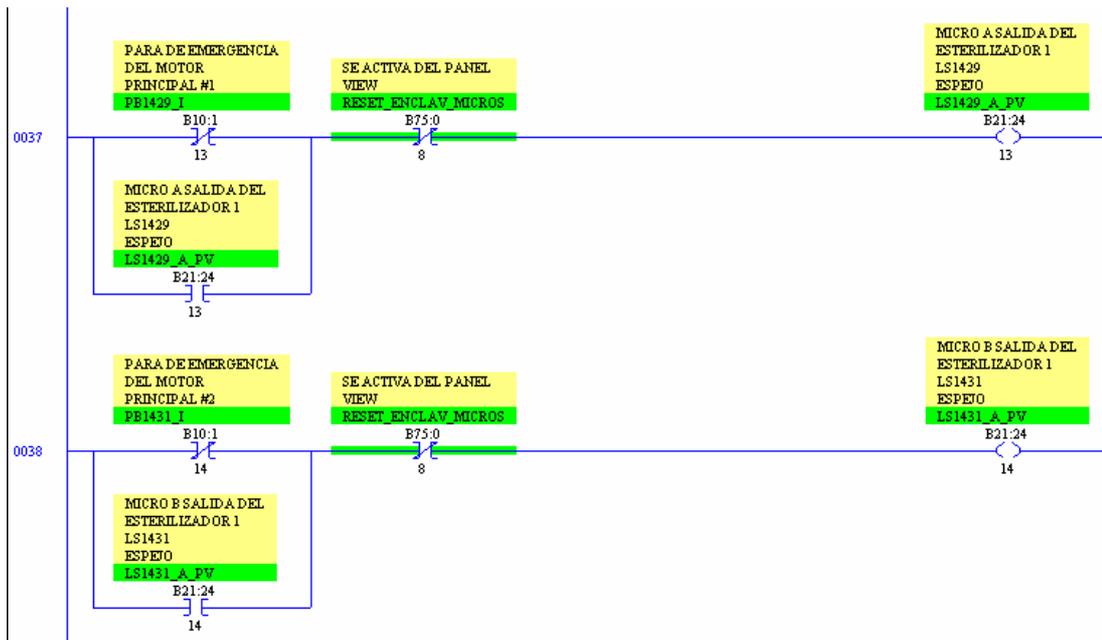


Figura 5. 39 Fragmento de interconexiones con el panel de operador

5.3.1.18 Manejo de memoria

La memoria interna del PLC está dividida en archivos de programa y archivos de datos; los archivos de programa son los procedimientos o subrutinas del sistema mientras que los archivos de datos es como se manejan las variables dentro del PLC.

Los tipos de archivos de datos se pueden observar en la tabla 5.3 donde los primeros 9 punteros son asignados automáticamente por el sistema, y todavía quedan 246 archivos para organizar la memoria.

Tabla 5. 3 División de archivos de datos en la memoria de un SLC500

Archivos definidos por el sistema			Archivos definidos por usuario		
Tipo de archivo	identificador	Número de archivo	Tipo de archivo	identificador	Número de archivo
Salidas	O	0	BIT	B	9-255
Entradas	I	1	Timer	T	
Estatus	S	2	Contadores	C	
Bit	B	3	Control	R	
Timer	T	4	Entero	N	
Contadores	C	5	Flotante	F	
Control	R	6	String	St	
Entero	N	7	ASCII	A	
Flotante	F	8			

Se pueden aprovechar los 246 archivos de datos disponibles de usuario para ordenar la memoria del PLC. La ventaja que se tiene es que cuando se crea un archivo nuevo se le puede asignar un nombre, así se puede dividir la memoria para diferentes usos y hace más fácil la visualización de esta.

De los archivos creados por el sistema que se tienen que utilizar están los de entradas, salidas y estatus ya que estos no se pueden crear en otro archivo nuevo. Los que son enteros, bits, contadores, flotantes se pueden crear en archivos nuevos con nombres más significativos para la aplicación.

En la figura 5.40 se puede observar como está organizada la memoria del programa. Se crea un archivo de números enteros (N9-CNF NI8) que se utiliza para la configuración de los módulos analógicos. El archivo B10-IO5 se utiliza para realizar los espejos de entradas y salidas digitales. El T14-TIMER DLY se

utiliza para el temporizador de encendido y apagado de los motores en modo automático.

B15-CTRL GNRL es el que contiene todos los bits de control del sistema, aquí se encuentran los bits de paro y arranque de sistema. Estos archivos al igual que los archivos N20 y B21 se utilizan para interconectar el PLC con el panel de operador. El N20-PV se utiliza para las variables analógicas que se van a mostrar en las interfaces gráficas (temperaturas, presiones, etc.). Y el B21-PV para todas las señales de alarmas y paros digitales.

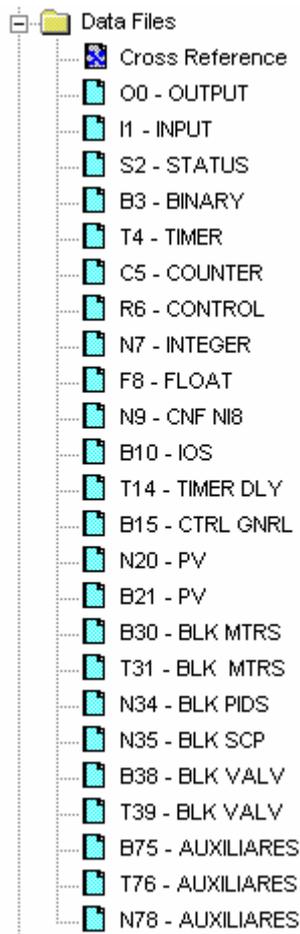


Figura 5. 40 Estructura de memoria del programa

El archivo B30-BLK MTRS se utiliza para todas las señales control de los motores. A cada motor se le asigna una palabra que contiene toda la información de su estado. En la tabla 5.4 se puede observar como está dividida la palabra de control. Con este método es más fácil a la hora de programar los arranques y paros de los motores ya que los bloques son iguales para todos los motores, solo cambia la dirección de la palabra.

Tabla 5. 4 Organización de palabra de control de un motor

Número de BIT	15	14	1	1	1	1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Información del motor	RST	CND								CNF			Cond		Man	Man
	CNF	OK											Auto		Stop	Start

También existe un archivo que se utiliza para los temporizadores de espera de confirmación de los motores, que se utilizan en la subrutina de arranque y paro de motores (BLK MTRS). Estos se encuentran en el archivo T31-BLK MTRS, y se reserva una palabra para cada uno de estos.

El N34-BLK PIDS se utiliza para almacenar las variables de los PIDS, como son la variable de proceso, el setpoint o la variable de proceso de cada uno de los reguladores. El N35-BLK SCP se utiliza para almacenar los escalamientos que se realizan a las variables analógicas.

B38-BLK VALV Y T39- BLK VALV son palabras reservadas para el control de las válvulas on-off y sus tiempos de operación. B75, T76, N77 son espacios de memoria auxiliares, para realizar pruebas.

5.3.2 Programación Gráfica

La idea de automatizar un proceso es mejorar la eficiencia y eficacia de la producción (mejorar tiempos, mayor control en los consumos de energía, más exactitud, etc.) y tener un control absoluto de lo que está sucediendo para poder solucionar los problemas que se presenten lo más rápido posible. Por esto es de

suma importancia el como se monitorea y controla el sistema; una interfaz gráfica donde se presenten todas las áreas críticas del sistema, todas sus bombas, válvulas, tanques, entre otras permite que el operador de la planta o los supervisores tenga mayor facilidad a la hora de resolver problemas en la producción.

Si el sistema funciona automáticamente, pero se da una falla en algún sector de la línea es más fácil que además de alarmas sonoras o lumínicas, se tenga un esquema gráfico que indique donde se dio esta falla. Además la ventaja de utilizar estos sistemas de interfaz es que la información se puede almacenar en bases de datos, o gráficos que permiten realizar un análisis de la eficiencia del sistema, y descubrir áreas que deben de ser mejoradas.

La programación gráfica consiste en animaciones que cambian de colores, se mueven o indican en una pantalla el comportamiento del sistema. El programa que se utiliza para realizar la programación es el RSView Studio de Rockwell Software. Así que se realizan las pantallas y asignando punteros de memoria del PLC a un panel de operador o una computadora estas se animan. A estos punteros se les llama TAGS de memoria y tienen que ser procesados para poder realizar las pantallas.

A la hora de utilizar este programa se tiene que tomar en cuenta que dependiendo de la licencia así es el número de TAGS que se permite dentro del panel de operador o la computadora. En este caso el cliente compró una licencia de 1500 TAGS por lo que hay que administrar bien la memoria para no pasarse de los TAGS permitidos.

Una forma de ahorrar TAGS es utilizando las palabras de control dentro del PLC así por ejemplo la palabra de los motores que se utiliza para revisar su estado (Activado, apagado, error), así que se le asigna a una palabra en el RSView, y dentro de las pantallas se realizan operaciones lógicas para utilizar solo los bits que necesarios para la animación.

La estructura que se utiliza para las pantallas es una pantalla de inicio que tiene opciones para ir a las otras pantallas tal y como se puede observar en la figura 5.41.



Figura 5. 41 Pantalla de inicio de panel de operador

En cada uno de los botones se muestra la tecla respectiva para llamar a las pantallas. La primera pantalla de login es donde se introduce la clave de usuario para que le de acceso a las demás pantallas. Cuando se quiere salir del sistema y bloquearlo se presiona el botón de logout, la única manera de que se pueda acceder a las pantallas es volviendo a introducir la clave.

Una vez que se introduzca la clave se puede navegar por las demás pantallas. La primera pantalla es la de proceso, esta muestra la pantalla de la línea de producción, como se ve en la figura 5.42. En esta pantalla se muestran todos los motores y las válvulas de planta; estos cambian de color según sea su estado: verde está activo, rojo está en alarma, azul claro está detenido. También se muestran las paradas de emergencia, cuando no están activas son de color verde y cuando se activan cambian a color rojo.

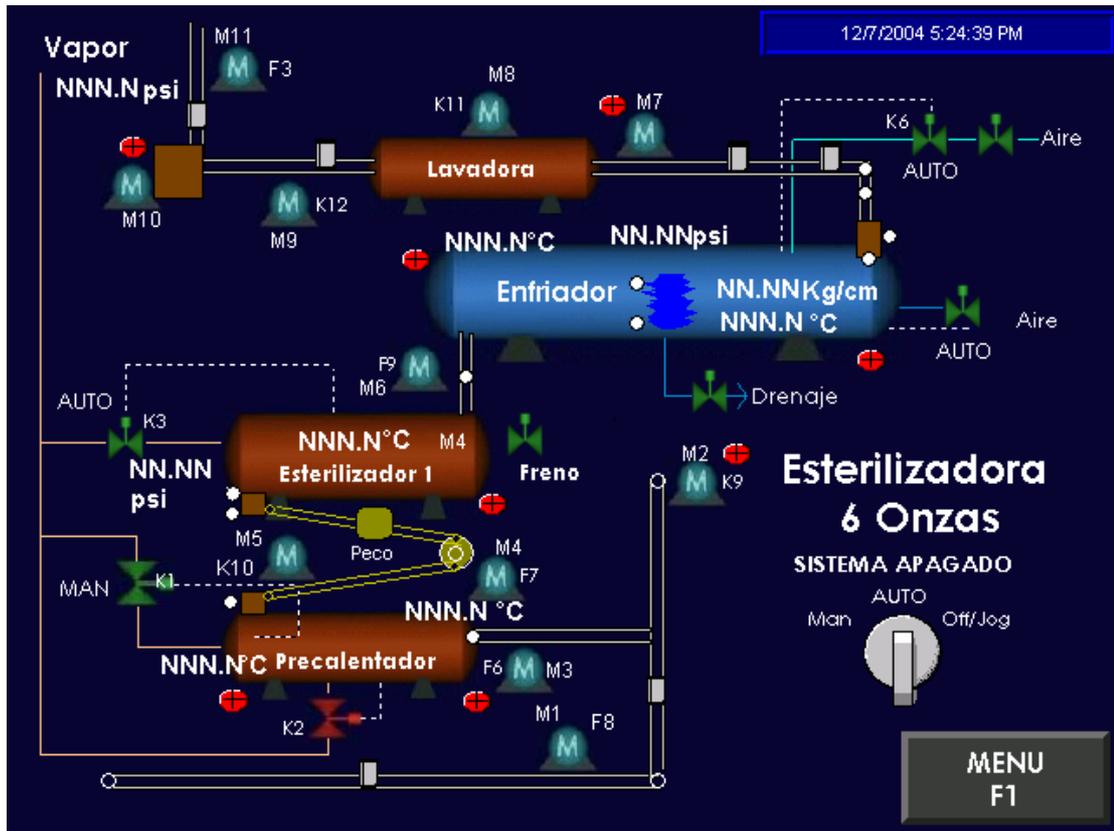


Figura 5. 42 Pantalla de la línea de producción

Los micro-interruptores de la línea son los puntos blancos que se muestran en la figura. Cuando no hay lata atascada están de color verdes, al activarse el sensor este cambia a color rojo. También se indican todas las temperaturas y presiones en las líneas, además se tiene una perilla que selecciona el modo de operación de la planta (automático, manual y apagado).

La leyenda que dice "SISTEMA APAGADO", cambia según sea el estado de la línea. Si se está iniciando y se están buscando las condiciones de trabajo esta lo indica, de igual forma cuando el proceso está en producción. Cuando el sistema entra en modo producción aparece un botón que detiene el proceso ("PARO DE PRODUCCION") al lado del botón de menú.



Figura 5. 43 Pantalla de variables analógicas

En la figura 5.43 se muestra la pantalla donde se muestran todas las temperaturas y presiones del sistema. Y la figura 5.44 muestra la pantalla que se utiliza para realizar los gráficos de las temperaturas.



Figura 5. 44 Pantalla de gráficos de tendencia de temperatura

Las otras pantallas que tiene el sistema son las que se encargan de manejar la velocidad del variador, de configurar los rangos de operación de las variables analógicas, de ver un detalle de las alarmas que se dan durante el proceso y el estado del PLC (batería baja, modo de operación, overflow, etc.).

Con el RsView Studio se pueden manejar los rangos de operación de las variables analógicas (temperaturas y presiones) y que detecte si está o no dentro de estos rangos. Por ejemplo en la temperatura del precalentador, el primer rango es de 117.4 a 117.8°C, si se pasa de este rango da una alarma leve, si no se encuentra entre 117.2 a 118°C, se tiene que dar una alarma de nivel medio y si se pasa de 117 a 118.2°C da una alarma de alto nivel.

Todas estas alarmas se van almacenando en una base de datos en el Panel de operador y se pueden ver una descripción de la alarma y en el momento que se dio. En la figura 5.45 se puede observar la pantalla de Alarmas.

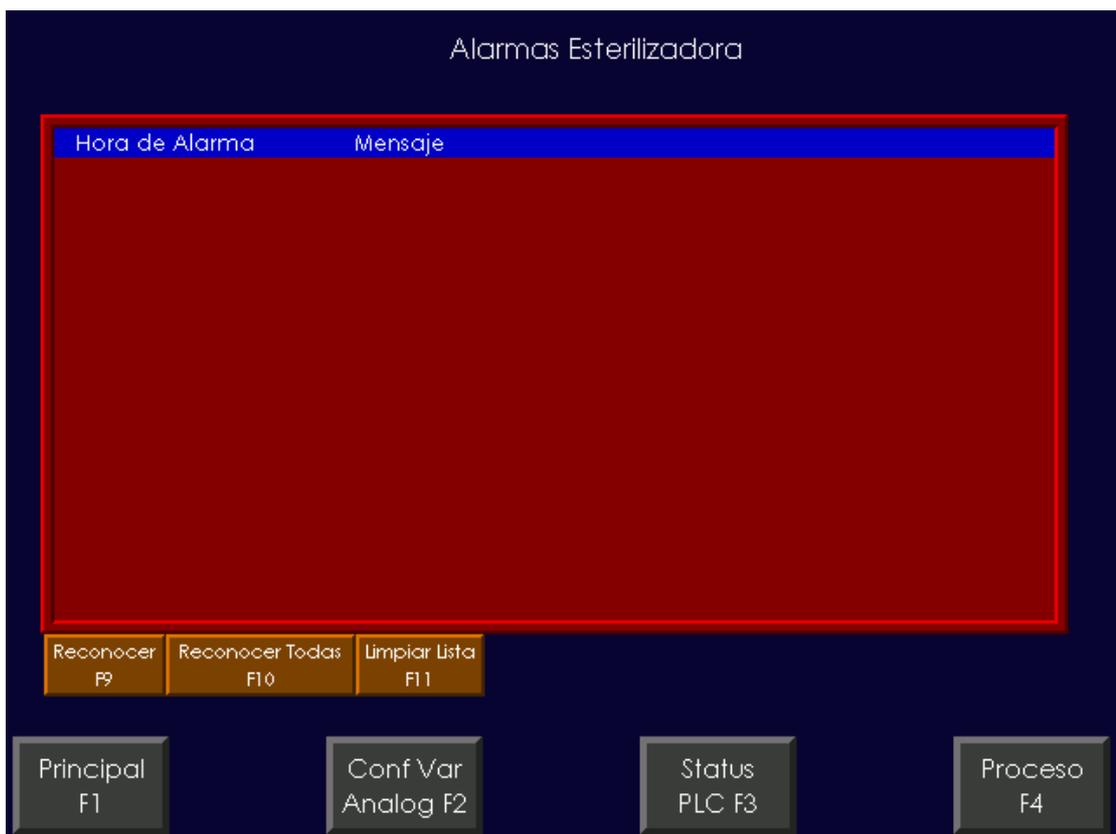


Figura 5. 45 Pantalla de Alarmas de la Esterilizadora

Cuando se da una alarma esta pantalla se despliega automáticamente, y el mensaje parpadea hasta que se reconozca, presionando el botón F9. En la pantalla de configuración de variables analógicas se pueden modificar los rangos según sean las directrices de producción.

Estos rangos se pueden programar dentro del RsView así se pueden evitar crear banderas dentro del PLC que indiquen cuando se dan estas alarmas, lo que se traduce en menos TAGS de memoria necesarios. Además los operadores o supervisores pueden modificar los rangos cuando sea necesario.

Para que las animaciones funcionen se tiene que realizar una base de datos dentro del RsView donde se especifique las direcciones de memoria dentro del PLC para cada una de las variables.

Tabla 5. 5 Fragmento de base de datos de TAGS que se utiliza en el RSView Studio

Tipo de variable	Archivo	Dirección
A	Variables_Analogicas\I_VAPOR_OUTPUT	::[esteril6]N35:11
A	Variables_Analogicas\T_SAL_ENF_OUTPUT	::[esteril6]N35:65
A	Variables_Analogicas\I_ENT_PRE_INPUT	::[esteril6]N35:96
A	Variables_Analogicas\I_H2O_FRIA_INPUT	::[esteril6]N35:138
A	Variables_Analogicas\I_P_ENF_INPUT	::[esteril6]N35:132
A	Variables_Analogicas\I_SAL_EST1_INPUT	::[esteril6]N35:108
A	Variables_Analogicas\I_SAL_EST2_INPUT	::[esteril6]N35:114
A	Variables_Analogicas\I_SAL_PRE_INPUT	::[esteril6]N35:102
A	Variables_Analogicas\I_VELOC_M1_INPUT	::[esteril6]N35:120
A	Variables_Analogicas\I_VELOC_M2_INPUT	::[esteril6]N35:126
D	sensores\LS1321	::[esteril6]B21:24/8
D	sensores\LS1323	::[esteril6]B21:24/9
D	sensores\LS1325	::[esteril6]B21:24/10
D	sensores\LS1327	::[esteril6]B21:24/11
D	sensores\LS1329	::[esteril6]B21:24/12
D	sensores\LS1331	::[esteril6]B21:24/13
D	sensores\LS1423	::[esteril6]B21:24/14

En la tabla 5.5 se puede observar una parte de la base de datos que se utiliza para direccionar los TAGS con los sectores de memoria dentro del PLC. Como se mencionó anteriormente las direcciones B21 se utilizaron para las variables digitales y las N35 para las variables analógicas. Así que la primer columna indica el tipo de dato (A para analógica y D para digital), la segunda es el archivo donde

se almacena el TAG, después una descripción y se tiene que indicar la dirección dentro del PLC, con el nodo o nombre del PLC. En la tabla también se tienen que especificar datos como el escalamiento, si tiene seguridad, si es una alarma, si es un TAG de memoria o del PLC, entre otros.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

6.1 Análisis de Hardware



Figura 6. 1 Foto del acabado final del gabinete

En la figura 6.1 se muestra el gabinete como se entregó a Nestlé Panamá. Este está dividido en dos partes, a la derecha se encuentra todo el sistema de control, y a la izquierda todo el equipo de potencia. Como se puede observar se tiene una manivela de seguridad, así que si se abre esta parte del gabinete se corta el fluido eléctrico para evitar un accidente.

En el centro del gabinete se encuentra el espacio que se guardó para el graficador de 6 canales que se va a instalar directamente en Panamá. Al lado derecho se muestra el PanelView plus 1000, de donde se controlará toda la línea. Debajo de este último se encuentra el botón de parada de emergencia, al presionar este interruptor el sistema se detiene. Este tiene una luz roja cuando no está presionado, para que se vea más rápido si es necesario presionarlo, en el momento que se presiona la luz se apaga.

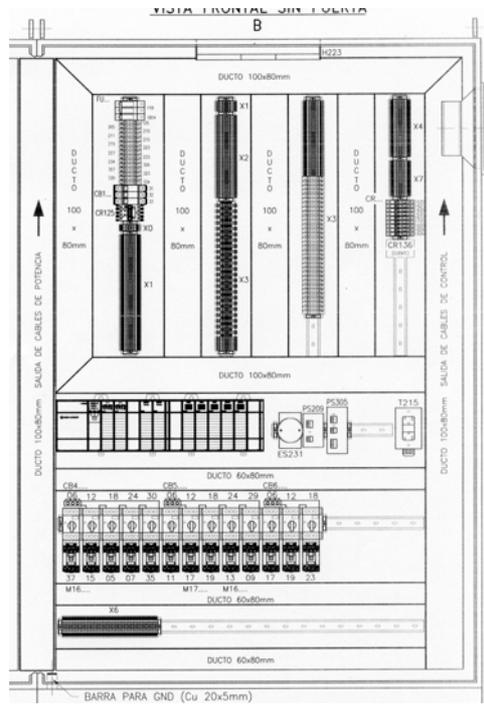


Figura 6. 2 Diagrama de sector de control del gabinete

En la figura 6.2 se observa el área de control del gabinete. En la parte superior se encuentran todos los bornes donde se realizan las conexiones entre sensores, fuentes, tierras, relés, con el PLC, y las conexiones del PLC con válvulas, graficador, etc. Cada borne tiene un color que indica una conexión diferente, por ejemplo los blancos se utilizan para el neutro, los grises para la línea viva y los amarillos con rayas verdes para la tierra. Los azules se utilizan para las conexiones de 24V, los rojos para las conexiones de fases de 120V.

El Rack del PLC se encuentra debajo de los bornes. Se dejaron espacios libres en el rack para posibles expansiones del sistema, un espacio para entradas digitales, uno para las salidas digitales y entradas o salidas analógicas. Se reservó un espacio para los cables de control del sistema, que estuviera separado del área de potencia. Por este ducto pasan los cables que controlan las válvulas, las líneas de los sensores, la salida del PLC, etc. Los relés se pusieron al lado contrario de las líneas de potencia debido a que éstas pueden causar ruido electromagnético y afectar el estado del relé.

En la parte inferior se encuentran los contactores de los motores con sus respectivos bornes. A los cables de potencia se les asignó un ducto para separarlos del sistema de control, y así evitar cualquier tipo de ruido electromagnético que puedan causar a las señales digitales del sistema. Este ducto es el que se encuentra al lado izquierdo, que está del lado de los dispositivos de potencia del sistema, como se muestra en la figura 6.3.

En esta área se encuentra el variador de frecuencia, el transformador de control, los reactores, el medidor de potencia y los fusibles de potencia. El medidor de potencia se instaló debajo del transformador debido a que las conexiones con las donas son más cortas y el cable de comunicación RS-232 se puede pasar por el ducto de potencia en forma paralela a las líneas de potencia, lo que evita que se induzca ruido electromagnético.

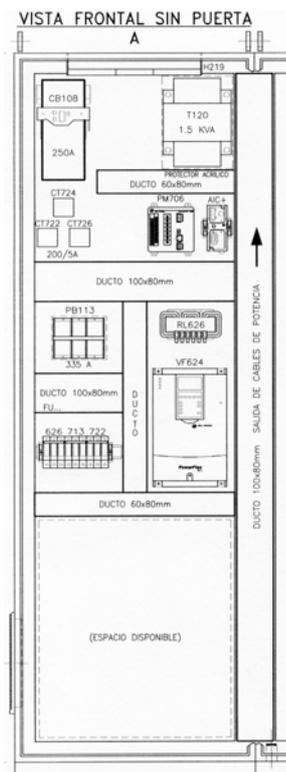


Figura 6. 3 Diagrama de sector de potencia del gabinete

Para que se pueda entregar un gabinete al cliente este tiene que estar probado en su totalidad, para esto se realiza una prueba llamada por ELVATRON: la prueba Z. Esta prueba consiste en ir probando punto por punto el sistema, hasta que todo esté funcionando. Se tiene que probar el PLC y sus conexiones y comunicaciones. Además el panel de operador, el variador, los contactores, etc. Y tiene que quedar configurado para que el cliente solo tenga que instalar las líneas y señales de campo y esperar a la puesta en marcha.

Primero se prueban que todas las conexiones estén según los planos, así que se mide continuidad en todo el gabinete. Después se conectan las líneas de 480V y se mide el voltaje en las líneas trifásicas, después se conectan los fusibles del transformador y se mide que se esté haciendo la transformación correcta. Después se van activando cada una de las líneas de 120V. Primero la línea de control; aquí se observa que todos los dispositivos que están conectados a esta línea funcionen correctamente (toma polarizado, luces, ventilador, etc.).

Como la UPS la proporciona el cliente, en este caso se utiliza una UPS de la empresa, y se prueban todos los equipos que están conectados a esta (fuentes de 24V, fuente del PanelView, fuente del PLC). Con el PLC energizado se procedió a probar la comunicación Ethernet con el PanelView. Después se probaron las entradas analógicas de 4 a 20mA, para realizar esta prueba se utilizó un generador de 4 a 20mA, con el cual se simula el lazo de corriente. Primero se simularon 4mA, después 12mA y por último 20mA se revisó desde la computadora que el PLC estuviera recibiendo correctamente estas señales.

Las salidas analógicas también se probaron desde la computadora; se forzaba un valor en el PLC y se media con un amperímetro para ver si las señales se generaban correctamente. Si se da una falla en la energía estas señales tienen que continuar funcionando por medio de la UPS, así que se cortó el fluido eléctrico y realizaron las mismas pruebas.

Después se activó el interruptor de las líneas de entrada y se probaron las entradas y salidas analógicas del PLC; de la misma manera que con los módulos analógicos se revisó que en la computadora se pudieran ver todas las señales. Se

revisó que los relés estuvieran funcionando correctamente, gracias a estas pruebas se descubrió uno descompuesto.

Después se procedió a probar la parte de potencia del sistema. Primero se probaron todos los contactores; para esto se utilizó un motor de 1HP, que se iba conectando a cada uno de los contactores. Desde la computadora se forzaba la activación del motor y así se podía observar su funcionamiento. También se revisó si se daba la señal de confirmación por parte del contactor.

Una vez probados todos los contactores se conectó el motor al variador de frecuencia. Se configuró para el motor de 1HP, y desde la computadora se forzaron a los módulos analógicos que enviaran las señales de 4 a 20mA para variar su velocidad. Se fue variando poco a poco y se observó su variación entre 0 y 60Hz. Se probó el modo JOG del variador, también se activó y desactivó desde el PLC. Una vez que se probó su funcionamiento se configuró para la potencia del motor que se va a utilizar en la esterilizadora (3HP) y la velocidad del JOG se dejó en 10Hz.

Debido al problema que hubo en la entrega del PowerMonitor 3000, las pruebas se realizaron con un equipo de demostración de ELVATRON, así que se conectaron las donas de potencia, las líneas de potencia y el cable de comunicación. Y se monitoreó la potencia consumida por el sistema con el motor de 1HP conectado al variador.

Como el transformador de control es de mucha potencia se construyó una protección de acrílico, para evitar algún accidente; de esta manera si alguien se acerca al transformador evita que se genere un arco eléctrico que cause una descarga eléctrica a la persona.

6.2 Modelo matemático

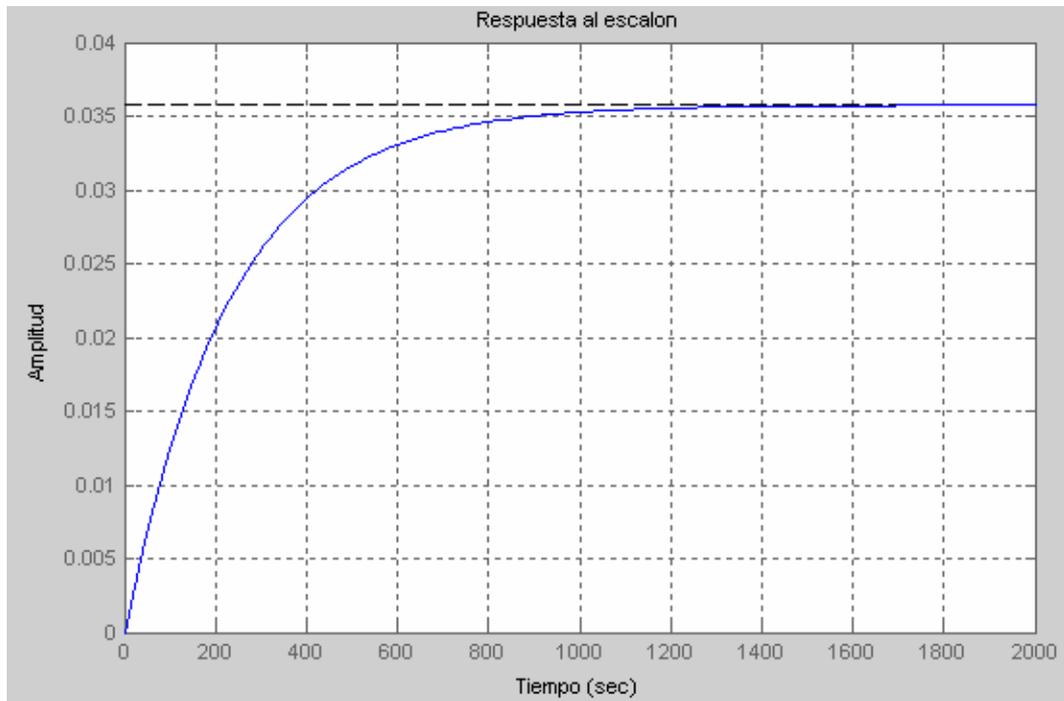


Figura 6. 4 Respuesta al escalón del modelo experimental

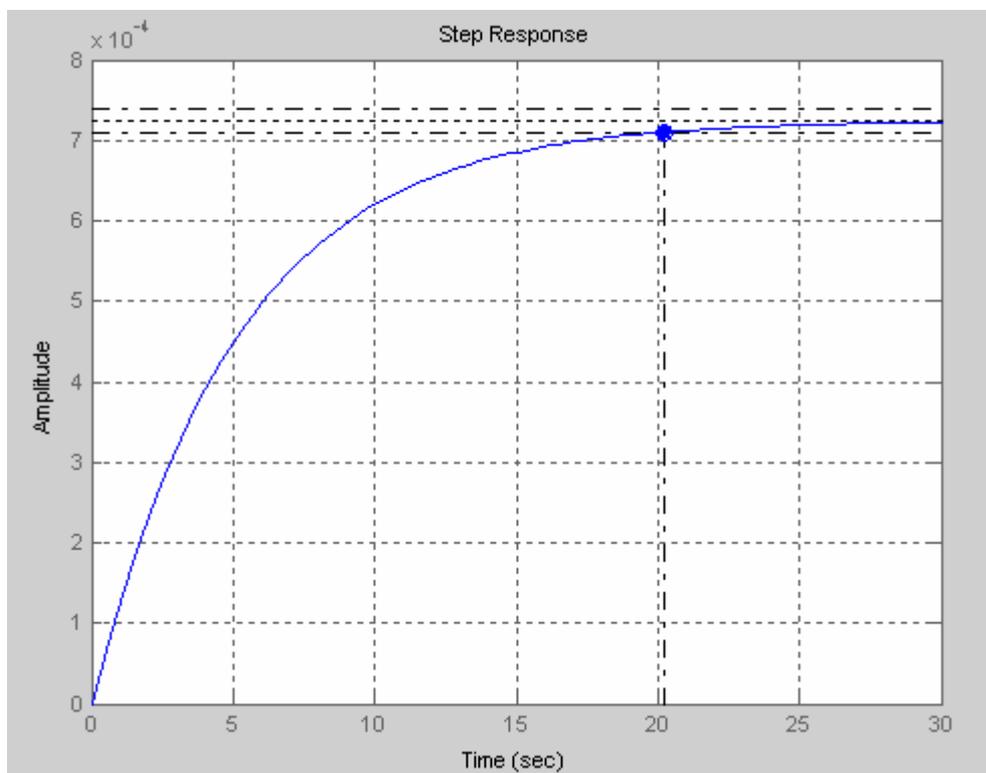


Figura 6. 5 Respuesta al escalón del modelo teórico

Tabla 6. 1 Valores de error de estado estacionario y tiempo de estabilización

Método	E_{ss} (%)	T_s (s)
Experimental	96.4264	1200
Teórico	99.927	20.2

Para esta planta se realizaron dos modelos matemáticos uno teórico y uno experimental para así poder analizar cual de las dos técnicas predecían mejor al sistema. Como se puede observar al compara las figuras 6.4 y 6.5, el modelo que ajustó mejor fue el obtenido por el método experimental ya que la temperatura se estabiliza en el tiempo real (20 minutos), mientras que en el método teórico este tiempo es mucho menor que el real. Además que el error de estado estacionario en el método experimental es igual a 96.4264%, mientras que el método analítico el error es casi un 100% (ver tabla 6.1).

. El problema que se tiene con el método analítico es que se tiene que saber todas las condiciones y dimensiones de construcción de los tanques, el tipo de materiales; se tiene que tomar en cuenta también el tipo de contacto que existe entre cada una de las capas, si es uniforme o no. También se tendría que saber exactamente el coeficiente de convección y sus variaciones en cada uno de los materiales, por lo que hay que realizar experimentos a los materiales y a los tanques ya construidos. Si los tanques se fueran a construir desde cero, este método sería el óptimo para obtener un modelo matemático exacto ya que se toma en cuenta todas las variables que entran en juego en sistema de transferencia de calor tanto en estado estable, como en estado dinámico.

Para este caso en particular de planta es mucho más efectivo el método experimental debido a la poca información de construcción que se tenía de los tanques. Como la planta se está utilizando para producir, no es posible realizar las pruebas necesarias para realizar un modelado matemático exacto, por lo que se tiene que aproximar. Con la información facilitada por lo operadores y supervisores de la línea de producción se aplicó el método descrito para obtener

una aproximación del comportamiento del sistema en estado estacionario. Como se puede observar este método fue el que más se aproximó a la realidad, así que se utilizó para realizar los diseños de los diferentes compensadores.

6.3 Reguladores

En la mayoría de los casos, mientras más complejo sea un controlador, es más costoso, menos confiable, y más difícil de diseñar.²¹

Se diseñaron tres tipos de reguladores para controlar la temperatura de las cámaras de la esterilizadora, primero se diseño uno en función del tiempo. Se agregó un compensador de atraso para mejorar el error de estado estacionario, y después un regulador de adelanto para ajustar el sobre impulso y el tiempo de estabilización. Realizando iteraciones la respuesta al escalón se puede ir mejorando, pero como se está trabajando con un sistema digital la ecuación final se tendría que discretizar y calcular la ecuación de diferencia para programarla en el PLC. Esto le resta efectividad y como estos compensadores son aproximaciones, cuando se tenga que ajustar es mucho más difícil.

De la misma manera se diseño un compensador digital de respuesta de orden 1, el cual tiene una respuesta muy buena como se puede observar en la figura 5.23, pero al igual que el primer compensador este tiene que ser programado en el PLC y a la hora de realizar ajustes es mucho más complicado ya que se tiene recalculer la ecuación de diferencias cada vez que se quiere ajustar el compensador.

El PLC Allen-Bradley tiene una función de PID que tiene programado la ecuación de PID que permite regular la planta, a esta solo se tiene que introducir las constantes proporcional, integral y derivativa. Por lo que la mejor opción es diseñar directamente un controlador PID, y calcular dichas constantes para que regulen la planta.

Este modelado es muy parecido al regulador de adelanto y de atraso, lo único es que los polos y ceros se agregan en función de las constates de control. Como el sistema es de orden uno se puede omitir el diseño de la parte PD del sistema,

²¹ Kuo, B. Sistemas de Control Automático; 7 ed. Pág. 670

ya que no es necesario ajustar sobre impulsos y con solo la parte PI se puede obtener un estado de estabilización rápido.

En la tabla 6.2 se pueden observar diferentes valores que se le asignan a las constantes K_p y K_i para obtener diferentes tiempos de estabilización. Como se mencionó en el diseño, para que el sistema mantenga estabilidad se tiene que mantener la relación K_i/K_p menor a 0.004167, en la tabla se encuentran tabulados valores menores y mayores a este y se puede notar que cuando la relación es mayor a este número comienza a mostrarse un sobre impulso en la respuesta. Los valores en la tabla que están marcados con un gris oscuro son posibles valores que tienen la mejor respuesta de estabilización y se pueden observar su respuesta en la figura 6.6.

Tabla 6. 2 Diferentes Valores de PID

K_p	K_i	K_i/K_p	t_s (s)	Sobre-impulso (%)
2.5	0.0025	0.001	44400	0
5.39	0.005389	0.001	21800	0
12.5	0.0125	0.001	10600	0
25	0.025	0.001	6350	0
2.5	0.01	0.004	1.06×10^4	0
5.39	0.02156	0.004	4930	0
12.5	0.05	0.004	2150	0
22.5	0.09	0.004	1210	0
25	0.1	0.004	1090	0
2.5	0.025	0.01	3720	0
5.39	0.0539	0.01	1390	0.0456
12.5	0.125	0.01	1260	0.558
25	0.25	0.01	858	0.943

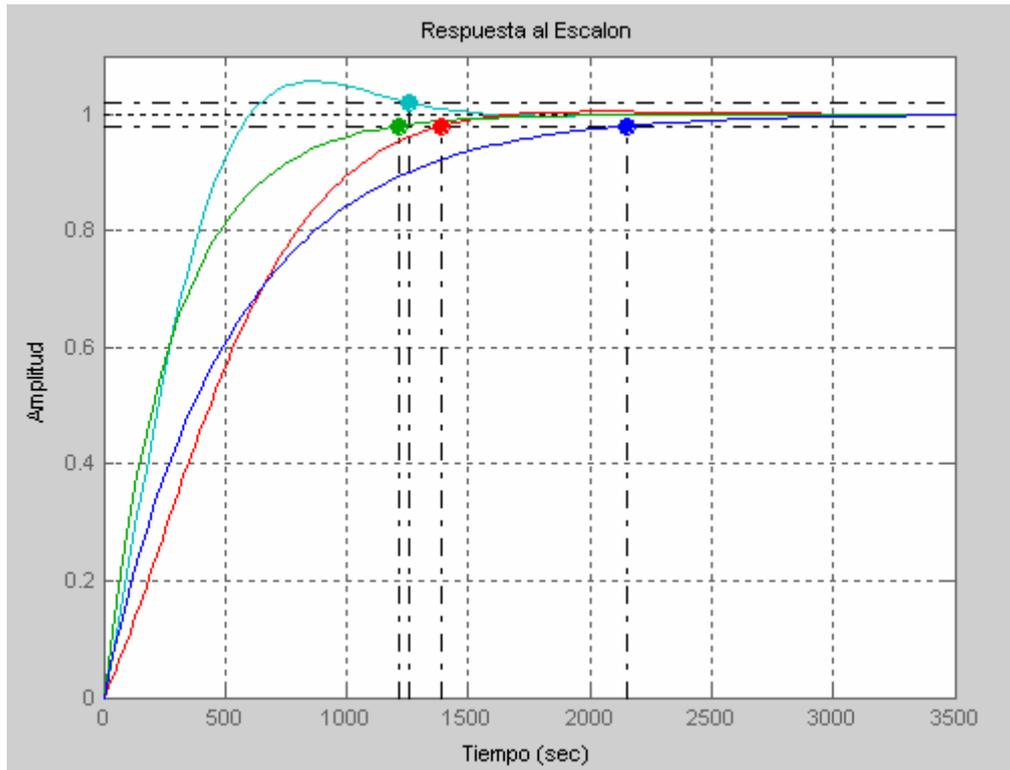


Figura 6. 6 Respuesta al escalón para diferentes valores de PI

Cuando se diseñó el regulador para que este tuviera las condiciones de 2% de sobre impulso máximo, un tiempo de estabilización de 1200s se calculó que un posible valor para la constante proporcional era 5.39 por lo que en la tabla 6.3 se muestran diferentes valores de K_i/K_p con K_p constante.

Se puede ver que cuando la relación K_i/K_p es mayor a 0.04167 el sistema comienza a dar sobre impulsos en la respuesta, pero como el este valor de K_i fue calculado para soportar un sobre impulso de 2%, se puede observar que para alcanzar el tiempo que se quiere comienza a dar un sobre-impulso; el sobre-impulso es aproximadamente un 2% cuando se acerca a un valor de estabilización de 1200s. Así que para alcanzar este valor el sistema va a tener un pequeño sobre-impulso; esto no es crítico para el funcionamiento del sistema, lo que se quiere es que el sistema logre estabilizarse en el menor tiempo que se pueda, y esto es aproximadamente 20 minutos.

Tabla 6. 3 Valores de tiempo de estabilización para un valor constante de $K_p=5.39$

K_i/K_p	K_i	t_s (s)	Sobre-impulso (%)
0.001	0.00539	21800	0
0.002	0.1078	10600	0
0.003	0.01617	6820	0
0.004	0.02156	4930	0
0.0041	0.022099	4790	0
0.004167	0.02246	4700	0
0.005	0.026	3950	0
0.01	0.0539	1390	0.0456
0.02	0.1078	1410	0.897
0.05	0.2695	1250	2.6

En la tabla 6.3 también se deduce que entre más cerca de cero se encuentre el valor de la relación K_i/K_p el tiempo de estabilización aumenta. Por lo que a la hora de escoger las constantes lo mejor sería mantenerse cerca del valor de 0.004167, así se evita el sobre-impulso y se puede obtener un tiempo de estabilización aceptable.

En la tabla 6.4 se muestran diferentes valores de K_p manteniendo el valor de la relación K_i/K_p en 0.004. Como se puede notar conforme el valor va aumentando el tiempo de estabilización va disminuyendo, y no se requiere de un valor muy grande para poder obtener un tiempo de estabilización cercano a los 1200 minutos. Los campos que se encuentran en marcados con un gris más oscuro son los que mejor se adaptan a las necesidades de regulación que se quiere.

Tabla 6. 4 valores de tiempo de estabilización con $K_i/K_p=0.004$

K_p	t_s (s)
1	26400
2	13200
5	5310
10	2680
11	2440
12	2240
15	1800
20	1360
21	1300
22	1240
22.3	1220
22.5	1210
22.7	1200
23	1190
24	1140

Con estos valores ya se tiene una idea por donde empezar cuando se va a poner en marcha el sistema. Así que utilizando un valor de $K_i=0.908$ y un valor de $K_p=22.7$ se tiene que el tiempo de estabilización es exactamente lo que dura el sistema llegando a esta temperatura. Como el cálculo de la planta es aproximado estos valores son aproximados, así que a la hora que se va a poner en marcha solo sirven como referencia y después se tienen que ir ajustando y calibrando para obtener la mejor respuesta en el sistema.

6.4 Análisis de Software

Para poder probar el programa del PLC y las pantallas del panel de operador se simuló el comportamiento de la línea de producción. Por medio de un programa emulador del PLC se pudieron realizar las simulaciones en la computadora. Así que se simularon todas las variables analógicas y confirmaciones de los motores, como si el programa estuviera funcionando ya en la línea.

Con el Rslogix500, RsView Studio y el emulador se puede simular y observar el comportamiento del programa. Primero se despliega la pantalla de inicio, y se procede a entrar a la pantalla de la línea. En este momento todas las bombas están apagadas, las temperaturas y presiones en 0, las válvulas cerradas, las paradas de emergencia en verde; esto es debido a que en el PLC todas las variables se encuentran en 0.

Se comienza por probar los arranques y paros de las bombas. Para esto se arranca una bomba desde la pantalla del RsView, y la confirmación se realiza forzando el BIT en el PLC. Una vez que se forzó la confirmación el gráfico del motor cambia a color verde indicando que este ya arrancó. Si se presiona el botón de activación de la bomba, pero no se recibe la confirmación del motor la bomba entra en alarma, lo que hace que el gráfico se ponga rojo. Todo esto se prueba manipulando las señales dentro del programa del PLC. De la misma manera se prueban las válvulas.

Después se simulan las temperaturas y presiones del sistema, cuando se modifican las temperaturas en el PLC se tienen que desplegar en la pantalla. Se establecen todas las condiciones necesarias para que la secuencia arranque y se pasa la perilla de control a automático. En este momento comienza a funcionar la secuencia. Primero se activan los motores M3 y M6, cuando todo está listo comienza el proceso de activación de los motores de entrada. Como se puede observar en la figura 6.6 las paradas están de color verde porque no se ha presionado ninguna, los motores que no están activos están de color azul, y los que están funcionando están de color verde. Las temperaturas se despliegan según lo que el PLC indique (en este caso los valores fueron forzados para la

simulación), y las válvulas que están abiertas se encuentran en color verde, y las que no en color azul.

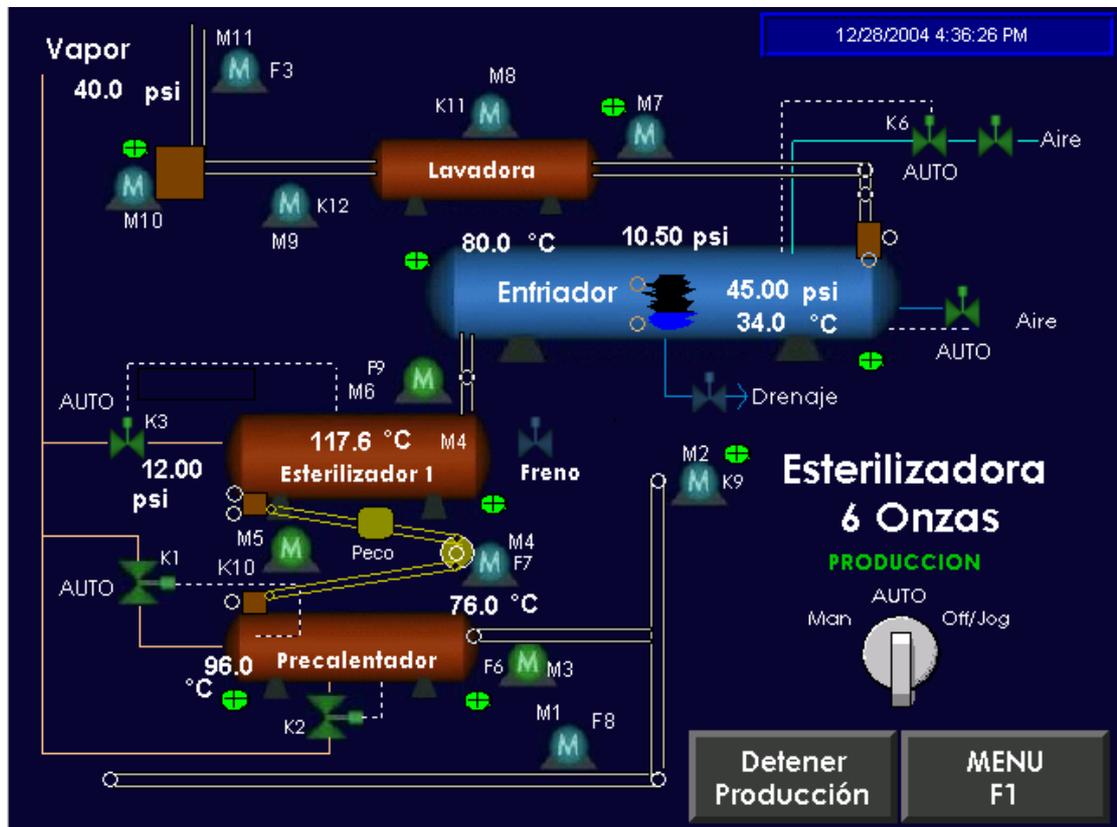


Figura 6. 7 Pantalla de proceso durante la simulación

Los motores van activándose según la secuencia. Hasta aquí la primera versión del programa no dio ningún problema, la secuencia arrancó como se debía. Cuando se simuló una lata atascada en la entrada a la esterilizadora los paros de los motores no se dieron como se quería. Ya que todos los motores se detuvieron, así que se revisó los procedimientos y se notó que por error se había puesto el BIT de atascamiento de latas en todas las secuencias de interconexión de motores.

Cuando una lata se atasca, el sistema tiene que indicar en la pantalla cual fue el punto donde se atascó, y además activar las luces de emergencia, y la alarma sónica. Se probaron todas las paradas de emergencia y se probó una falla eléctrica, para observar como se comportaba el sistema, las señales de confirmación de los motores se quitaron, y se desplegó un mensaje de "Falla

Eléctrica”; el botón de detener producción cambió a “Re-inicialización”. Cuando el operador presiona este botón los motores comienzan a arrancar en la misma secuencia que un arranque normal, la ventaja es que si se da la falla eléctrica las temperaturas se mantienen mientras dure la UPS. Gracias a esta simulación se pudo depurar el programa, quitar bits de memoria que no se utilizaron; además verificar si los todos los direccionamientos de las pantallas estaban correctos.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. El sobre dimensionamiento es una buena técnica para poder agregar funciones al sistema.
2. Combinar las líneas de comunicación con las líneas de potencia puede causar que se pierda información en las primeras.
3. El modelado matemático experimental es el más efectivo para plantas a las que no se les puede realizar pruebas, o que no se esté tan seguro los materiales de construcción.
4. Para el control de plantas en operación es mucho más eficaz aplicar un regulador PID.
5. Los reguladores PID se tienen que ajustar con la planta en funcionamiento.
6. El uso de animaciones visuales permite que el operador pueda controlar y monitorear la línea de producción de una forma más efectiva y eficaz.

7.2 Recomendaciones

1. Realizar más visitas a la empresa para observar y hablar con los operadores mejoraría el desempeño en el diseño de hardware y software.
2. Realizar una conexión de todos los procesos en la planta vía Ethernet con una computadora central daría un mayor control sobre la producción de la planta.

Bibliografía

1. Rockwell Automation. "RSView Machine Edition User's Guide". 2004 <<http://www.ab.com/manual/swrsi/RSViewUsersME.pdf>> (16 Agosto 2004)
2. Rockwell Automation. "PanelView Plus Operator Terminal User Manual". 2002 <<http://www.ab.com/manual/eoi/pdf/2711p-um001b-en-p.pdf>> (16 Agosto. 2004)
3. www.efunda.com/desingstandards/sensors/ (17Set. 2004)
4. http://www.engineeringtoolbox.com/24_154.html (17Set. 2004)
5. Blumel S., Velásquez A. "ME43AConvección" <http://www.geocities.com/me43a/> (16Nov. 2004)
6. García Arturo. Instituto de Ingeniería y tecnología <http://docentes.uacj.mx/agarcia/Cursos/Fisicaii/Propaga/prop.htm> (16Nov. 2004)
7. <http://www.geocities.com/tenisoat/leche.htm> (16Nov. 2004)
8. <http://members.tripod.com.ve/tecnologia/microbiologia1.htm> (16Nov. 2004)
9. Chapman S. "Máquinas Eléctricas". 3edición.McGraw-Hill, 2000
10. Colman J.P. "Transferencia de calor". McGraw-Hill. 1981
11. Kreith F. "Heat Transfer". 2 edición. Editorial. Internacional Textbook. 1965
12. Kuo, B. "Sistemas de Control Automático". 7 edición. Editorial Prentice-Hall. 1996
13. Ogata K. "Ingeniería de Control Moderna". 3 edición. Editorial Prentice-Hall. 1998
14. Rosemount. "Rosemount sales training, module 1: Pressure measurement". Marzo 199 (Formato PDF)

15. Rosemount. "Rosemount 2088 absolute and gage pressure transmitter data sheet". Agosto 2004

16. Serway R. "Física, tomo I". 4 edición. Editorial McGraw-Hill. 1997

Apéndice A.1 Glosario

Borne: Cada uno de los botones de metal en que suelen terminar ciertas máquinas y aparatos eléctricos, y a los cuales se unen los hilos conductores.

Donas de corriente: Dispositivos que se utilizan para medir el flujo de corriente en una línea.

Efecto Seebeck: Si dos conexiones se encuentran a diferente temperatura una corriente va a fluir en un circuito cerrado. Ver página 18

Peco: Parte mecánica en forma de U que une dos secciones de los rieles en la esterilizadora.

Relé: Dispositivo electromagnético que se utiliza como interruptor.

RTD: Dispositivo que varía su resistencia eléctrica según la temperatura a la que se exponga. Véase página 15

Termocuplas: Dispositivos que entregan tensión variable según la temperatura a la que se exponga. Véase página 18

Toroides: Transformadores eléctricos contruidos en un núcleo hueco circular, como la forma de una dona.

Touch Screen: Sistema de pantallas sensibles al tacto.

Transductores: Dispositivos que transforman variables físicas en señales eléctricas o viceversa.

Variadores de frecuencia: Dispositivos que se utilizan para controlar la velocidad de motores variando la frecuencia de las líneas de alimentación.

PLC: siglas en inglés para Controlador Lógico Programable

Apéndice A.2 Tablas de comparación

Tabla A.2. 1 Comparación de diferentes modelos de PLC

Modelo	Marca	Memoria de programa	Tipo de memoria	Puertos de Comunicación	Conectividad	Capacidad máxima de entradas y salidas	Programas
SLC500 5/05	Allen-Bradley	16K, 32K, 64K	RAM con respaldo de batería, EEPROM, EPROM	Ethernet, RS-232	Ethernet, DeviceNet, DH-485, DH+, Control Net, RS-232	4096	RsLogix 500
ControlLogix	Allen-Bradley	Desde 750K hasta 8M	RAM con respaldo de batería, EEPROM, EPROM, y opción de utilizar un ControlFlash.	RS-232, Ethernet	Ethernet, DeviceNet, RS-232	Hasta 16 módulos	RSLogix 5000
DL405	DirectLogix	Desde 6.4K a 30.8K		Serial, Ethernet	RS-232, Ethernet	Desde 1152 hasta 3584	Direct Soft 32
T2	Toshiba	9.5K	SRAM	Ethernet, RS-232 en módulos aparte	ModBus, Ethernet, RS-232 en módulos aparte	512	
CJ1	OMRON	16K	SRAM	RS-232	Ethernet, Device Net y Controller Link	2560	CX-programmer
CS1-H	OMRON	10K-250K	SRAM	RS-232	Ethernet, Device Net y Controller Link	5120	CX-programmer

Tabla A.2. 2 Comparación de diferentes tipos de paneles de operador

Modelo	Marca	Tamaño de pantalla	Resolución	Tipo de interfase	Puerto de comunicación
Panel View Plus 1000	Allen-Bradley	10.4"	640 x 480 18 bit color	Touch screen, Teclado, o combinado	Ethernet, Rs-232, DH+, DH485
MMI 1500	KEP	10"	640 x 480 256 colores	Touch screen	RS-232
Color Quick Panel	General Electric	10"	640 x 480	Touch screen	A-B Remote I/O Data Highway Plus Modbus Plus GE Genius
HG2A	Indec Corporation		640 x 480	Touch screen	RS232, RS485 RS422
PWS3260	HITECH	10.4"	640 x 480	Touch screen	RS232, RS485 RS422

Apéndice A.3 Información sobre la empresa

Apéndice A.3.1 Descripción de la empresa

Hace 31 años, primero con capital extranjero y luego con capital nacional se crea ELVATRON, S.A., empresa dedicada a la automatización industrial en Costa Rica y en el área Centroamericana. Con más de 100 empleados entre ingenieros, técnicos, especialistas en ventas, mercadeo, y otros profesionales, se dedican a ofrecer al cliente, las mejores soluciones a sus problemas, con la ayuda del mejor equipo de ingenieros y técnicos, y el mejor equipo electrónico y eléctrico que brinde el mercado.

ELVATRON, S.A., ofrece también servicio técnico ya sea por garantía de algún proyecto que haya sido desarrollado, o por la compra del mismo. Además ELVATRON, S.A. ofrece la venta de productos industriales (componentes de control, de potencia y demás accesorios), como también la venta equipo de instrumentación.

Con todos estos servicios su gerente Dirk Haase y sus más de 100 empleados buscan lograr las mejores soluciones y el servicio más calificado en el área de la automatización industrial.

ELVATRON, S.A. brinda los siguientes servicios:

Venta de productos de control e instrumentación industrial.

Consultoría y desarrollo de proyectos industriales de todos los tamaños.

Soporte Técnico: emergencias y asesoría en aplicaciones, mantenimiento.

Capacitación en productos y software industrial.

Venta por despacho de productos y servicios.

Apéndice A.3.2 Descripción del departamento

El proyecto se realizará en el departamento “Desarrollo de Proyectos, División de Automatización”.

El departamento cuenta con más de 12 personas entre ingenieros electrónicos y personal de distintas ramas, y es coordinado por el Ing. Sergio Ovando. El departamento se especializa en el desarrollo de proyectos de automatización por contrato, usando principalmente controladores lógicos programables y redes de comunicación, para la interacción entre el controlador y una PC, ó un panel de visualización, lo que facilita el manejo del sistema por parte del usuario.

Al finalizar el proyecto normalmente el departamento se encarga del entrenamiento del personal de la empresa para la que se realizó tal proyecto.

El departamento cuenta con todo el equipo necesario para el desarrollo de los proyectos: computadoras, áreas de capacitación, software especializado, y un amplio stock de equipo, lo que agiliza la realización de cualquier proyecto.

Apéndice A.4 Fotografías del gabinete



Figura A.4. 1 Fotografía del PLC Allen-Bradley SLC 500 5/5 instalado en el gabinete



Figura A.4. 2 Fotografía de variador de frecuencia PowerFlex 70



Figura A.4. 3 Fotografía de reactor de línea trifásico utilizado para el variador



Figura A.4. 4 Fotografía de donas de corriente



Figura A.4. 5 Fotografía de panel de operador PanelView plus 1000



Figura A.4. 6 Fotografía de panel de operador con pantalla de producción

Apéndice A.5 Hoja de información

Información del estudiante:

Nombre: José E. González Vargas

Cédula o No. Pasaporte: 1-1108-0686

Carné ITCR: 9921204

Dirección de su residencia en época lectiva: Barrio Istarú, Cartago

Dirección de su residencia en época no lectiva: Av. 2 C 15 y 17, Alajuela

Teléfono en época lectiva: 591-3515

Teléfono época no lectiva: 440-2585

Email: jegonz@costarricense.cr

Información del Proyecto:

Nombre del Proyecto: Modernización del sistema de control de la esterilizadora de onzas en Nestlé Panamá

Profesor Asesor: William Marín Moreno

Horario de trabajo del estudiante: Tiempo completo

Información de la Empresa:

Nombre: Elvatron S.A.

Zona: La Uruca

Dirección: Del banco de Costa Rica en La Uruca 100 norte y 75 oeste

Teléfono: 242-9931

Actividad Principal: Automatización Industrial

Anexo A.1 Hojas de especificaciones



SLC 500 Systems

Bulletin 1746 and 1747

Selection Guide



SLC 500 Common Specifications

The following specifications apply to all SLC 500 modular components unless noted.

Description	Specification
Temperature	Operating: 0...60 °C (32...140 °F)
	Storage: -40...85 °C (-40...185 °F)
Humidity	5...95% without condensation
Vibration	Operating: 1.0 g at 5...2000 Hz
	Non-operating: 2.5 g at 5...2000 Hz
Shock	Operating: 30 g (3 pulses, 11 ms) - for all modules except relay contact
	Operating: 10 g (3 pulses, 11 ms) - for relay contact modules 1746-OWx and 1746-IOx combo
	Non-operating: 50 g, 3 pulses, 11 ms
Free Fall (drop test)	Portable, 2.268 kg (5 lbs) or less at 0.762 m (30 in.), six drops
	Portable, 2.268 kg (5 lbs) or less at 0.1016 m (4 in.), three flat drops
Noise Immunity	NEMA Standard ICS 2-230
Electromagnetic Compatibility	Showering ARC: 1.5 kV (Industry Standard - NEMA ICS 2-230/NEMA ICS 3-304)
	Surge Withstand Capability: 3 kV (Industry Standard - IEEE Std. 472-1974/ANSI C37.90/90A-1974)
	Fast Transient Burst (impulse): 2 kV for 1746 power supplies, 1 kV for 1746-I/O and communication lines over 10 m (32.48 ft), 5 ms rise time
	Electrostatic Discharge (ESD): 15 kV, 100 pF/1.5 kΩ model
	Radiated Electromagnetic Susceptibility: 5 W walkie-talkie at 464.5 MHz and 153.05 MHz
Safety	Dielectric Withstand: 1500V ac (Industry Standard - UL 508, CSA C22.2 No. 142)
	Isolation between Communication Circuits: 500V dc
	Isolation between Backplane and I/O: 1500V ac
	Flammability and Electrical Ignition: UL94V-0
Certification (when product or packaging is marked)	<ul style="list-style-type: none"> • C-UL or CSA certified • UL Listed • Class I, Groups A, B, C or D, Division 2 • CE marked for all applicable directives • C-Tick marked for all applicable acts

Digital I/O Module Overview

Cat. No.	Voltage Category	I/O Points	Description	For Detailed Specifications, See
DC Modules				
1746-IB8	24V dc	8	Current Sinking DC Input Module	page 12 Sinking DC Input Modules
1746-IB16	24V dc	16	Current Sinking DC Input Module	
1746-IB32	24V dc	32	Current Sinking DC Input Module	
1746-ITB16	24V dc	16	Fast Response DC Sinking Input Module	
1746-IC16	48V dc	16	Current Sinking DC Input Module	
1746-IH16	125V dc	16	Current Sinking DC Input Module	
1746-IV8	24V dc	8	Current Sourcing DC Input Module	page 12 Sourcing DC Input Modules
1746-IV16	24V dc	16	Current Sourcing DC Input Module	
1746-IV32	24V dc	32	Current Sourcing DC Input Module	
1746-ITV16	24V dc	16	Fast Response DC Sourcing Input Module	
1746-IG16†	5V dc	16	Current Sourcing TTL Input Module	
1746-OB6EI	24V dc	6	Electronically Protected Isolated Sourcing DC Output Module	page 13 Sourcing DC Output Modules
1746-OB8	24V dc	8	Current Sourcing DC Output Module	
1746-OB16	24V dc	16	Current Sourcing DC Output Module	
1746-OB16E‡	24V dc	16	Electronically Protected Current Sourcing DC Output Module	
1746-OB32	24V dc	32	Current Sourcing DC Output Module	
1746-OB32E	24V dc	32	Electronically Protected Current Sourcing DC Output Module	
1746-OBP8‡	24V dc	8	High Current Sourcing DC Output Module	
1746-OBP16*	24V dc	16	High Current Sourcing DC Output Module	
1746-OV8	24V dc	8	Current Sinking DC Output Module	page 13 Sinking DC Output Modules
1746-OV16	24V dc	16	Current Sinking DC Output Module	
1746-OV32	24V dc	32	Current Sinking DC Output Module	
1746-OVP16*	24V dc	16	High Current Sinking DC Output Module	
1746-OG16†	5V dc	16	Current Sinking TTL Output Module	
AC Modules				
1746-IA4	100/120V ac	4	120V ac Input Module	page 14 AC Input Modules
1746-IA8	100/120V ac	8	120V ac Input Module	
1746-IA16	100/120V ac	16	120V ac Input Module	
1746-IM4	200/240V ac	4	240V ac Input Module	
1746-IM8	200/240V ac	8	240V ac Input Module	
1746-IM16	200/240V ac	16	240V ac Input Module	page 14 AC Output Modules
1746-OA8	120/240V ac	8	120/240V ac Output Module	
1746-OA16	120/240V ac	16	120/240V ac Output Module	
1746-OAP12*	120/240V ac	12	High Current 120/240V ac Output Module	
AC/DC Modules				
1746-IN16	24V ac/dc	16	24V ac/dc Input Module	page 14 AC Input Modules
1746-OW4*	ac/dc Relay	4	Relay (Hard Contact) Output Module	page 15 Relay Output Modules
1746-OW8*	ac/dc Relay	8	Relay (Hard Contact) Output Module	
1746-OW16*	ac/dc Relay	16	Relay (Hard Contact) Output Module	
1746-OX8*	ac/dc Relay	8	Isolated Relay Output Module	
1746-IO4*	120V ac (Inputs) 100/120V ac (Relay Contact Outputs)	2 In 2 Out	Combination Input/Output Module	page 16 Combination I/O Modules
1746-IO8*	120V ac (Inputs) 100/120V ac (Relay Contact Outputs)	4 In 4 Out	Combination Input/Output Module	
1746-IO12*	120V ac (Inputs) 100/120V ac (Relay Contact Outputs)	6 In 6 Out	Combination Input/Output Module	
1746-IO12DC‡	24V dc (Inputs) 100/120V ac (Relay Contact Outputs)	6 In 6 Out	Combination Input/Output Module	

* Certified for Class 1, Division 2 hazardous location by CSA only.

† Not CE marked.

‡ These modules carry the C-UL mark and are certified by UL per CSA requirements.

Sinking DC Input Modules

Specifications	1746-IB8	1746-IB16	1746-IB32	1746-IC16	1746-IH16	1746-ITB16
Number of Inputs	8	16	32	16	16	16
Points Per Common	8	16	8	16	16	16
Voltage Category	24V dc			48V dc	125V dc	24V dc
Operating Voltage Range	10...30V dc		15...30V dc @ 50 °C (122 °F) 15...26.4V dc @ 60 °C (140 °F)	30...60V dc @ 55 °C (131 °F) 30...55V dc @ 60 °C (140 °F)	90...146V dc*	10...30V dc
Backplane Current (mA) at 5V	50 mA	85 mA	50 mA	85 mA		
Backplane Current (mA) at 24V	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
Voltage, Off-State Input, Max.	5.0V dc			10.0V dc	20.0V dc	5.0V dc
Nominal Input Current	8 mA @ 24V dc		5.1 mA @ 24V dc	4.1 mA @ 48V dc	2.15 mA @ 125V dc 2.25 mA @ 132V dc	8 mA @ 24V dc
Current, Off-State Input, Max.	1 mA		1.5 mA		0.8 mA	1.5 mA
Signal On Delay, Max	8 ms		3 ms	4 ms	9 ms	0.30 ms
Signal Off Delay, Max	8 ms		3 ms	4 ms	9 ms	0.50 ms

* Max. Points ON Simultaneously: 16 @ 146V dc and 30 °C (86 °F); 12 @ 146V dc and 50 °C (122 °F); 14 @ 132V dc and 55 °C (131 °F); 16 @ 125V dc and 60 °C (140 °F)

Sourcing DC Input Modules

Specifications	1746-IG16	1746-IV8	1746-IV16	1746-IV32	1746-ITV16
Number of Inputs	16	8	16	32	16
Points Per Common	16	8	16	8	16
Voltage Category	5V dc	24V dc	24V dc	24V dc	24V dc
Operating Voltage Range	4.5...5.5V dc*	10...30V dc		15...30V dc @ 50 °C (122 °F) 15...26.4V dc @ 60 °C (140 °F)	10...30V dc
Backplane Current (mA) at 5V	140 mA	50 mA	85 mA	50 mA	85 mA
Backplane Current (mA) at 24V	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
Voltage, Off-State Input, Max.	2...5.5V dc	5.0V dc	5.0V dc	5.0V dc	5.0V dc
Nominal Input Current	3.7 mA @ 5V dc	8 mA @ 24V dc		5.1 mA @ 24V dc	8 mA @ 24V dc
Current, Off-State Input, Max.	4.1 mA	1 mA		1.5 mA	1.5 mA
Signal On Delay, Max	0.25 ms	8 ms		3 ms	0.30 ms
Signal Off Delay, Max	0.50 ms	8 ms		3 ms	0.50 ms

* 50 mV peak-to-peak ripple (max.)

Sinking DC Output Modules

Specifications	1746-OG16	1746-OV8	1746-OV16	1746-OV32	1746-OVP16†
Number of Outputs	16	8	16	32	16
Points Per Common	16	8	16	16	16
Voltage Category	5V dc	24V dc			
Operating Voltage Range	4.5...5.5V dc*	10...50V dc		5...50V dc	20.4...26.4V dc
Backplane Current (mA) at 5V	180 mA	135 mA	270 mA	190 mA	250 mA
Backplane Current (mA) at 24V	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
Voltage Drop, On-State Output, Max.	—	1.2V @ 1.0 A	1.2V @ 0.5 A	1.2V @ 0.5 A	1.0 V @ 1.0 A
Load Current, Min.	0.15 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA
Current Leakage, Off-State Output, Max.	0.1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA
Signal On Delay, Max (resistive load)	0.25 ms	0.1 ms	0.1 ms	0.1 ms	0.1 ms
Signal Off Delay, Max (resistive load)	0.50 ms	1.0 ms	1.0 ms	1.0 ms	1.0 ms‡
Continuous Current per Module	N/A	8.0 A @30 °C (86 °F) 4.0 A @60 °C (140 °F)		8.0 A @0...60 °C (32...140 °F)	6.4 A @0...60 °C (32...140 °F)
Continuous Current per Point	24 mA	1.0 A @30 °C (86 °F) 0.5 A @60 °C (140 °F)	0.50 A @30 °C (86 °F) 0.25 A @60 °C (140 °F)		1.5 A @30 °C (86 °F) 1.0 A @60 °C (140 °F)
Surge Current per Point for 10 ms	N/A	3.0 A		1.0 A @30 °C (86 °F) 1.0 A @60 °C (140 °F)	4.0 A

* 50 mV peak to peak ripple (max).

† The 1746-OVP16 features a fused common and blown fuse LED.

‡ Fast turn-off modules provide fast OFF delay for inductive loads. Fast turn-off delay for inductive loads is accomplished with surge suppressors on this module. A suppressor at the load is not needed unless another contact is connected in series. If this is the case, a 1N4004 diode should be reverse wired across the load. This defeats the fast turn-off feature. Comparative OFF delay times for 1746-OB8/-OV8 and fast turn-off modules, when switching Bulletin 100-B110 (24 W sealed) contactor, are: 1746-OB8/-OV8 OFF delay=152 ms; fast turn-off modules OFF delay=47 ms.

Sourcing DC Output Modules

Specifications	1746-OB6EI	1746-OB8	1746-OB16	1746-OB16E	1746-OB32	1746-OB32E	1746-OBP8	1746-OBP16
Number of Outputs	6 Electronically Protected	8	16	16 Electronically Protected	32	32 Electronically Protected	8	16†
Points Per Common	Individually Isolated	8	16	16	16	16	4	16
Voltage Category	24V dc							
Operating Voltage Range	10 ...30V dc	10...50V dc		10...30V dc	5...50V dc	10...30V dc	20.4...26.4V dc	
Backplane Current (mA) at 5V	46 mA	135 mA	280 mA	135 mA	190 mA		135 mA	250 mA
Backplane Current (mA) at 24V	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
Voltage Drop, On-State Output, Max.	1.0V @ 2.0 A	1.2V @ 1.0 A	1.2V @ 0.5 A	1.0V @ 0.5 A	1.2V @ 0.5 A		1.0V @ 2.0 A	1.0V @ 1.0 A
Load Current, Min.	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA
Current Leakage, Off-State Output, Max.	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA	1 mA
Signal On Delay, Max (resistive load)	1.0 ms	0.1 ms	0.1 ms	1.0 ms	0.1 ms	1.0 ms	1.0 ms	0.1 ms
Signal Off Delay, Max (resistive load)	2.0 ms*	1.0 ms	1.0 ms	1.0 ms*	1.0 ms	2.0 ms	2.0 ms*	1.0 ms*
Continuous Current per Module	12.0 A @ 0...60 °C (32 °...140 °F)	8.0 A @ 30 °C (86 °F) 4.0 A @ 60 °C (140 °F)		8.0 A @ 0...60 °C (32...140 °F)				6.4 A @ 0...60 °C (32...140 °F)
Continuous Current per Point	2.0 A @ 0...60 °C (32 °...140 °F)	1.0 A @ 30 °C (86 °F) 0.50 A @ 60 °C (140 °F)	0.50 A @ 30 °C (86 °F) 0.25 A @ 60 °C (140 °F)	1.0 A @ 30 °C (86 °F) 0.50 A @ 60 °C (140 °F)	0.50 A @ 30 °C (86 °F) 0.25 A @ 60 °C (140 °F)		2.0 A @ 0...60 °C (32...140 °F)	1.5 A @ 30 °C (86 °F) 1.0 A @ 60 °C (140 °F)
Surge Current per Point for 10 ms	4.0 A	3.0 A		2.0 A	1.0 A @ 30 °C (86 °F) 1.0 A @ 60 °C (140 °F)		4.0 A	

* Fast turn-off modules provide fast OFF delay for inductive loads. Fast turn-off delay for inductive loads is accomplished with surge suppressors on this module. A suppressor at the load is not needed unless another contact is connected in series. If this is the case, a 1N4004 diode should be reverse wired across the load. This defeats the fast turn-off feature. Comparative OFF delay times for 1746-OB8/-OV8 and fast turn-off modules, when switching Bulletin 100-B110 (24 W sealed) contactor, are: 1746-OB8/-OV8 OFF delay = 152 ms; fast turn-off modules OFF delay = 47 ms.

† The 1746-OBP16 features a fused common and blown fuse LED.

AC Input Modules

Specifications	1746-IA4	1746-IA8	1746-IA16	1746-IM4	1746-IM8	1746-IM16	1746-IN16
Number of Outputs	4	8	16	4	8	16	16
Points Per Common	4	8	16	4	8	16	16
Voltage Category	100/120V ac			200/240V ac			24V ac/dc
Operating Voltage Range	85...132V ac @ 47...63 Hz			170...265V ac @ 47...63 Hz			10...30V ac 10...30V dc
Backplane Current (mA) at 5V	35 mA	50 mA	85 mA	35 mA	50 mA	85 mA	85 mA
Backplane Current (mA) at 24V	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
Voltage, Off-State Input, Max.	30V ac			50V ac			3.0V dc 3.0V ac
Nominal Input Current	12 mA @ 120V ac			12 mA @ 240V ac			8 mA @ 24V dc 8 mA @ 24V ac
Current, Off-State Input, Max.	2 mA	2 mA	2 mA	2 mA	2 mA	2 mA	1 mA (dc) 1 mA (ac)
Inrush Current, Max.*	0.8 A			1.6 A			0.02 A (ac only)
Inrush Current Time Duration (max.)	0.5 ms	0.5 ms	0.5 ms	0.5 ms	0.5 ms	0.5 ms	—
Signal On Delay, Max	35 ms	35 ms	35 ms	35 ms	35 ms	35 ms	15 ms (dc) 25 ms (ac)
Signal Off Delay, Max	45 ms	45 ms	45 ms	45 ms	45 ms	45 ms	15 ms (dc) 25 ms (ac)

* An ac input device must be compatible with SLC 500 input circuit inrush current. A current limiting resistor can be used to limit inrush current. However, the operating characteristics of the ac input circuit are affected.

AC Output Modules

Specifications	1746-OA8	1746-OA16	1746-OAP12
Number of Outputs	8	16	12
Points Per Common	4	8	6*
Voltage Category	120/240V ac		
Operating Voltage Range	85...265V ac @ 47...63 Hz		
Backplane Current (mA) at 5V	185 mA	370 mA	
Backplane Current (mA) at 24V	0 mA	0 mA	0 mA
Voltage Drop, On-State Output, Max.	1.50V @ 1.0 A	1.50V @ 0.50 A	1.2V @ 2.0 A
Load Current, Min.	10 mA	10 mA	10 mA
Current Leakage, Off-State Output, Max.	2 mA	2 mA	2 mA
Surge Current per Point (max.)	10.0 A for 25 ms		17.0 A for 25 ms
Signal On Delay, Max (resistive load)	1 ms	1 ms	1 ms
Signal Off Delay, Max (resistive load)	11 ms	11 ms	11 ms
Continuous Current per Point	1.0 A @ 30 °C (86 °F) 0.50 A @ 60 °C (140 °F)	0.50 A @ 30 °C (86 °F) 0.25 A @ 60 °C (140 °F)	2.0 A @ 30 °C (86 °F) 1.25 A @ 55 °C (131 °F) 1.0 A @ 60 °C (140 °F)
Continuous Current per Module	8.0 A @ 30 °C (86 °F) 4.0 A @ 60 °C (140 °F)		9.0 A @ 30 °C (86 °F) 6.0 A @ 60 °C (140 °F)

* The 1746-OAP12 features a fused common and blown fuse LED.

Relay Output Modules

Specifications	1746-OW4	1746-OW8	1746-OW16	1746-OX8
Number of Outputs	4	8	16	8
Points Per Common	4	4	8	individually isolated
Voltage Category	ac/dc Relay			
Operating Voltage Range	5...125V dc 5...265V ac			
Backplane Current (mA) at 5V	45 mA	85 mA	170 mA	85 mA
Backplane Current (mA) at 24V	45 mA	90 mA	180 mA	90 mA
Load Current, Min.	10 mA @ 5V dc			
Current Leakage, Off-State Output, Max.	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
Signal On Delay, Max (resistive load)	10 ms	10 ms	10 ms	10 ms
Signal Off Delay, Max (resistive load)	10 ms	10 ms	10 ms	10 ms
Continuous Current per Point	See relay contact ratings			
Continuous Current per Module	8.0 A ac 8.0 A/Common	16.0 A ac 8.0 A/Common		*

* Limit continuous current per module so that module power does not exceed 1440 VA.

Relay Contact Ratings

Cat. No.	Maximum Volts	Amperes *		Amperes ‡ Continuous	Volt-Amperes		
		Make	Break		Make	Break	
1746-OW4 1746-OW8 1746-OW16	ac	240V ac	7.5 A	0.75 A	2.5 A	1800 VA	180 VA
		120V ac	15 A	1.5 A			
	dc	125V dc	0.22 A †		1.0 A	28 VA	
		24V dc	1.2 A †		2.0 A		
1746-OX8	ac	240V ac	15 A	1.5 A	5.0 A	3600 VA	360 VA
		120V ac	30 A	3.0 A			
	dc	125V dc	0.22 A †		1.0 A	28 VA	
		24V dc	1.2 A †		2.0 A		

* Connecting surge suppressors across your external load extends the life of SLC 500 relay contacts. For recommended surge suppression when switching ac inductive loads, consult the *SLC 500 Modular Hardware Style User Manual*, publication 1746-UM011. Recommended surge suppression for switching 24V dc inductive loads is 1N4004 diode reverse wired across the load.

† For dc voltage applications, the make/break ampere rating for relay contacts can be determined by dividing the 28 VA by the applied dc voltage. For example, 28 VA/48V dc = 0.58 A for dc voltage applications less than 14V, the make/break ratings for relay contacts cannot exceed 2 A.

‡ The continuous current per module must be limited so the module power does not exceed 1440 VA.

Combination I/O Modules

Specifications	1746-IO4	1746-IO8	1746-IO12	1746-IO12DC
Number of Inputs	2	4	6	6
Number of Outputs	2	4	6	6
Points Per Common	2	4	6	6
Voltage Category	120V ac (Inputs) 100/120V ac (Relay Contact Outputs)			24V dc (Inputs) 100/120V ac (Relay Contact Outputs)
Operating Voltage Range	85...132V ac @ 47...63 Hz (Inputs) 5...265V ac @ 47...63 Hz / 5...125V dc (Outputs)			10...30V dc (Inputs) 5...265V ac @ 47...63 Hz / 5...125V dc (Outputs)
Backplane Current (mA) at 5V	30 mA	60 mA	90 mA	80 mA
Backplane Current (mA) at 24V	25 mA	45 mA	70 mA	60 mA
Continuous Current per Point	See Relay Contact Ratings for 1746-OW4 on page 15.		See Relay Contact Ratings for 1746-OW16 on page 15.	
Continuous Current per Module	4 A	8 A	8 A	8 A

1746-SIM Input Simulator

The 1746-SIM Input Simulator is designed for use on 16-channel 24V dc sinking and sourcing modules with removable terminal blocks, including 1746-IB16, 1746-ITB16, 1746-IV16, 1746-ITV16, and 1746-IN16. The input simulator provides 16 switches for simulating inputs to the SLC 500.

1746 Analog I/O Modules

Analog I/O modules feature user-selectable voltage or current inputs, backplane isolation, removable terminal blocks, and diagnostic feedback.

The 1746-NI4, -NIO4I, and -NIO4V input channels are filtered to reject high frequency noise and provide 14- to 16-bit (range-dependent) resolution.

All 4-channel analog output modules provide 14-bit resolution and a 2.5 ms conversion rate.

The 1746-FIO4I and -FIO4V have less input filtering and can sense more rapidly changing inputs. However, their input resolution is only 12-bit. Because the input filter on the 1746-FIO4I or -FIO4V may pass more electrical noise, you should thoroughly ground and shield the input transducer, its power supply, and cables.

The 1746-NI8 provides high accuracy and fast analog signal conversion. The 1746-NI8, -NI16I and -NI16V are high density analog input modules that are software configurable.

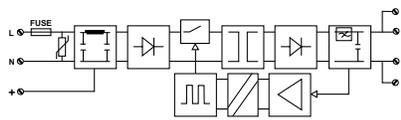
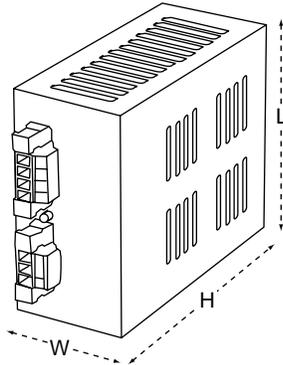
The 1746-NO8I (current output) and 1746-NO8V (voltage output) are high density, analog output modules that provide 8 individually configurable output channels with 16-bit resolution.

PanelView Plus Specifications

	PanelView Plus 400	PanelView Plus 600 Grayscale	PanelView Plus 600 Color		PanelView Plus 700	PanelView Plus 1000	PanelView Plus 1250	PanelView Plus 1500	
									
D I S P L A Y									
Type	Monochrome Passive Matrix, Film Compensated Super-Twist Nematic (FSTN)				Color Active Matrix Thin Film Transistor (TFT)				
Size	78 x 59 mm (3.7 in)	111 x 84 mm (5.5 in)	111 x 84 mm (5.5 in)		132 x 99 mm (6.5 in)	211 x 158 mm (10.4 in)	246 x 184 mm (12.1 in)	304 x 228 mm (15.1 in)	
Resolution	320 x 240, 32 level grayscale				640 x 480, 18-bit color graphics		800 x 600, 18-bit color graphics	1024 x 768, 18-bit color graphics	
Replaceable Backlight	No				Field Replaceable Backlight			No	
Operator Input	Keypad	Keypad, Analog Touch Screen, or Combination				Keypad, Analog Touch Screen, or Combination			
Function Keys	8 Function Keys, F1-F8	10 Function Keys, F1-F10	10 Function Keys, F1-F10		22 Function Keys, F1-F10 & K1-K12	32 Function Keys, F1-F16 & K1-K16	40 Function Keys, F1-F20 & K1-K20	40 Function Keys, F1-F20 & K1-K20	
Real time Clock	Battery-backed time clock timestamps critical data. Accuracy +/-2 minutes per month				Battery-backed clock timestamps critical data				
Memory Options Available Flash/RAM	Standard 32 MB/64 MB, Not Expandable				Standard: 32 MB/64 MB; Extended: 128 MB/128 MB (for full color bitmaps or recording data); Standard: Approx. 13 MB flash; Extended: 115 MB flash available for application storage				
E L E C T R I C A L									
Communication Port	RS-232 and (1) USB Only or Ethernet, RS-232, (1) USB, plus optional DH-485, DH+, or Remote I/O modules				Ethernet, RS-232, 2 USB plus optional DH +/DH-485/Remote I/O or ControlNet Modules				
Power Requirements	18-30 Vdc or 85-264 Vac @ 47-63 Hz				18-32 Vdc				
Power Consumption	DC Power: 25 Watts max. (1.0A @ 24 Vdc) AC Power: 60 VA max.				70 Watts max (2.9A@24 Vdc)				
Programming	RSView Studio for Machine Edition or RSView Studio Enterprise Series				RSView Studio for Machine Edition or RSView Studio Enterprise Series				
E N V I R O N M E N T A L									
Operating Temperature	0 - 55°C (32 - 131°F)				0 – 55°C (32 – 131°F)				
Storage Temperature	-25 – 70°C (-13 – 158°F)				-25 - 70°C (-13 - 158°F)				
Humidity	5 - 95%, noncondensing @ 0 - 55°C				5 – 95%, noncondensing @ 0 – 55°C				
Ratings	NEMA 12, 13, 4X ¹ , IP54, IP65				NEMA 12, 13, 4x ¹ , IP54, IP65				
Certifications	cUL certified; UL listed; Class 1, Div 2, Groups A, B, C, D; Class 2, Div 2, Groups F, G; Class 3, Div 1; CE marked; C-Tick				cUL certified; UL listed; Class 1, Div 2, Groups A, B, C, D; Class 2, Div 2, Groups F, G; Class 3, Div 1; CE marked; C-Tick				
M E C H A N I C A L									
Weight Keypad or Keypad/Touch	.562kg(1.24 lb)	.930kg (2.05 lb)	.930kg (2.05 lb)		1.9 kg (4.2 lb.)	2.9 kg (6.3 lb.)	3.4 kg (7.6 lb.)	4.6 kg (10 lb.)	
Weight Touch Only	N/A	.789kg (1.74 lb)	.789kg (1.74 lb)		1.7kg (3.8 lb.)	2.6 kg (5.7 lb.)	3.2 kg (7.1 lb.)	4.2 kg (9.3 lb.)	
Dimensions Overall (H x W x D)	Keypad: 152x185x90 mm (6.0x7.28x3.54 in)	Keypad or Keypad/Touch: 167x266x98 mm (6.58x10.47x3.86 in) Touch Only: 152x185x98 mm (6.0x7.28x3.86 in)				Keypad or keypad/touch: 193 x 290 x 55 mm (7.58 x 11.4 x 2.18 in) Touch only: 179 x 246 x 55 mm (7.04 x 9.68 x 2.18 in)	Keypad or keypad/touch: 248 x 399 x 55 mm (9.77 x 15.72 x 2.18 in) Touch only: 248 x 329 x 55 mm (9.77 x 12.97 x 2.18 in)	Keypad or keypad/touch: 282 x 416 x 55 mm (11.12 x 16.36 x 2.18 in) Touch only: 282 x 363 x 55 mm (11.12 x 14.3 x 2.18 in)	Keypad or keypad/touch: 330 x 469 x 65 mm (12.97 x 18.46 x 2.55 in) Touch only: 330 x 416 x 65 mm (12.97 x 16.37 x 2.55 in)
Cutout Dimensions	Keypad: 123x156 mm (4.86x6.15 in)	Keypad or Keypad/Touch: 142x241 mm (5.61x9.50 in) Touch Only: 123x156 mm (4.86x6.15 in)				Keypad or keypad/touch: 167 x 264 mm (6.57 x 10.39 in) Touch only: 154 x 220 mm (6.08 x 8.67 in)	Keypad or keypad/touch: 224 x 375 mm (8.8 x 14.75 in) Touch only: 224 x 305 mm (8.8 x 12 in)	Keypad or keypad/touch: 257 x 390 mm (10.11 x 15.35 in) Touch only: 257 x 338 mm (10.11 x 13.29 in)	Keypad or keypad/touch: 305 x 419 mm (12 x 16.5 in) Touch only: 305 x 391 mm (12 x 15.4 in)

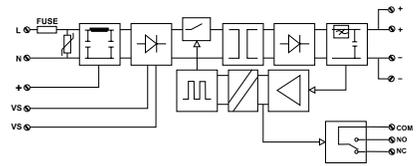
¹ check for availability of outdoor rating

CP-SNT 55W



Input Voltage	minimum	85Vac, 120Vdc
	typical	115-230Vac±10%, 50/60Hz
	maximum	265Vac, 300Vdc
Input Current	@115Vac	1.10A RMS ±10%
(average values for reference only)	@230Vac	0.55A RMS ±10%
	@125Vdc	590mA ±10%
	@250Vdc	315mA ±10%
Input Protection	fuse	2A slow blow (internal)
	inrush current	Thermistor
	overvoltage	Varistor
Switching Frequency		100kHz PWM
Efficiency @max. load		80%
Maximum Ripple		<50mV RMS
Regulation	load (10-100% load)	1%
	line	0.8%
Overload Protection		Overcurrent shutdown with automatic restart plus thermal shutdown
Max. Load Capacitance on output		10,000µF
Hold time	@115Vac	30ms
(full output current after loss of input)	@230Vac	180ms
Temperature:	storage	-40°C...+85°C
	operating	-20°C...+50°C full rated load derate: 24V-1.7A @60°C
Humidity	operating	20 to 85%RH non-condensing
	storage	20 to 90%RH
Galvanic Isolation	input to output	3kV
	input/output to rail	3kV
	input to ground	1.5kV
	output to ground	500V
Wire size		26-12AWG (0.1-4.0mm ²)
Dimensions in mm (length x width x height)		98 x 57 x 131
Weight		478g
Mounting		TS35 Rail, Chassis (consult factory)
Special Features		
Output voltage/max.current/catalog no.	24Vdc - 28Vdc / 2.3A	992748 0024
	48Vdc / 1.04A	992748 0048
	12Vdc - 15Vdc / 3A	992748 0012
	5Vdc / 3A	992748 0005
Approvals/Certifications		CSA, UL Listed, CE mark
		CSA Class1 Div 2 (992748 0024 only)

CP-SNT 160W



Input Voltage	minimum	85Vac / 195Vac
	typical	115Vac / 230Vac±10%,(selectable) 50/60Hz
	maximum	138Vac / 250Vac
Input Current	@115Vac	2.9A RMS ±20%
(average values for reference only)	@230Vac	1.45A RMS ± 20%
Input Protection	fuse	6.3A slow blow (internal)
	inrush current	Thermistor
	overvoltage	Varistor
Switching Frequency		65kHz PWM
Efficiency @max. load		85%
Maximum Ripple		0.2% RMS
Regulation	load (10-100% load)	2%
	line	0.5%
Overload Protection		Overcurrent shutdown with automatic restart and output overvoltage protection
Max. Load Capacitance on output		6,000µF
Hold time	@115Vac	30ms
(full output current after loss of input)	@230Vac	30ms
Temperature:	storage	-40°C...+85°C
	operating	-20°C...+50°C full rated load derate: 24V-5A @ 60°C
Humidity	operating	20 to 85%RH non-condensing
	storage	20 to 90%RH
Galvanic Isolation	input to output	3kV
	input/output to rail	3kV
	input to ground	1.5kV
	output to ground	500V
Wire size		26-12AWG (0.1-4.0mm ²)
Dimensions in mm (length x width x height)		127 x 57 x 175
Weight		880g
Mounting		TS35 Rail, Chassis (consult factory)
Special Features		Fault Relay (NO, C, NC), Load Sharing
Output voltage/max.current/catalog no.	24Vdc - 28Vdc / 6.5A	992534 0024
Approvals/Certifications		CSA, UL Listed, CE mark

Transmitter Specifications

FUNCTIONAL SPECIFICATIONS

Inputs

User-selectable. See "Transmitter Accuracy and Ambient Temperature Effects" on page 4 for sensor options.

Output

2-wire 4–20 mA, linear with temperature or input; digital output signal superimposed on 4–20 mA signal, available for a HART communicator or control system interface

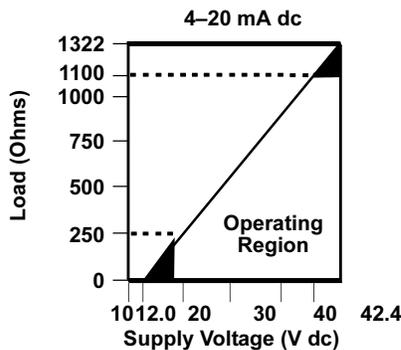
Isolation

Input/output isolation tested to 500 V ac rms (707 V dc) at 50/60 Hz

Power Supply

An external power supply is required for HART devices. The transmitter operates on 12.0 to 42.4 VDC transmitter terminal voltage with load resistance between 250 and 1100 ohms. A minimum of 17.75 VDC power supply is required with a load of 250 ohms. Transmitter power terminals are rated to 42.4 V DC.

$$\text{Maximum Load} = 40.8 \times (\text{Supply Voltage} - 12.0)$$



Humidity Limits

0–99% relative humidity, non-condensing

NAMUR Recommendations

The 248 meets the following NAMUR recommendations:

- NE 21 – Electromagnetic compatibility (EMC) for Process and Laboratory Apparatus
- NE 43 – Standard of the signal level breakdown information of digital transmitters
- NE 89 – Standard of temperature transmitters with digital signal processing

Transient Protection

The optional Rosemount 470 prevents damage from transients induced by lightning, welding, heavy electrical equipment, or switch gears. Refer to the 470 Product Data Sheet (document number 00813-0100-4191) for more information.

Temperature Limits

Operating Limit

- –40 to 185 °F (–40 to 85 °C)

Storage Limit

- –58 to 248 °F (–50 to 120 °C)

Turn-on Time

Performance within specifications in less than 5.0 seconds after power is applied to transmitter, when damping value is set to zero seconds.

Update Rate

Less than 0.5 seconds

Custom Alarm and Saturation Levels

Custom factory configuration of alarm and saturation levels is available with option code C1 for valid values. These values can also be configured in the field using a HART Communicator.

Software Detected Failure Mode

The values at which the transmitter drives its output in failure mode depends on whether it is configured to standard, custom, or NAMUR-compliant (NAMUR recommendation NE 43) operation. The values for standard and NAMUR-compliant operation are as follows:

TABLE 1. Operation Parameters

	Standard ⁽¹⁾	NAMUR NE43-Compliant ⁽¹⁾
Linear Output:	$3.9 \leq I \leq 20.5$	$3.8 \leq I \leq 20.5$
Fail High:	$21 \leq I \leq 23$ (default)	$21 \leq I \leq 23$ (default)
Fail Low:	$I \leq 3.75$	$I \leq 3.6$

⁽¹⁾ Measured in milliamperes

Certain hardware failures, such as microprocessor failures, will always drive the output to greater than 23 mA.

PHYSICAL SPECIFICATIONS

HART Communicator Connections

Communication Terminal: Clips permanently fixed to the terminals

Materials of Construction

Electronics Housing and Terminal Block

- Noryl® glass reinforced

Universal (option code U) and Rosemount® Connection (option code A) Heads

- Housing: Low-copper aluminum
- Paint: Polyurethane
- Cover O-Ring: Buna–N

BUZ Head (option code B)

- Housing: Aluminum
- Paint: Aluminum lacquer
- O-Ring Seal: Rubber

Mounting

The 248 installs in a connection head or universal head mounted directly on a sensor assembly or apart from a sensor assembly using a universal head. The 248 can also mount to a DIN rail using an optional mounting clip (see Table 13).



Model: ADAM-6521

5-port Industrial 10/100 Mbps Ethernet Switch with Fiber Port

Overview

The ADAM-6521 is a five-port industrial-grade 10/100 Mbps Ethernet Switch with fiber port. It allows you to expand your industrial network fast and cost-effectively. It converts between 10/100 Base-TX and 100 Base-FX segments of the same network. Moreover, ADAM-6521 supports auto crossover to make it flexible in a networking environment, connecting to network by any port. It provides three ways to be installed in any industrial environment: DIN Rail, panel, piggyback mounting. The ADAM-6521 also supplies +10 ~ 30 V DC operating voltage over the terminal block. Operating temperature is from 14 ~ 149°F (-10 ~ 65°C). All these functions make the ADAM-6521 more stable and reliable. Thus, the ADAM-6521 is especially suitable for industrial environments with Ethernet networking: semiconductor factory, inventory, conveyer and more.

Features

- Supports 10/100BASE-TX and 100BASE-FX network standard
- Supports full/half duplex flow control
- Supports Integrated loop-up engine
- Supports MDI/MDI-X auto crossover
- Provides broadcast storm protection
- Supports +10 ~ 30 V DC voltage
- Provides robust mountings: DIN rail, panel, piggy-back
- Supports operating temperature from 14 ~ 149°F (-10 ~ 65°C)
- Provides surge protection 3000 V DC for power line
- Transmission distance up to 2000 m with fiber

Flexible network connecting

ADAM-6521 is a 5-port Ethernet switch with fiber port for industry. It supports MDI/MDI-X auto crossover. The ADAM-6521 consists of one fiber and four RJ-45 ports. With fiber optic, it transmits speed up to 100 Mbps and can prevent noise interference from the system and transmission distance up to 2 km. Supports auto crossover to make it flexible networking environment. With this function, any port can uplink to switch or hub devices by either straight through cable or crossover cable. Unlike other switches, it provides users with easy and flexible network connecting.

Flexible mounting

Due to its versatility and innovative design, the ADAM-6521 can be installed in three ways: DIN rail, panel and piggyback mounting.

Advanced surge protection for power input

The ADAM-6521 supports wide-range voltage +10 ~ 30 V DC. It also provides 3000 V DC surge protection from damage by over-voltage. That makes the system more safe and reliable.

Wide-range operating temperature

An operating temperature from 14 ~ 149°F (-10 ~ 65°C) makes it suitable for use in most harsh environments.

Easy troubleshooting

6 LED indicators aid trouble-shooting in ADAM-6521. Each port has a pair of LEDs to indicate link status and port activity making it easy to detect link status, power failure and data receipt for on-site diagnostics.

International Headquarters:

B&B Electronics Mfg. Co. 707 Dayton Road P.O. Box 1040 Ottawa, IL 61350 USA
815-433-5100 Fax 433-5104 www.bb-elec.com orders@bb-elec.com support@bb-elec.com

B&B Electronics Ltd Westlink Commercial Park Oranmore Co. Galway Ireland
+353 91 792444 Fax +353 91 792445 www.bb-europe.com orders@bb-elec.com support@bb-europe.com