

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **AUTOMATIZACIÓN DE ESTERILIZADORES PARA PRODUCTOS ALIMENTICIOS ENLATADOS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Rigel N. Rangel B.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2008

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **AUTOMATIZACIÓN DE ESTERILIZADORES PARA PRODUCTOS ALIMENTICIOS ENLATADOS**

Prof. Guía: Ing. Tamara Pérez  
Tutor Industrial: Ing. Enrique Delgado

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Rigel N. Rangel B.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2008

## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 05 de noviembre de 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Rigel N. Rangel B., titulado:

### “AUTOMATIZACIÓN DE ESTERILIZADORES PARA PRODUCTOS ALIMENTICIOS ENLATADOS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Industrial, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Noel Díaz  
Jurado

Prof. Panayotis Tremante  
Jurado

Prof. Tamara Pérez  
Prof. Guía



## **DEDICATORIA**

**Este trabajo va dedicado a Dios, quien en los buenos momentos, en los más difíciles, en las risas, en los sueños, en el silencio, en las metas y en cada cosa que hago, está allí para darme la voluntad y el espíritu de continuar.**

## **RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS**

**Mis agradecimientos más profundos a Dios que me ha llenado de fe y me ha dado la oportunidad de estar junto a personas que me han dedicado lo mejor de ellas para llegar el final de esta etapa.**

**A mis padres por creer en mí y poner en mis manos las herramientas que me han permitido crecer personal y profesionalmente, a mi novia que me ha brindado su compañía y gratos momentos que sin duda contribuyeron a estar día a día dispuesto a enfrentar cualquier situación y seguir adelante, así como mis amigos que al pasar de los años me han dado su apoyo. A mi tutora de tesis que sin más me ofreció tiempo y paciencia para guiarme y que este trabajo pudiera culminarse. Finalmente gracias a mis compañeros de trabajo, así como a la empresa que proporcionó los medios técnicos para llevar a cabo esta investigación. A todos infinitas gracias porque fueron parte fundamental de este gran logro.**

**Rangel B., Rigel N.**

**AUTOMATIZACIÓN DE ESTERILIZADORES PARA PRODUCTOS  
ALIMENTICIOS ENLATADOS**

**Profesor Guía: Tamara Pérez. Tutor Industrial: Ing. Enrique Delgado. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Industrial. Institución: INTRAVE C.A. 2008. 105h. + anexos.**

**Palabras Claves:** Automatización de Esterilizadores; Método de Esterilización por Calor Húmedo; Control de Procesos; Controlador Lógico Programable.

**Resumen.** Se plantea el diseño de un sistema de control automatizado para el manejo de cuatro (4) máquinas esterilizadoras para productos enlatados. El diseño antes mencionado se implementó como parte de la primera fase de un sistema control y supervisión; en donde se cumplió con la etapa de la automatización, la programación del controlador lógico programable y la coordinación de todos los factores necesarios para que el control del sistema fuese posible. Finalizada la fase inicial, el sistema fue capaz de esterilizar productos, basándose en un sistema automático manejado por un grupo de parámetros inmersos en una lista de recetas seleccionables por el operador e impuestas por el departamento de producción y calidad de la empresa cliente. Posterior a la implementación y funcionamiento del sistema, se generan las proyecciones de una segunda etapa para ampliar las características de comunicación del sistema en vista de una posible conexión remota con el centro de control de la planta, para su supervisión, recolección y registro de información para el manejo de los históricos de los procesos de cada una de las máquinas.

# ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS .....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	vii
LISTA DE TABLAS .....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE GRÁFICAS .....	xvi
ACRÓNIMOS Y SIGLAS.....	xvii

## **CAPÍTULO I**

INTRODUCCIÓN .....	1
JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES .....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
OBJETIVOS .....	6

## **CAPÍTULO II**

MARCO REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
2.1. PRODUCTOS ENLATADOS.....	7
2.2. ESTERILIZACIÓN POR CALOR HUMEDO .....	8
2.2.1. Temperatura y tiempo de esterilización.....	10
2.2.2. Tiempo de esterilización como concepto estadístico.....	11
2.2.3. Tiempo de esterilización como concepto numérico.....	14
2.2.4. Relación presión - temperatura a vapor saturado.....	14

2.2.5.	Calentamiento de la máquina esterilizadora .....	19
2.2.6.	Enfriamiento de la máquina esterilizadora .....	22
2.3.	AUTOMATIZACION Y SISTEMAS DE CONTROL .....	28
2.3.1.	Control realimentado en la automatización .....	29
2.3.2.	Acción de control .....	30
2.3.3.	Respuesta de la salida .....	30
2.3.4.	Control ON/OFF .....	31
2.3.5.	Control proporcional integral derivativo (PID) .....	32
2.3.6.	Entonación de un lazo de control .....	41
2.4.	CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLCs).....	45
2.4.1.	Componentes de un PLC .....	46
2.4.2.	Modo de operación de un PLC.....	47
2.5.	INSTRUMENTACIÓN BASICA EN EL AUTOCLAVE .....	48
2.5.1.	Transductor de presión .....	48
2.5.2.	Sensor de temperatura .....	49
2.5.3.	Nivel de líquido .....	51
2.5.4.	Válvulas de control.....	52
2.6.	DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTOS (D.T.I) .....	54
 <b>CAPÍTULO III</b>		
	DESCRIPCIÓN DE CONTROLADOR .....	55
3.1.	SELECCIÓN .....	55
3.2.	PAQUETE DE PROGRAMACIÓN VISILOGIC™ .....	57
3.2.1.	Diagrama de escalera Visilogic™ .....	58
3.2.2.	Editor de pantallas Visilogic™ .....	59
 <b>CAPÍTULO IV</b>		
	DESARROLLO .....	61
4.1.	ALCANCE DEL PROYECTO .....	61
4.2.	ASIGNACIÓN DE FUNCIONES .....	62



4.3.	LEVANTAMIENTO DEL PROYECTO .....	63
4.3.1.	Requerimientos del cliente en funciones y operaciones .....	63
4.3.2.	Equipos, instrumentos y sensores .....	65
4.3.3.	Especificaciones para el control de instrumentos y sensores .....	67
4.3.4.	Diagrama D.T.I.....	68
4.3.5.	Número de entradas y salidas.....	70
4.3.6.	Selección de los módulos I/O del PLC .....	73
4.3.7.	Selección de módulos de expansión de entradas y salidas .....	74
4.4.	DISEÑO DEL AUTOMATISMO .....	78
4.4.1.	Etapa de purga del autoclave.....	78
4.4.2.	Etapa de levantamiento de temperatura .....	80
4.4.3.	Etapa de esterilización .....	81
4.4.4.	Etapa de levantamiento de presión .....	82
4.4.5.	Etapa de enfriamiento .....	82
4.4.6.	Final del proceso .....	83
4.4.7.	Estado de “parada de emergencia” .....	84
4.5.	PROGRAMACIÓN DEL PLC .....	84
4.5.1.	Área de programación del HMI.....	86
4.6.	PROYECCIÓN DE LA SIGUIENTE ETAPA.....	89
4.7.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	90
 <b>CAPÍTULO V</b>		
	PRUEBAS Y RESULTADOS FINALES .....	92
5.1.	RESULTADOS GENERALES .....	92
5.2.	TIEMPO DE PURGA .....	92
5.3.	CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROL PID .....	94
5.4.	SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA .....	95
5.5.	SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN .....	95
5.6.	INESTABILIDADES EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO.....	96

5.7. CIRCULACIÓN DEL AGUA REFRIGERANTE .....	97
5.8. ESTADO DE PARADA DE EMERGENCIA.....	98
CONCLUSIONES .....	99
RECOMENDACIONES.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
BIBLIOGRAFÍAS .....	104
ANEXOS	
[ANEXO N°1]	
[Manual de operaciones del sistema automatizado].....	107
[ANEXO N°2]	
[Modelos de PLC Vision120™] .....	139

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Puntos específicos de temperatura vs presión a vapor saturado. ....	16
Tabla 2. Obtención de parámetro Ziegler-Nichols a través de la curva de reacción. .	43
Tabla 3. Obtención de parámetros Ziegler-Nichols a través del período de oscilación crítico con ganancia crítica. ....	44
Tabla 4. Imágenes de las familias de PLCs Unitronics.....	56
Tabla 5. Recetas posibles a esterilizar.....	64
Tabla 6. Lazos de control PID. ....	70
Tabla 7. Entradas digitales del sistema. ....	71
Tabla 8. Salidas digitales del sistema.....	72
Tabla 9. Entradas analógicas del sistema.....	73
Tabla 10. Salidas analógicas del sistema. ....	73
Tabla 11. Cronograma de actividades para implementación del sistema. ....	91
Tabla 12. Resultados de las pruebas para el cálculo del tiempo de purga. ....	93
Tabla 13. Parámetros de los controladores PID.....	94
ANEXOS	
Tabla 14. Luces piloto en estado de espera.....	127
Tabla 15. Luces piloto en estado de receta seleccionada, en espera de inicio. ....	127
Tabla 16. Luces piloto en estado de etapa de purga.....	127
Tabla 17. Luces piloto en estado de etapa de calentamiento. ....	128
Tabla 18. Luces piloto en estado de etapa de esterilización. ....	128
Tabla 19. Luces piloto en estado de etapa de enfriamiento. ....	129
Tabla 20. Luces piloto en estado de etapa final del proceso. ....	129
Tabla 21. Luces piloto en estado de parada de emergencia.....	130
Tabla 22. Luces piloto en estado de modo manual. ....	130

Tabla 23. Configuración de las válvulas en estado de espera, fin de proceso y parada de emergencia.....	131
Tabla 24. Entradas analógicas (módulo IO-ATC-8).....	133
Tabla 25. Entradas digitales (módulo IO-DI16). ....	134
Tabla 26. Entradas digitales (OPLC). ....	134
Tabla 27. Salidas analógicas (módulo #1 IO-AO6X).....	135
Tabla 28. Salidas analógicas (módulo #2 IO-AO6X).....	136
Tabla 29. Salidas digitales (módulo #1 IO-RO8).....	136
Tabla 30. Salidas digitales (módulo #2 IO-RO8).....	136
Tabla 31. Salidas digitales (OPLC).....	137
Tabla 32. Puerto de comunicaciones del OPLC.....	138

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esterilizadores para productos alimenticios enlatados. ....	9
Figura 2. Deformaciones en los envases del producto por mala despresurización durante el enfriamiento. a) y b). ....	23
Figura 3. Control realimentado. ....	29
Figura 4. Tiempo de respuesta de la temperatura en un calefactor. ....	32
Figura 5. Sistema controlado con PID. ....	33
Figura 6. Diagrama de bloques de un controlador PID. ....	34
Figura 7. Diagrama esquemático de la función de un control PID sobre un proceso de control de temperatura. ....	35
Figura 8. Relación de la banda proporcional y el valor de consigna. ....	36
Figura 9. Relación entre la salida de control y banda proporcional. ....	36
Figura 10. Acción integral para eliminar el error en régimen permanente. ....	37
Figura 11. Respuesta de un control proporcional integral a lazo abierto ante un escalón. ....	38
Figura 12. Acción derivativa sobre la respuesta de un sistema. ....	39
Figura 13. Respuesta proporcional derivativa a lazo abierto. ....	40
Figura 14. Curva de respuesta para un relación de decrecimiento de 1/4. ....	42
Figura 15. Diagramas de bloques para la obtención de la curva de reacción del proceso. ....	42
Figura 16. Curva de reacción del proceso. ....	43
Figura 17. Diagrama de bloques para la obtención de la curva de oscilación crítica con ganancia crítica. ....	44
Figura 18. Período de oscilación crítico con ganancia crítica. ....	44
Figura 19. Composición básica de un PLC. ....	46
Figura 20. Ciclo de un PLC. ....	47

Figura 21. Transductor de presión de kilo pascales a corriente. ....	49
Figura 22. Componentes de una termorresistencia en encapsulado o termopozo industrial.....	50
Figura 23. Componentes de un termopar en encapsulado o termopozo industrial. ....	51
Figura 24. Controlador lógico programable Unitronics Vision120. ....	57
Figura 25. Escalera de programación.....	59
Figura 26. Interface de configuración y programación de las pantallas. ....	60
Figura 27. Diagrama de tuberías e instrumentos de un (1) Autoclave.....	69
Figura 28. Conexión de los módulos de expansión de entradas y salidas. ....	75
Figura 29. Módulo IO-DI16 de expansión de entradas digitales. ....	75
Figura 30. Módulo IO-RO8 de expansión de salidas digitales. ....	76
Figura 31. Módulo IO-ATC8 de expansión de entradas analógicas. ....	77
Figura 32. Módulo IO-AO6X de expansión de salidas analógicas.....	77
Figura 33. Diagrama de flujo general de un proceso de esterilización. ....	79
Figura 34. Rutinas en el navegador del proyecto y área de configuración un bloque PID. ....	85
Figura 35. Escalera de programación con las condiciones para el arranque de cada esterilizador.....	86
Figura 36. Pantallas en el navegador del proyecto y de programación de una pantalla. ....	87
Figura 37. Diagrama de navegación por las pantallas programadas en el PLC.....	88
<b>ANEXOS</b>	
Figura 38. OPLC Vision 120. ....	110
Figura 39. Módulo de comunicación EX-A1.....	110
Figura 40. Módulo de expansión de salidas a relé IO-RO8.....	111
Figura 41. Módulo de expansión de salidas analógicas IO-AO6X.....	111
Figura 42. Módulo de expansión de entradas digitales IO-DI16. ....	112
Figura 43. Módulo de expansión de entradas analógicas IO-ATC8. ....	112
Figura 44. Imagen del OPLC Vision 120. ....	113
Figura 45. Tablero de control.....	114

Figura 46. Pantalla de inicio.....	115
Figura 47. Pantalla de clave de acceso.....	116
Figura 48. Pantalla de clave errada. ....	117
Figura 49. Pantalla de selección del autoclave.....	117
Figura 50. Pantalla de menú autoclave 1. ....	118
Figura 51. Pantalla de visualización del proceso autoclave 1.....	118
Figura 52. Pantallas de receta autoclave 1. ....	120
Figura 53. Pantalla de menú modo manual autoclave 1.....	121
Figura 54. Pantalla de parada de emergencia (botón presionado). ....	122
Figura 55. Pantalla de parada de emergencia (alta temperatura). ....	123
Figura 56. Pantalla de parada de emergencia (alta presión).....	123
Figura 57. Pantalla de parada de emergencia (baja temperatura). ....	124
Figura 58. Diagrama de flujo de pantallas. ....	125
Figura 59. Descripción de la función de las luces piloto. ....	126
Figura 60. Pantalla de bloqueo de menú de recetas. ....	132

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Temperatura del autoclave vs temperatura del producto. ....	11
Gráfica 2. Microorganismos sobrevivientes en función del tiempo. ....	13
Gráfica 3. Presión de vapor saturado de agua vs Temperatura. ....	17
Gráfica 4. Curva de calentamiento convencional. ....	20
Gráfica 5. Curva de calentamiento progresivo.....	21
Gráfica 6. Curva de enfriamiento convencional. ....	24
Gráfica 7. Curva de enfriamiento con líquido refrigerante sin alta presión.....	25
Gráfica 8. Curva de enfriamiento con líquido refrigerante y alta presión. ....	27



## ACRÓNIMOS Y SIGLAS

®:	Registered Trademark (Marca Registrada).
Br:	Bachiller.
CA:	Compañía Anónima.
DTI:	Diagrama de Tuberías e Instrumentos.
HMI:	Human Machine Interface (Interfaz Hombre Máquina).
ISA:	Instruments Society of America (Sociedad de Instrumentistas de América).
ISO:	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Estandarizaciones).
P&ID:	Piping and Instruments Diagram (Diagrama de Tuberías e instrumentos) y Process and Instrumentation Diagram (Diagrama de proceso e instrumentación).
P:	Control Proporcional.
PD:	Control Proporcional Derivativo.
PI:	Control Proporcional Integral.
PID:	Control Proporcional Integral Derivativo.
PLC:	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable).
SCADA:	Supervisory Control and Data Acquisition (Control supervisor y adquisición de datos).
™:	Trademark (Marca Registrada).
UCV:	Universidad Central de Venezuela.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años han aparecido y se han desarrollado muchos componentes, nuevas funciones, aplicaciones y redes de comunicación industrial, para el desarrollo de la automatización industrial, factores que han permitido construir sistemas bajo la premisa de diferentes soluciones y de tiempos mínimos.

INTRAVE, C.A., empresa dedicada al diseño e implantación de tecnología para la automatización industrial, requiere desarrollar un proyecto donde se desea controlar cuatro (4) esterilizadores de alimentos enlatados de una empresa dedicada a la producción de comestibles de procedencia marina, como los son el atún, la sardina, la pepitona y otros, los cuales deben ser debidamente esterilizados antes de pasar a la fase de etiquetado y almacenaje para posteriormente ser colocados a la venta en el mercado venezolano.

Debido a lo expuesto anteriormente se requiere crear un diseño adecuado para la automatización de dicho proyecto, en el cual se abarquen los siguientes aspectos: especificar el alcance del mismo en cuanto a magnitud de entradas, salidas, procesos y expansión; recolección de datos del proceso; creación del manual de operaciones; selección y operación de los tipos de instrumentos y equipos a utilizar así como sus accesorios, tipo de montaje, cableado, configuración, programación del controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés), ajustes, puesta en marcha del sistema y recomendaciones para futuras etapas.

Dentro del marco del presente documento en el capítulo I se presenta la introducción, la justificación y antecedentes, el planteamiento del problema y los objetivos; en el capítulo II se muestran los elementos teóricos principales y fundamentales para el desarrollo del presente trabajo de grado; en el capítulo III se

introducen aspectos básicos del sistema sobre el cual se va a realizar la programación así como el modelo del PLC a utilizar en el automatismo; en el capítulo IV se expone el desarrollo y diseño del proyecto, los detalles del sistema, el diagrama de tuberías e instrumentos (P&ID) y los diagramas de flujo; en el capítulo V se presentan los resultados obtenidos; y por último las conclusiones y recomendaciones de todo lo referido con el presente trabajo de grado.

## JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

Los sistemas de control y automatización forman parte importante de la cadena productiva de procesos, controlando y generando información crítica para el análisis y la eficiencia de los procesos productivos; de ahí la importancia de una correcta integración de estos sistemas a las diferentes actividades dentro de una empresa.

Sin embargo, estos sistemas no pueden crearse por sí mismos, siempre requieren de labores de diseño, programación, configuración e implementación que se adecuen a las necesidades específicas del proceso; dichas labores deben ser desarrolladas basándose en sistemas de control y automatización; para aumentar la calidad y productividad.

INTRAVE C.A., es una empresa que se dedica a la integración de soluciones de control, automatización, y supervisión de procesos, estando preparados para ofrecer soluciones que contribuyan con una adecuada integración de sus sistemas, satisfaciendo las necesidades de las diferentes áreas, incluyendo el departamento de validación (también llamado departamento de producción); presentado a sus cliente soluciones personales, eficientes, interesantes y completamente documentadas, sin dejar atrás el mantenimiento programado y la garantía de un soporte técnico. Entre sus clientes, tienen empresas del ramo alimenticio, que exigen procedimientos que no permiten interpretaciones incorrectas de los parámetros y/o normas, lo que original la realización de éste trabajo de grado.

Como antecedente, se ha encontrado información referida a la automatización de procesos relacionados con productos alimenticios en la Universidad Central de Venezuela (UCV) donde Avelino Gilberto Dos Reis De Abreu desarrolló el Trabajo de Grado “Automatización de la Línea de Producción de Alimentos a Escala”; el cual incluye un proceso por etapas para la automatización de una línea productora de galletas a través de un PLC, lo cual se relaciona con el

proyecto de automatización de máquinas esterilizadoras en cuestión, ya que en ambos, el proceso se ejecuta por etapas las cuales son controladas por el programa del PLC; pero en éste antecedente, el autor desarrolla una maqueta a diferencia del presente trabajo de grado que tiene como objetivo la implementación del sistema.

Relacionado a la parte de control proporcional integral derivativo (PID) dentro de un proceso controlado por un PLC, se encuentra en la UCV la Tesis de Grado “Modernización del Sistema de Control de un Generador de Vapor en la empresa Agroindustrias Lesmi Utilizando un Controlador Industrial” presentada por Juan G. Misle S., el cual puede servir como marco de referencia del trabajo a desarrollar, debido a la parte del proceso donde se maneja un control de temperatura a través de un PID; la diferencia principal es que se controlan calderas y en el presente trabajo de grado se automatizan esterilizadores de productos alimenticios.

Estos antecedentes marcan una línea dentro de la automatización de procesos en el área de alimentos en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Se requiere el diseño, planificación e implementación de un proyecto de automatización industrial para un proceso de esterilización de productos enlatados, debido a que la empresa requiere colocar otra línea de máquinas esterilizadoras para aumentar la cantidad, la calidad y la eficiencia en la producción.

Actualmente el cliente desea agregar cuatro (4) máquinas esterilizadoras a la línea de producción de su planta principal, las cuales ya posee construidas y disponibles pero que en el pasado en esos equipos se realizaban procesos de esterilización de forma totalmente manual.

La magnitud del proyecto en general puede abarcar varias etapas, la finalidad de este trabajo de grado es implementar la primera etapa o fase inicial, la cual conlleva el funcionamiento totalmente automático de las cuatro (4) máquinas esterilizadoras. Como una posible segunda etapa está la implementación de un sistema supervisorio remoto de monitoreo en tiempo real, y el registro histórico de las variables principales del proceso, esto con el fin de validar cada uno de los lotes de producción esterilizados.

Debido a la ubicación de la empresa, posterior al levantamiento y análisis del proyecto, estas máquinas esterilizadoras serán inspeccionadas para evitar problemas a la hora de la implementación, ya que la empresa cliente se encuentra en el interior del país, más específicamente en el Estado Sucre, y el proyecto en sí se realizará desde las oficinas de INTRAVE ubicadas en el Distrito Capital, con dos posibles visitas a la empresa cliente, una para recolección de información y levantamiento del proyecto, y la segunda para la implementación final de la primera fase del automatismo. Adicionalmente se cuenta con la colaboración y comunicación vía medios electrónicos de la directiva y de la gerencia general de la planta para información bidireccional, y para la disposición de su departamento de mantenimiento mecánico y eléctrico para la realización de las distintas instalaciones que sean necesarias.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Desarrollar, diseñar e implantar un sistema de control automático de máquinas esterilizadoras para productos alimenticios enlatados.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Definir, estructurar y desglosar las etapas que conlleva la realización del proyecto de automatización en cuestión.
- Crear la documentación del proyecto que incluye planos, esquemas así como el manual de operaciones y mantenimiento del sistema.
- Implantación de la etapa inicial o preliminar del diseño propuesto.
- Proyectar la siguiente etapa del proyecto.

## CAPÍTULO II

### MARCO REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1. PRODUCTOS ENLATADOS

Nicolás Appert a comienzos del siglo XIX descubrió, de forma totalmente empírica, que podían conservarse los alimentos durante varios años, simplemente colocándolos en envases sellados e impermeables al ambiente y posteriormente calentándolos por cierto período de tiempo. Este fue el nacimiento de la tecnología industrial de conservación, que a partir del siglo XIX supuso acceso de todas las clases sociales a alimentos asequibles y de calidad [1].

Posteriormente fue Pasteur el que demostró que este tipo de productos se conservaban debido a la muerte de los microorganismos durante el calentamiento de los mismos, ya que, estos agentes biológicos causaban el deterioro del alimento [1].

Los productos enlatados no solo logran conservarse por largos períodos de tiempo, también se ha encontrado que existe una significativa disminución de los ácidos grasos saturados debido al intercambio de estos con el aceite en el cual se conserva el alimento dentro del enlatado [2].

Por otra parte, los ácidos grasos insaturados, conocidos por tener reacciones que invalidan totalmente el poder nutritivo de los alimentos; es un efecto no deseable y la mejor forma para disminuir este problema es la conservación en lata de acero con atmósfera inerte, ya que así no puede actuar la radiación lumínica, que daría lugar a la formación de radicales libres, catalizadores de todo el proceso. Adicionalmente, cuando la temperatura de esterilización o de calentamiento no supera los 135°C, los nutrientes tampoco sufren alteraciones. En consecuencia, los ácidos de elevado



interés nutricional, permanecen prácticamente inalterados durante el periodo de vigencia de la conserva [2].

Durante el procesado de la conservación no se alteran las vitaminas liposolubles, A, D, E y K [2]. Nada de lo indicado anteriormente tendría interés, si durante el proceso de fabricación-conservación se modificasen las características físicas visuales como el color, olor, apariencia del pescado y, en general, en cualquier conserva de carne o vegetal, ya que existiría un rechazo natural a la hora del consumo. En cualquier clase de conserva enlatada esto no tiene lugar, por lo que un aspecto apetitoso y un valor nutritivo pleno, justifican la importancia de estos productos en la nutrición moderna.

Finalmente el producto enlatado es un alimento fresco que ha sido esterilizado, a veces cocinado, y colocado en un envase igualmente esterilizado, cerrado de modo duradero y perfectamente hermético.

## **2.2. ESTERILIZACIÓN POR CALOR HUMEDO**

La esterilización es el proceso de destrucción de los microorganismos, sean cuales sean sus características, siendo lo mismo que sean patógenos o no, que estén sobre el material o dentro de él [3].

La esterilización por calor húmedo se realiza en una máquina esterilizadora (autoclave), como la mostrada en la Figura 1, mediante vapor saturado a presión. El autoclave es en su forma más básica un aparato provisto de una llave y manómetro para regular la presión y la temperatura.



**Figura 1. Esterilizadores para productos alimenticios enlatados.**

El vapor saturado por sí solo no esteriliza, se requiere someter el autoclave a una presión mayor que la atmosférica, lo que aumenta la temperatura del vapor, siendo de esta forma como se consigue la destrucción de todos los microorganismos; el vapor saturado debe estar sometido a una temperatura y tiempo determinados [3].

El vapor penetra en la cámara de esterilización, alcanza la presión deseada y se condensa por contacto con los materiales fríos. Esta condensación libera calor, humedeciendo y calentando simultáneamente cada material. Por ello es necesario que no haya aire en el autoclave, lo que se consigue succionando el mismo por medio de un sistema de vacío ó introduciendo el vapor de forma brusca, para así forzar la salida del aire por el escape (venteo) del autoclave [3].

Los materiales que pueden esterilizarse por calor húmedo son: textiles secos (ropas, vestidos, paños, gasas, algodones). Materiales duros: (envases, bateas, contenedores, etc.). Materiales que no pueden esterilizarse por calor húmedo: todos los que contengan sustancias grasas, materiales térmicamente sensibles como gomas y plásticos.

La esterilización por calor húmedo es una forma segura y económica, que entre sus características tiene como ventajas y desventajas principales las siguientes:

Ventajas:

- No deja residuos tóxicos.
- Es rápida.
- Es cómoda, ya que los autoclaves son automáticos.

Desventajas:

- Corroe los materiales metálicos.
- Deteriora los materiales de goma o plástico.
- Requiere mucho tiempo para la preparación de paquetes, bultos y también requiere mucho cuidado en la carga del autoclave.
- Hay que colocar el material de forma adecuada, dejando espacio suficiente para la entrada del vapor saturado de forma uniforme dentro de la cámara.

### **2.2.1. Temperatura y tiempo de esterilización**

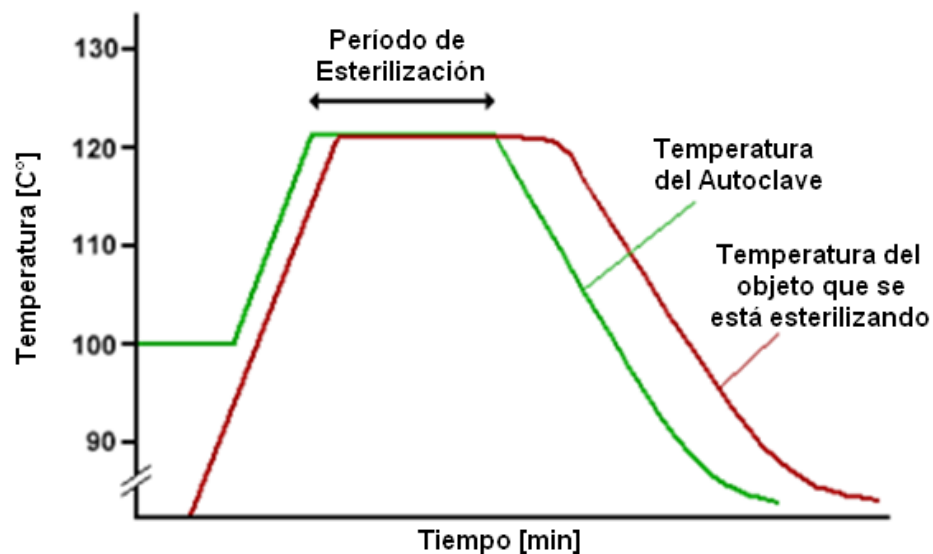
Los niveles de temperaturas y tiempos de esterilización dependen de cada tipo de producto y envasado, estos puntos de operación deben ser calculados con sumo cuidado, y por personal altamente calificado en esa materia. En las secciones siguientes (2.2.2 y 2.2.3), se resumen dos (2) formas para calcular estos parámetros, y se observa la dificultad para la obtención de los mismos [4].

La correcta selección de los parámetros de esterilización, repercuten en la calidad del producto y en la eficiencia de la producción, por ejemplo, un excesivo tiempo de esterilización puede generar la pérdida de propiedades importante en los nutrientes del producto [4].

“Para asegurar la esterilidad en la producción de alimentos enlatados, es necesario conocer la dinámica de calentamiento del producto a esterilizar. Si el tratamiento térmico es excesivo, el alimento pierde valor nutritivo, debido a la disminución de su contenido vitamínico y puede adquirir características sensoriales indeseables, tales como aroma y sabor a quemado, además de la consiguiente pérdida

de proteínas y carbohidratos. En caso contrario, si no se esteriliza adecuadamente el alimento, existe el peligro de que se desarrollen microorganismos” [5].

Como se muestra en la Gráfica 1, durante el proceso de esterilización por calor húmedo se debe tener en cuenta que el tiempo de esterilización comienza cuando se ha alcanzado la temperatura óptima en el interior del autoclave, y que generalmente el contenido de un autoclave puede requerir tiempos más largos para alcanzar la temperatura de esterilización, pero a su vez puede requerir tiempos más largos para su enfriamiento, esto dependerá también del método de enfriamiento aplicado, ver sección 2.2.6 [4].



Gráfica 1. Temperatura del autoclave y temperatura del producto vs tiempo.

### 2.2.2. Tiempo de esterilización como concepto estadístico

A continuación se resume la forma por la cual la se podría realizar el proceso de cálculo del parámetro de tiempo de esterilización, basado en un concepto estadístico y en unas constantes determinables. Claro está no se hace hincapié en este concepto, lo que se desea observar es que el cálculo de estos tiempos requiere de un estudio profundo y se aleja del objetivo principal de este Trabajo de Grado.

La cantidad de tiempo a la cual sea sometido el producto es directamente proporcional a la muerte de microorganismos, es decir, a mayor tiempo mayor muerte de los mismos. Como se muestra en la ecuación (1), este proceso es asintótico y por lo tanto nunca se llega a eliminar el 100% de los microorganismos [6].

$$N = N_0 \cdot e^{-Kt} \quad (1)$$

Donde:

**N:** número de microorganismos viables.

**N<sub>0</sub>:** número de microorganismos viables iniciales.

**K:** tasa de muerte. “Este coeficiente es función de las condiciones de esterilización y de la resistencia del microorganismo al proceso de esterilización” [6].

**t:** tiempo de exposición al agente.

En la ecuación (2) se muestra la expresión que utiliza el término “tiempo de reducción decimal”, tiempo requerido para reducir la población microbiana un 90% o un orden de magnitud [6].

$$N = N_0 \cdot 10^{-t/D} \quad (2)$$

Donde:

**D:** se denomina Tiempo de reducción decimal.

El valor de D se deduce cuando  $t=D$  y por lo tanto  $N=0.1 N_0$ . Evaluando lo anterior en la ecuación (1), se obtiene la siguiente expresión:

$$D = \ln 10 / K = 2.303 / K \quad (3)$$

En la ecuación (3) se puede observar como **D** es inversamente proporcional a **K**, por lo tanto, la eliminación de los microorganismos dependerá del tiempo **D** al que

sean expuestos. “La pendiente de la recta está determinada por las condiciones de esterilización y de la resistencia del microorganismo” [6].

El logaritmo del número de microorganismos sobrevivientes en función del tiempo de exposición a un determinado agente esterilizante, da como resultado una recta, ver Gráfica 2. La pendiente está dada por  $-1/D$  y la ordenada al origen es  $\log N_0$ .



Gráfica 2. Microorganismos sobrevivientes en función del tiempo [6].

Es decir, cuando el valor del logaritmo del número de sobrevivientes sea -1 significa que hay 0.1 microorganismos viables por unidad, o correctamente expresado una unidad contaminada por cada 10 unidades idénticas procesadas [6].

Por ejemplo, un producto en general se puede considerar estéril cuando la probabilidad de encontrar unidades contaminadas es menor o igual a  $10^{-6}$ , esto es, una unidad contaminada por millón de unidades idénticas procesadas [6].

Dependiendo del microorganismo y el estado donde se encuentre, se requerirá de mayor o menor tiempo de esterilización, para así conseguir la población de microorganismos vivientes deseada, para que el producto se pueda considerar estéril.

### **2.2.3. Tiempo de esterilización como concepto numérico**

Referente al producto que se va a esterilizar en el presente Trabajo de Grado, el cual, en todas sus diferentes líneas, siempre es de tipo alimenticio enlatado, cabe mencionar esta sección, donde se resume la dinámica del envasado y se menciona el tiempo que puede demorar el interior del producto para alcanzar la temperatura óptima de esterilización.

La dinámica del punto frío de la lata, usualmente se determina de forma experimental, colocando sensores de temperatura en varios lugares cuidadosamente seleccionados del recipiente, posteriormente la lata se somete al tratamiento térmico en el autoclave y durante todo el proceso se registra la temperatura contra el tiempo, lo que permite inferir la ubicación del punto frío que es el que va a determinar el tiempo de tratamiento para asegurar la esterilidad adecuada [7].

Existe un modelo matemático para el transporte de calor en medios porosos, utilizando el método del Promedio Volumétrico; el cual posee como ventajas (aplicadas al problema de transferencia de calor en la esterilización de alimentos) que no es necesario conocer los coeficientes locales de transferencia de calor, los cuales son difíciles de medir experimentalmente; y que las ecuaciones resultantes son similares a las empleadas en sistemas conocidos [8]-[9].

### **2.2.4. Relación presión - temperatura a vapor saturado**

El proceso de esterilización por calor húmedo implica la utilización de una atmósfera libre de aire y llena de vapor saturado, lo que genera una relación directa entre la temperatura y la presión [3], esto es una ventaja importante que posee el proceso para así comprobar a través de medidores de temperatura y presión, qué tan puro es el vapor en el interior del autoclave, propiedad que puede ser de gran ayuda a la hora de verificar el nivel de purga de aire que posee el sistema, así como detectar algún problema en la calidad del vapor de agua saturado.

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua expresada en porcentaje del total que la atmósfera puede tener a una temperatura determinada. A mayor temperatura, mayor es la cantidad de vapor que puede contener [10].

El vapor saturado es parecido al aire con un 100% de humedad relativa. Si el vapor saturado es enfriado, el agua se condensará y se transformará en líquido. El vapor saturado tiene otra propiedad importante, la presión ejercida por el vapor saturado es constante para una determinada temperatura y va a variar en directa relación con esta temperatura; esto es, a mayor temperatura habrá mayor presión y viceversa [10].

Cuando un esterilizador está en operación, se debe controlar la temperatura en la cámara del esterilizador y la presión será el indicativo de que tan buena fue la extracción del aire. La presión absoluta se refiere a la lectura de la presión en relación a un vacío. La presión indicada en el manómetro es la presión del manómetro o presión relativa, no la presión absoluta. La presión del manómetro es igual a la presión absoluta menos la presión atmosférica o presión barométrica, como se expresa en la ecuación (4).

$$p_{rel} = p_{abs} - p_{atm} \quad (4)$$

Donde:

**$p_{rel}$** : presión relativa.

**$p_{abs}$** : presión absoluta.

**$p_{atm}$** : presión atmosférica.

De esta forma la presión del manómetro, es la presión dentro de la cámara del esterilizador en relación a la presión atmosférica. Cuando la puerta del esterilizador se abre, la presión del manómetro es cero. Cuando la puerta se cierra, el vapor que entra primero empuja el aire hacia fuera. En seguida, la presión sube hasta igualar, por ejemplo, 15 psig de "sobrepresión" o presión del manómetro [3].



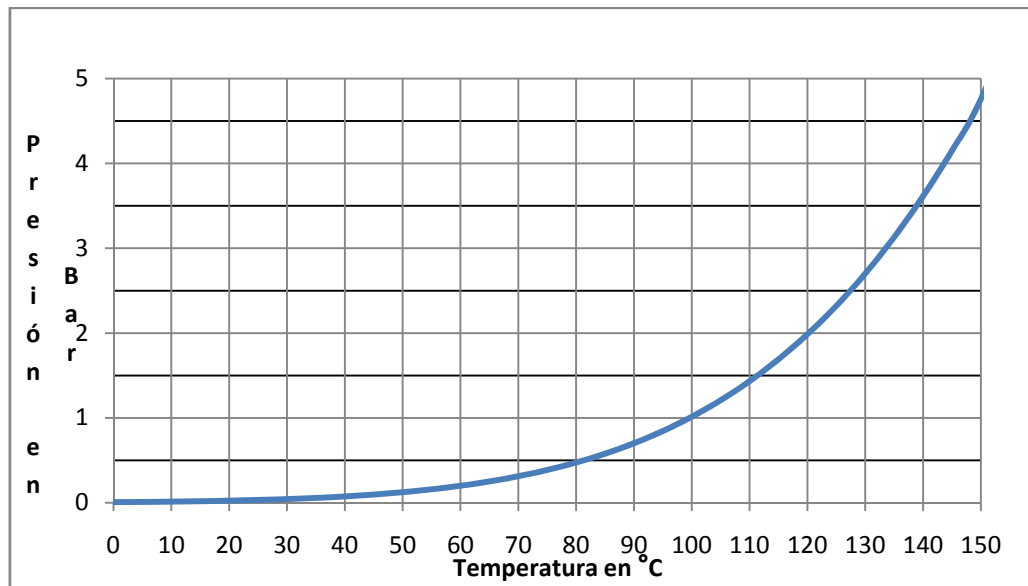
Esta relación entre la temperatura y la presión del vapor saturado es constante y es una propiedad física del vapor de agua. La Tabla 1 muestra la relación de las condiciones comúnmente encontrada en los hospitales; uno puede usar la presión del manómetro y la temperatura equivalente para evaluar la operación del esterilizador, tomando en cuenta que estos valores son considerados a nivel del mar.

**Tabla 1. Puntos específicos de temperatura vs presión a vapor saturado [3].**

Temperatura °C	Presione en psig
121 °C	15.1
132 °C	27.2
135 °C	30.7
140 °C	38.6

Si el vapor es saturado, la temperatura y presión de la cámara van a estar correlacionadas. Si la presión excede a la temperatura, esto significa que el vapor o la cámara pueden contener aire. Si la presión es más baja de lo que indique la relación, existe un posible sobrecalentamiento [10], lo que significa que el vapor está seco y que la transferencia del calor está siendo poco efectiva y será muy ineficiente como esterilizador.

A continuación se presenta en la Gráfica 3 la relación presión de vapor de agua saturado versus temperatura.



**Gráfica 3. Presión de vapor saturado de agua vs Temperatura [11].**

#### **2.2.4.1. Características del vapor de agua saturado**

Si las características del vapor no son óptimas, disminuye la eficiencia en la transferencia del calor y por lo tanto falla el proceso de esterilización [3]. La pureza del vapor, la saturación y la disponibilidad del vapor son importantes variables del proceso.

Otras impurezas que puede contener el vapor incluyen óxido y sarro producido por la dureza del agua entre otros [3]. Existen opiniones diversas si éstas influyen en forma significativa en el resultado de la esterilización. Se sabe que algunas impurezas pueden oxidar los instrumentos del equipo.

#### **2.2.4.2. Pureza del vapor**

En algunos casos se encuentran gases en el vapor puro que pueden condensarse y estar compuestos por dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno o en

combinación formando aire. Desde el punto de vista de la esterilización, estos gases y el aire representan un problema de impureza importante [3].

Otro aspecto importante en la pureza del vapor, es la calidad del vapor o saturación. Esto se refiere a la cantidad de humedad en el vapor. La calidad del vapor es medida en términos de presencia de agua como mezcla sobresaturada versus el vapor seco o sobrecalentado.

#### **2.2.4.3. Suministro de vapor**

Las variaciones en la presión de vapor pueden afectar el tiempo que demora la cámara en alcanzar una temperatura uniforme. Las variaciones de la presión pueden deberse a filtros tapados, deficiencia en el diseño de las líneas o excesiva demanda de vapor. Pueden presentarse problemas cuando empieza el clima frío y el vapor se ocupa para otras funciones.

#### **2.2.4.4. Aire de la cámara**

La eficiencia de la esterilización con vapor está relacionada con la rapidez y la eficacia con que se remueve el aire de la cámara. Los esterilizadores que remueven el aire por gravedad, son menos eficientes que los esterilizadores con pre-vacío [3].

El aire atrapado dentro de la cámara del esterilizador es uno de los problemas más serios en el proceso de esterilización. Las fluctuaciones de la temperatura dentro de la cámara, son frecuentemente signos de que el aire ha sido removido en forma incompleta. Frecuentemente las bolsas de aire no son detectadas por el control normal de la temperatura, debido a que la temperatura por lo general se mide en zonas que no reflejan la totalidad del producto que se encuentra dentro de la máquina esterilizadora [12].

La ineficiencia en la remoción del aire de la cámara hace que algunos artículos dentro de la cámara demorarán mucho en alcanzar la temperatura deseada, lo que normalmente no es detectado por los sensores de temperatura. Casi todas las cargas en un esterilizador dejan sitios más fríos, lo que varía con la composición de la carga y la cantidad de carga. Como una forma de compensar las posibles pequeñas fallas que puedan presentarse, el fabricante del esterilizador o el departamento de producción encargado de esta área diseña los ciclos de esterilización con un tiempo de exposición que es el doble o más del requerido [12]. El análisis del conjunto de los controles mecánicos, biológicos y químicos ayudan a evaluar la efectividad del ciclo.

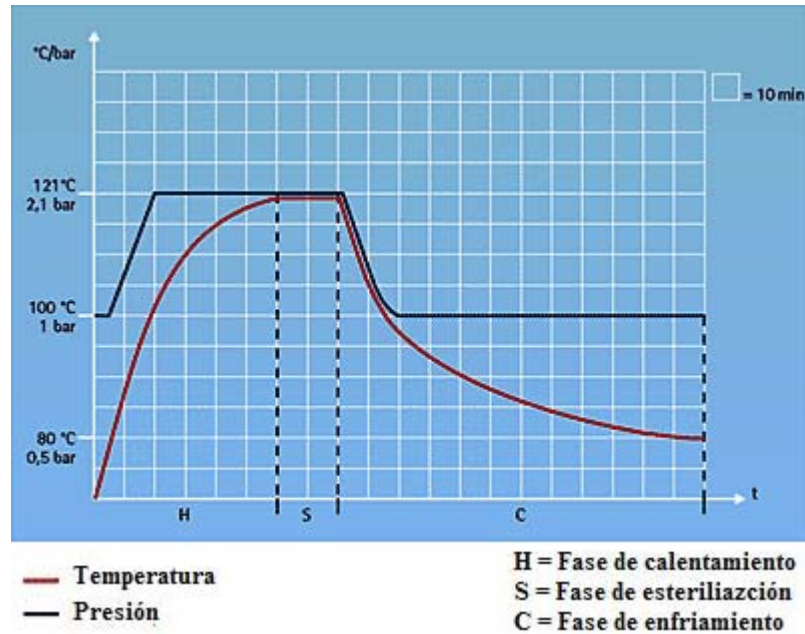
### **2.2.5. Calentamiento de la máquina esterilizadora**

Como ya se mencionó, la esterilización de un producto a través del método por calor húmedo requiere mantener una temperatura constante por un tiempo determinado a una presión adecuada. Antes de llevarse a cabo esa etapa se requiere llegar a dicha temperatura, para la cual se pueden aplicar diferentes acciones de calentamiento presentadas en las secciones 2.2.5.1 y 2.2.5.2.

#### **2.2.5.1. Calentamiento convencional**

Durante el calentamiento se regula la entrada de vapor saturado para que nunca supere la presión adecuada a la temperatura de esterilización [12]-[13]. Como ejemplo se presenta el caso de la Gráfica 4 donde la temperatura deseada de esterilización es de 121°C, es decir, con vapor de agua saturado se generará una presión adecuada para esterilizar de 15 psig (2.1 bar). El sistema debido a 3 posibles condiciones no supera la presión requerida para esterilizar. La primera, el diseño instrumental y de control de la máquina esterilizadora no tiene la capacidad de generar o controlar sobrepresión más allá de su punto de operación; la segunda, es que el sistema regula la presión debido a parámetros de diseño del fabricante; la

tercera, es que, simplemente, los productos a esterilizar son extremadamente delicados.



Gráfica 4. Curva de calentamiento convencional [13].

Ventajas:

- Fabricación y control del sistema más simple.

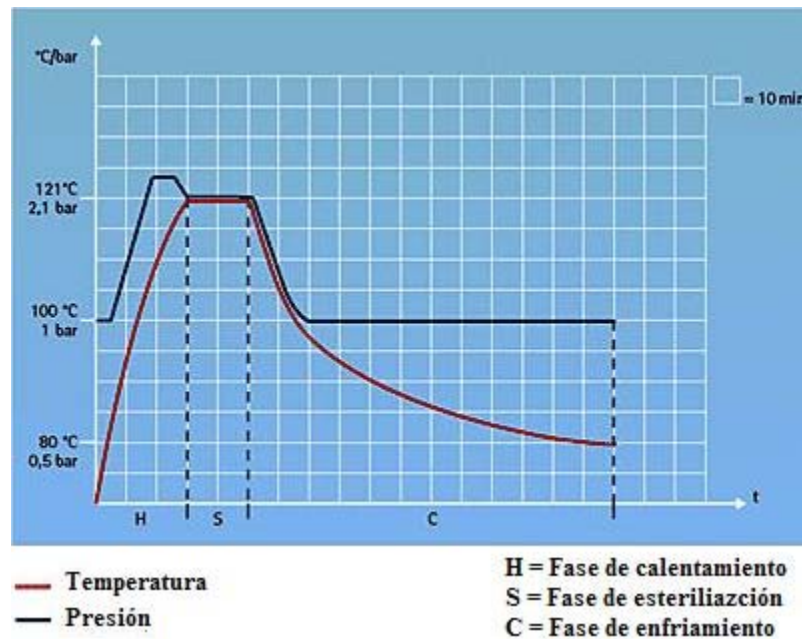
Desventajas:

- Mayor tiempo de esterilización.
- Probablemente no soporte un enfriamiento a alta presión (sección 2.2.6).
- Método que requiere más tiempo para realizar la fase de calentamiento.

### 2.2.5.2. Calentamiento progresivo

En este tipo de calentamiento, ver Gráfica 5, prácticamente se utiliza todo el poder de la línea de vapor que le llega al autoclave y no se toman precauciones por

sobre presión, lo que genera durante el calentamiento, una sobre presión en el autoclave debido a la inercia térmica de la máquina, que el controlador debe regular a medida que se acerca al punto de operación de temperatura del proceso [13]. La sobrepresión al final del calentamiento, no es la causa de la disminución del tiempo de ascenso de la temperatura, sino, la fuerza calórica que se inyecta desde la línea de vapor.



Gráfica 5. Curva de calentamiento progresivo [13].

Ventajas:

- Disminución del tiempo de calentamiento, por tanto, disminución del tiempo total de esterilización.
- Aumento de producción.
- Método de calentamiento más eficiente.

Desventajas:

- Incremento del costo de fabricación, debido a modificaciones mecánicas y de control del sistema.

### **2.2.6. Enfriamiento de la máquina esterilizadora**

Básicamente, después de un proceso de esterilización, se requiere el enfriamiento del autoclave (máquina esterilizadora), y por consecuencia la disminución simultánea de la temperatura del producto que se encuentra en su interior. La forma más simple de realizar esta tarea, es dejar que el autoclave se enfríe de manera natural, es decir, apagando la fuente calórica y dejando que la temperatura se nivele con la del ambiente.

Este método, en autoclaves industriales (de gran tamaño) es inviable; debido a que la inercia térmica del gran número de productos en su interior, es decir, del sistema, provocaría que el tiempo de enfriamiento fuera extremadamente largo y la eficiencia en la producción sería muy pobre.

Durante la etapa de enfriamiento y dependiendo del poder o velocidad del enfriamiento (tipo de enfriamiento, secciones 2.2.6.1, 2.2.6.2 y 2.2.6.3), la presión debe ser controlada hasta llegar a 0 psig (presión atmosférica), debido a que entre el interior del envasado y la cámara del autoclave se puede generar una presión diferencial excesiva, a causa, de la inercia térmica del producto y de la velocidad del enfriamiento, ya que, al disminuir la temperatura dentro del autoclave automáticamente la presión disminuye, pero dentro del envase esto no ocurre al mismo tiempo [3]-[12].

Una presión diferencial excesiva puede causar daños y deformaciones en el envase, por lo tanto, no se puede despresurizar de forma inmediata la cámara del autoclave porque el producto puede hincharse o explotar (ver Figura 2a); ni mucho menos la presión de control debe ser excesiva ya que puede comprimirse el envase (ver Figura 2b).

Los límites de presiones diferenciales y en consecuencia el control de presión en la etapa de enfriamiento dependerán de cada tipo de envase y producto [3]-[12].



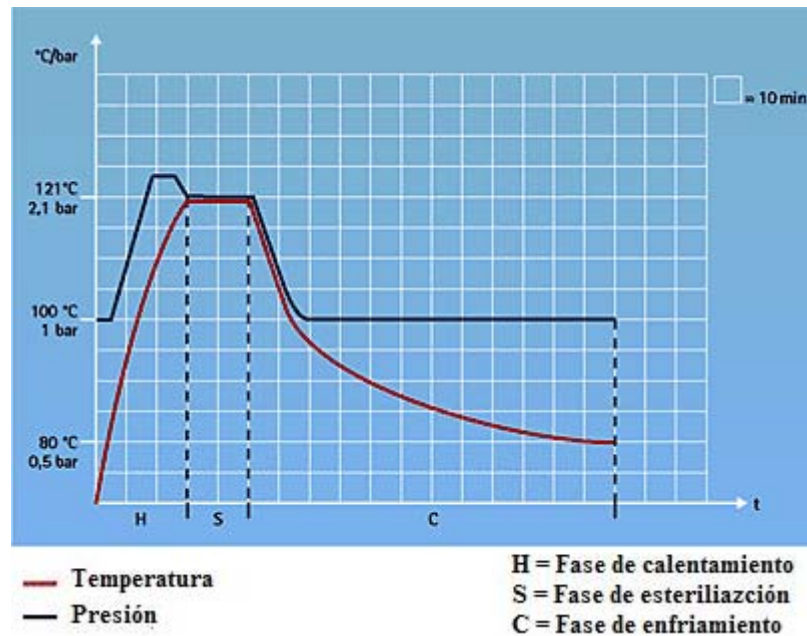
**Figura 2. Deformaciones en los envases del producto por mala despresurización durante el enfriamiento. a) y b).**

#### **2.2.6.1. Enfriamiento convencional**

El método convencional, no realiza ninguna función especial para lograr que la fase de enfriamiento se ejecute en menor tiempo, simplemente ejecuta la disminución de calor en el interior del autoclave, a través de la interacción e intercambio de calor con el ambiente [12]-[13].

En el ejemplo de la Gráfica 6 se observa como en la “fase C” durante los 10 primeros minutos el sistema es enfriado a presión regulada hasta llegar a 1 bar; esto con el fin de evitar daño a los productos sensibles a cambios bruscos de temperatura y presión, ya que al despresurizar el autoclave, éste se contamina con aire a temperatura ambiente ocasionando un cambio violento de temperatura, el cual podría deformar el producto.





Gráfica 6. Curva de enfriamiento convencional [13].

Ventajas:

- Sistema de control más sencillo.
- Probablemente se reduzcan los costos de fabricación al no tener sistema de enfriamiento y/o soportar alta presión para enfriar su contenido.
- Debido a la simpleza del enfriamiento, es probable que no se requiera control de presión, ya que, la misma se auto-controla. Una disminución en la temperatura implica disminución de la presión y debido a la lentitud de la etapa la presión diferencial nunca es excesiva [3]-[10].

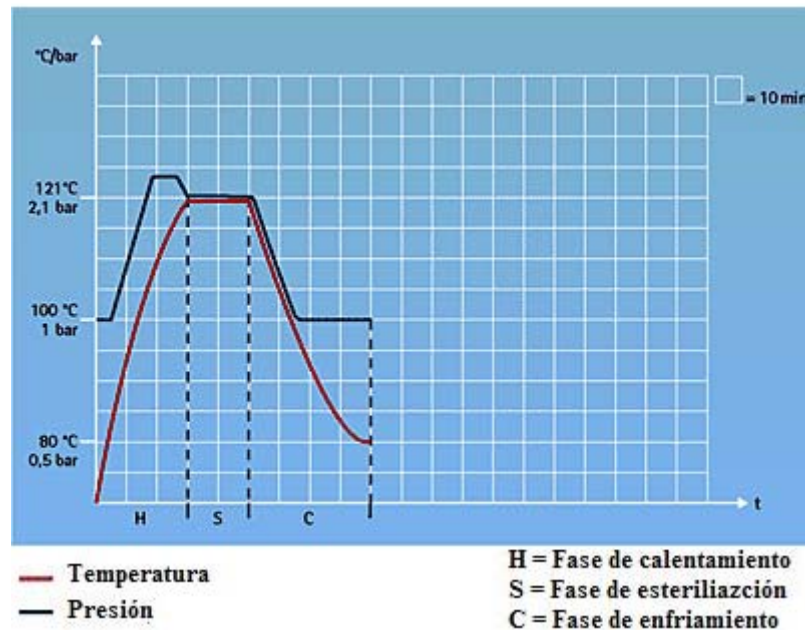
Desventajas:

- Dependiendo de la carga que tenga el esterilizador, el tiempo de enfriamiento puede llegar a ser extremadamente largo.
- Método lento de enfriamiento.
- Método con poca eficiencia para una producción constante.

### 2.2.6.2. Enfriamiento con líquido refrigerante sin alta presión

A diferencia del método convencional, este sistema de enfriamiento utiliza agua fría o agua a temperatura ambiente, para disminuir la temperatura del producto de manera más rápida y eficiente [12]-[13].

Se puede observar en la Gráfica 7, como el tiempo de la “fase C” es disminuido en comparación al método convencional. La caída de temperatura es aproximadamente constante hasta 80 °C. Este efecto es causado debido a que a menor temperatura, el líquido refrigerante va perdiendo eficiencia en quitarle el calor al producto, porque la temperatura del producto se comienza a acercar a la temperatura del refrigerante. De otra manera, teniendo un líquido refrigerante a menor temperatura, se puede aumentar la eficiencia del enfriamiento, pero quizá esto implique encarecer el proceso. Adicionalmente la resistencia del envase puede limitar que tan brusco debe ser el enfriamiento.



Gráfica 7. Curva de enfriamiento con líquido refrigerante sin alta presión [13].

Ventajas:

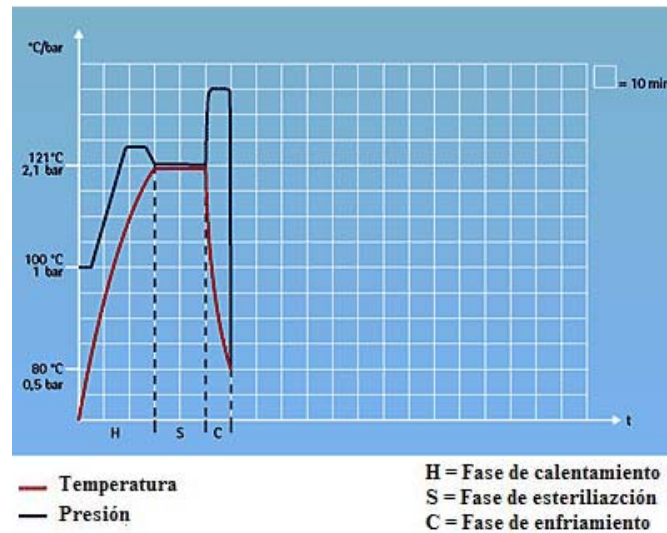
- Menor tiempo de enfriamiento.
- Posible utilización como líquido refrigerante el agua a temperatura ambiente.
- Si el líquido refrigerante es recirculatorio, existe la posibilidad de incorporar un radiador, o sistema que realice la misma función, para mantener la temperatura del refrigerante lo más baja posible.

Desventajas:

- Dependiendo de la sensibilidad del producto a deformaciones por cambios de temperatura acentuados, debido al choque térmico del refrigerante con el envase, a pesar de que se esté controlando la presión; la pendiente máxima de enfriamiento puede tener un límite.
- Método poco eficiente para enfriar el producto.
- Requiere de un equipo más costoso y de una instalación más compleja que el método convencional.

### **2.2.6.3. Enfriamiento con líquido refrigerante y alta presión**

Teniendo la misma filosofía que en el método anterior (sección 2.2.6.2), además de la utilización de líquido refrigerante; se incorpora la propiedad de utilizar alta presión. Al aumentar la presión, se evita que en ciertos productos con envasado capaz de soportar alta presión, ocurran deformaciones por cambio brusco de temperatura, permitiendo la utilización de la máxima capacidad refrigerante que se tenga, disminuyendo al máximo el tiempo de enfriamiento [12]-[13].



Gráfica 8. Curva de enfriamiento con líquido refrigerante y alta presión [13].

Como se observa en la Gráfica 8; al aumentar la presión (en determinados envases), ya no existe la posibilidad de deformación, entonces se procede a refrigerar el mismo a través de líquido refrigerante. Dependiendo de la temperatura del líquido refrigerante, es posible lograr verdaderos tiempos mínimos en la fase de enfriamiento.

Ventajas:

- Menor tiempo de enfriamiento que los métodos anteriores.
- La pendiente de enfriamiento depende de la calidad refrigerante del líquido que se utilice y no de la sensibilidad a deformaciones que tenga el producto.
- Posible utilización como líquido refrigerante el agua a temperatura ambiente.
- Si el líquido refrigerante es recirculatorio, existe la posibilidad de incorporar un radiador, o sistema que realice la misma función, para mantener la temperatura del refrigerante lo más baja posible.
- Es uno de los métodos más eficientes.

Desventajas:

- Solo es aplicable a productos con envases que no se deformen por altas presiones.
- Mayor costo por fabricación y diseño del control.

### **2.3. AUTOMATIZACION Y SISTEMAS DE CONTROL**

La automatización es un sistema de control diseñado con el fin de usar la capacidad de las máquinas para llevar a cabo determinadas tareas anteriormente efectuadas por seres humanos, y para controlar la secuencia de las operaciones sin intervención humana [14].

En la industria de alimentos envasados, algunos productos se elaboran por lotes. Por ejemplo, se carga una máquina esterilizadora con un lote de productos envasados y se procede a introducir la receta de esterilización del producto para que posteriormente un sistema automático realice todo el proceso, hasta tal punto, que al final el producto tenga una temperatura tan baja que pueda ser etiquetado inmediatamente.

El control sobre un sistema automático es fundamental, debido a que como su nombre lo indica es el encargado de que el sistema automático funcione correctamente. El diseño de control de cada automatismo va a depender principalmente del proceso como tal, de las variables que intervienen en el mismo, y del alcance que se desee realizar en cuanto a precisión, sensibilidad e inversión en el sistema [15].

Para realizar control sobre un proceso automático, existen principalmente dos maneras de realizarlo, la digital y la analógica. Dependiendo de cada proceso es posible ligar ambas formas de control para así obtener los resultados deseados [15].

Existen factores externos que puedan modificar las condiciones de diseño del mismo; como lo son el factor económico y productivo.

Al llevar a cabo la función de control, el controlador automático usa la diferencia entre el valor de consigna y las señales de medición para obtener la señal de salida. La precisión y capacidad de respuesta de estas señales es la limitación básica en la habilidad del controlador para controlar correctamente la medición.

### 2.3.1. Control realimentado en la automatización

Un elemento esencial de todos los mecanismos de control automático es el principio de realimentación, que permite al diseñador dotar a una máquina de capacidad de autocorrección. Un ciclo o bucle de realimentación es un dispositivo mecánico, neumático o electrónico que detecta una magnitud física como temperatura, presión, nivel u otros; la compara con las condiciones de funcionamiento establecidas, y realiza aquellas acciones pre-programadas necesarias para mantener el sistema dentro de los límites impuestos, propiedad que no poseen los controles no realimentados [14]. En la Figura 3 se puede observar un diagrama de bloques de un control realimentado.

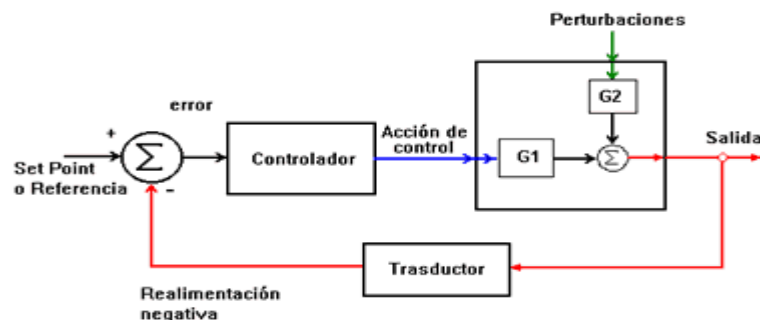


Figura 3. Control realimentado.

### **2.3.2. Acción de control**

Dependiendo de la acción del proceso, un incremento en la medida puede requerir incrementos o disminuciones del valor de la señal de salida para el control. Todos los controladores pueden ser conmutados entre acción directa o inversa. La acción directa significa que cuando el controlador ve un incremento de señal desde el transmisor, su salida se incrementa. La acción inversa significa que un incremento en las señales de medición hacen que la señal de salida disminuya [16].

El primer paso es determinar la acción de la salida. Por ejemplo, por razones de seguridad una válvula neumática que inyecte vapor debe cerrarse si existe un fallo en el suministro de aire para el control de la válvula. Por lo tanto, la misma debe ser normalmente abierta con aire, y normalmente cerrada sin aire [16].

Segundo, considerando el efecto de un cambio en la medición. Por ejemplo, para disminuir la temperatura del esterilizador el caudal de vapor debería ser reducido, por lo tanto, la válvula deberá cerrarse. Para cerrar esta válvula, la señal del controlador automático hacia la válvula debe disminuir, por lo tanto el controlador requiere una acción inversa [16]. Si se eligiera la acción directa la señal del controlador automático debería incrementarse dando como resultado un aumento del caudal de vapor, haciendo que la temperatura se incremente. El resultado sería un descontrol en la temperatura. Una selección incorrecta de la acción del control siempre resulta en un lazo de control inestable tan pronto como el mismo es puesto en marcha.

### **2.3.3. Respuesta de la salida**

El controlador automático usa cambios en la señal de medición para controlar la señal de salida, es decir, mantener el punto de operación. El control de cualquier proceso es función de lo bien que una señal de medición responde a estos

cambios en la salida del controlador. En la Figura 4 se observa la respuesta de la temperatura dentro de un calefactor cuando la válvula de vapor es abierta y cerrada.

El proceso puede ser caracterizado por dos elementos de su respuesta, el primero es el tiempo muerto (dead time, por su significado en inglés), o sea, el tiempo antes de que la medición comience a responder. Segundo, la capacidad de un proceso, específicamente, la constante de tiempo, que es definido como el tiempo necesario para completar el 63% de su respuesta total [16]. Combinados con el tiempo muerto, los mismos definen cuanto tiempo lleva para que la señal responda a cambios en la posición de la válvula.

#### **2.3.4. Control ON/OFF**

Este tipo de control encendido/apagado (on/off, por su significado en inglés) es mostrado en la Figura 4, donde se puede observar el accionamiento de la salida “calentador” (representando la variable que calienta el sistema) como de encendido y apagado. Para un controlador de acción inversa y una válvula del tipo on/off. El controlador tiene dos salidas que son para máxima apertura y para apertura mínima o válvula cerrada. Para este sistema se ha determinado que cuando la medición cae debajo del valor de consigna, la válvula se abra; en caso de que esté por encima del valor de consigna la válvula se cierre [16].

Adicionalmente se observa en la Figura 4 como se utiliza un ciclo de histéresis para controlar la variable del proceso, es decir, el encendido y apagado de la válvula no es ejecutado justo en el punto de operación sino un delta más arriba para cerrar y un delta más abajo para abrir; esto podría evitar el daño prematuro del sistema de instrumentación del proceso debido a los numerosos accionamientos, a causa de la filosofía del control [16].



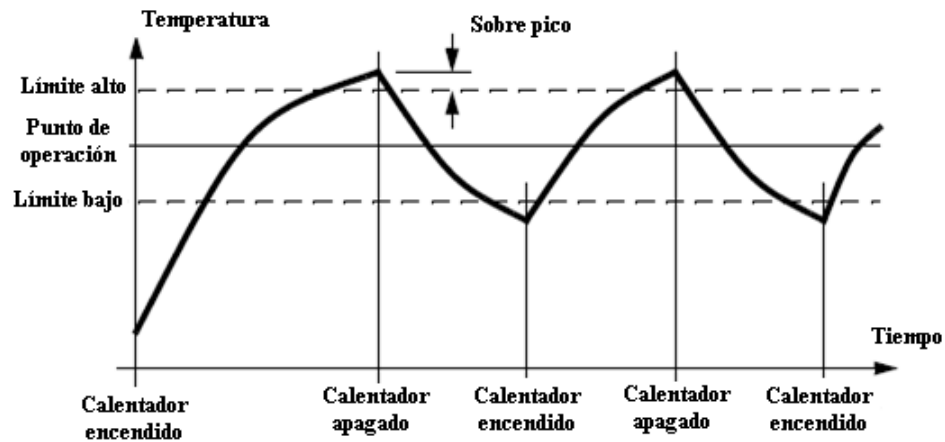


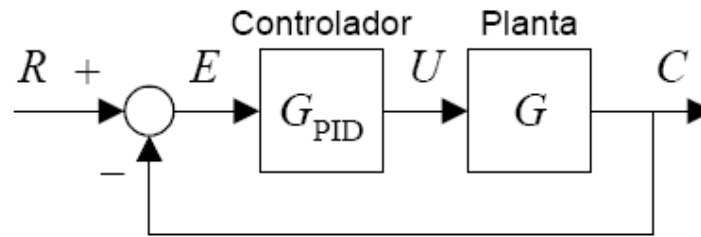
Figura 4. Tiempo de respuesta de la temperatura en un calefactor [16].

Este ciclo continuará indefinidamente, debido a que el controlador no puede balancear el suministro contra la carga. La continua oscilación puede o no ser aceptable, dependiendo de la amplitud y longitud del ciclo. El tiempo de cada ciclo dependerá de dos factores; primero del tiempo muerto del proceso y el ancho de la histéresis. El período de la señal depende de cada proceso, debido a la rapidez con que la señal de medición cambia durante cada ciclo [17].

Si el proceso en sí requiere para su buen control una amplitud y frecuencia de ciclo dañina para el actuador del sistema, la forma de control proporcional deberá ser aplicada (ver sección 2.3.5).

### 2.3.5. Control proporcional integral derivativo (PID)

El controlador proporcional-integral-derivativo, o controlador PID, es un dispositivo de control genérico donde el diseñador sólo tiene que dar valores adecuados, según lo requiera la situación, a los distintos parámetros que contiene.



**Figura 5. Sistema controlado con PID.**

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 5, representa un sistema controlado por un sistema PID, en donde R es el valor de consigna o punto de operación; E la señal de error que posee la medición con respecto al punto de operación;  $G_{PID}$  el controlador PID encargado de realizar la lógica de control; U la salida del controlador aplicada sobre la planta para reducir en lo posible el error del sistema; G la planta que representa la función de transferencia del sistema a controlar; y por último C es la medición del parámetro a controlar en el proceso, es decir, en la planta [18].

Este tipo de control se presenta en diferentes modos, la respuesta proporcional es la base de los tres modos de control, si los otros dos, acción integral y acción derivativa están presentes, éstos son sumados a la respuesta proporcional. [15]. Las ecuaciones básicas generales del control PID se presentan a continuación (ecuaciones (5) y (6)):

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int e(t) dt + Kd \cdot \left(\frac{de(t)}{dt}\right) \quad (5)$$

$$u(t) = Kp \cdot \left[e(t) + \frac{1}{Ti} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + Td \cdot \frac{de(t)}{dt}\right] \quad (6)$$

Donde:

$u(t)$ : variable de control o salida del PID.

$e(t)$ : error del sistema o medición menos valor de consigna.

$Kp$ : constante proporcional.

$Ki$ : constante integrativa.

Ti: tiempo integral

Kd: constante derivativa.

Td: tiempo derivativo.

En la Figura 6 se puede observar el diagrama de bloques de un control PID dentro de un proceso cualquiera, también llamado configuración paralela por como se representa el mismo [15].

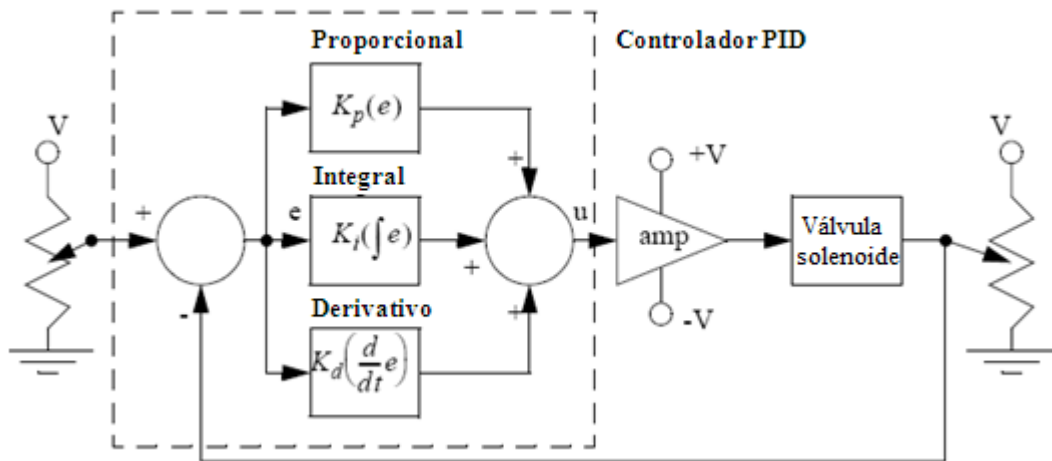


Figura 6. Diagrama de bloques de un controlador PID [15].

En la Figura 7 se presenta el esquema donde se puede observar la función que ejerce el control PID sobre un proceso.

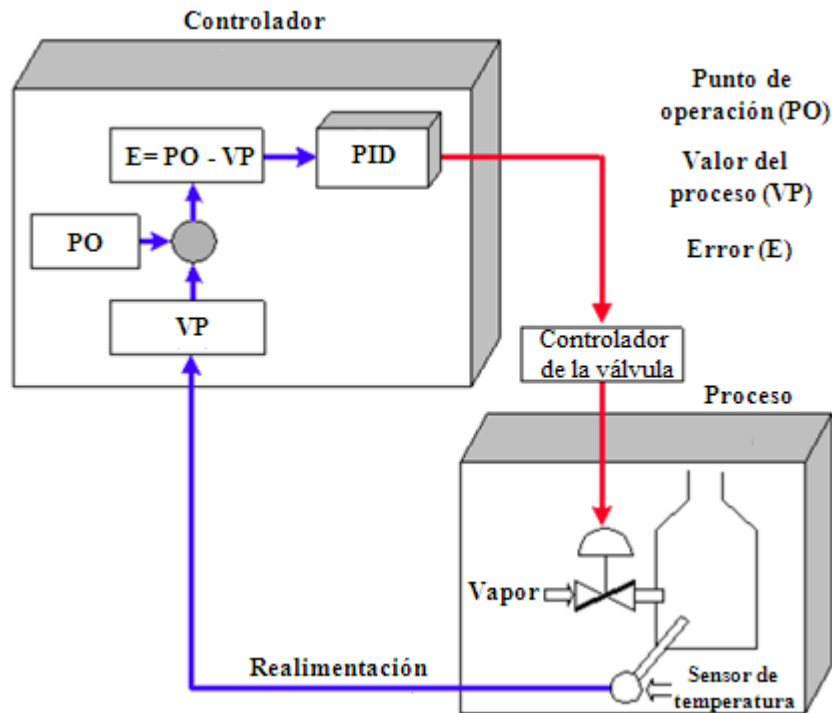


Figura 7. Diagrama esquemático de la función de un control PID sobre un proceso de control de temperatura [19].

### 2.3.5.1. Acción proporcional (P)

Proporcional significa que el cambio presente en la salida del controlador es algún múltiplo del porcentaje de cambio en la medición. Este múltiplo es llamado “ganancia” del controlador [16]. Para algunos controladores, la acción proporcional es ajustada por medio del ajuste de ganancia, mientras que para otros se usa el término “banda proporcional”. Ambos tienen los mismos propósitos y efectos.

La “banda proporcional” es un rango definido en torno al punto de consigna, se expresa como un porcentaje del valor del proceso total. Cuando la medición se encuentra dentro de ese rango, el control proporcional entra en ejecución, ver Figura 8. La banda proporcional puede superar el 100% del rango del proceso. En ese caso, el control proporcional se aplica a todo el rango [19].

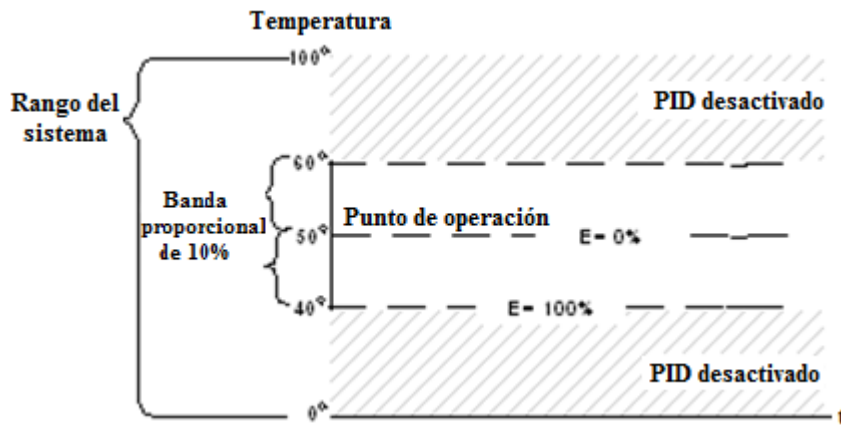


Figura 8. Relación de la banda proporcional y el valor de consigna [19].

Para cada valor de la banda proporcional se define una relación entre la medición y la salida. Por cada valor de medición existe un valor específico de salida. En la Figura 9, se observa esta relación para una acción directa o inversa.

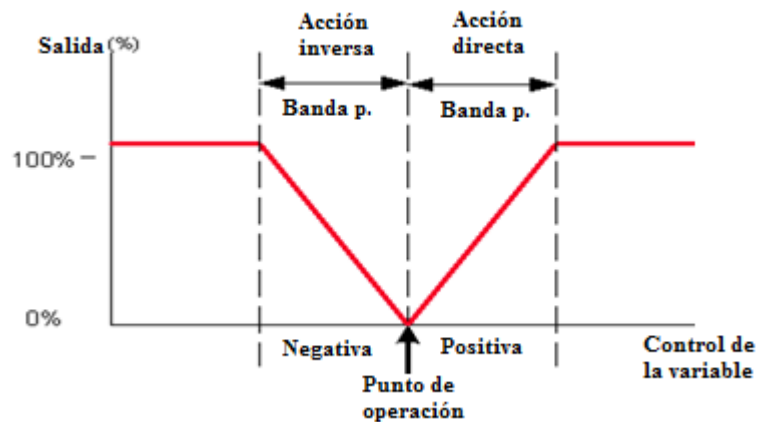


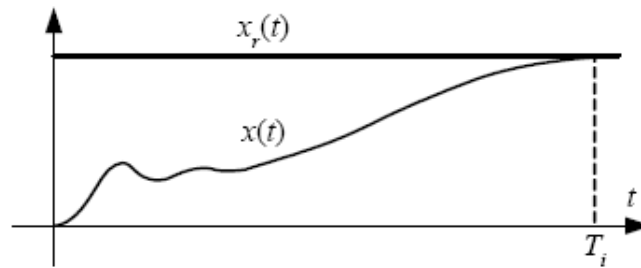
Figura 9. Relación entre la salida de control y banda proporcional [19].

### 2.3.5.2. Acción proporcional integral (PI)

También llamado acción integral o reset, cuando cualquier error “e” exista entre la medición y el valor de consigna, la acción integral hace que la salida comience a cambiar y continúe cambiando en tanto el error exista. Esta función,

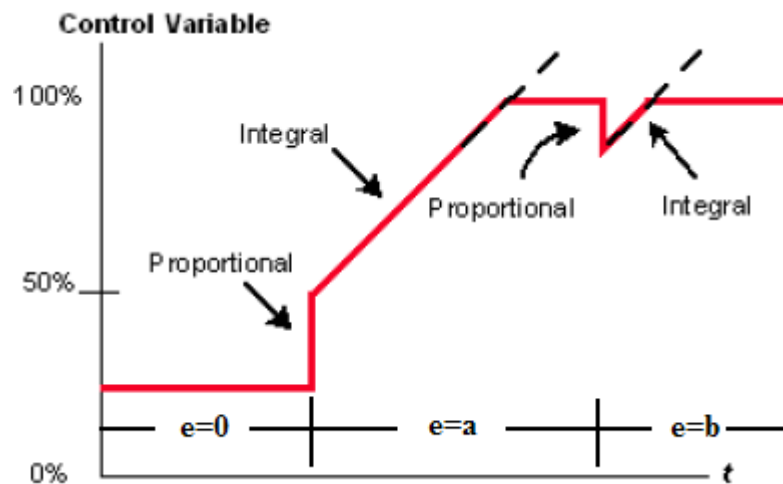
entonces, actúa sobre la salida para que cambie hasta un valor correcto necesario para mantener la medición en el valor deseado. La acción integral soluciona este problema aumentando el valor de acción de forma proporcional a la integral del error, lo que genera que la función integral del error aumente paulatinamente mientras exista error no nulo hasta alcanzarlo.

La constante de tiempo de integración “ $T_i$ ” da una idea del tiempo que se tarda en anular el error de forma automática. Esto se puede mostrar, de forma aproximada, utilizando un error en régimen permanente constante, en donde, el tiempo “ $T_i$ ” da una idea del momento en que se anula el error en régimen permanente (ver Figura 10). Si se elige una  $T_i$  muy elevada, el sistema tarda mucho en alcanzar la referencia.



**Figura 10. Acción integral para eliminar el error en régimen permanente.**

En lazo abierto la respuesta agregada a la acción proporcional del controlador se muestra en la Figura 11 [19].



**Figura 11. Respuesta de un control proporcional integral a lazo abierto ante un escalón [19].**

El escalón de cambio en la medición, primero produce una respuesta proporcional, y luego una respuesta integral. Cuanta más acción integral exista en el controlador, es decir, un  $T_i$  más bajo, más rápido cambia la salida en función del tiempo [19].

La correcta cantidad de acción integral depende de cuán rápido la medición puede responder al recorrido adicional de válvula que la misma causa. El controlador no debe comandar la válvula más rápido que el tiempo muerto en el proceso, permitiendo que la medición responda, o de otra manera la válvula irá a sus límites antes de que la medición pueda ser retornada nuevamente al valor de consigna. La válvula se mantendrá entonces en su posición extrema hasta que la medición cruce el valor de consigna en la dirección opuesta. El resultado será un ciclo integral en el cual la válvula se desplaza de un extremo al otro a medida que la medición oscila alrededor del valor de consigna [16].

El control integral (también llamado modo reset) es para eliminar el error en régimen permanente (offset, por su significado en inglés) que genera el control proporcional en ciertos sistemas, en otras palabras, conseguir el mínimo error cuando el sistema se estabiliza. Si hay exceso de control integral el resultado será una oscilación de la medición. Si al contrario existe un bajo control integral, es decir, un

Ti más elevado, el resultado será que la medición retorna al valor de consigna más lentamente.

### 2.3.5.3. Acción proporcional derivativa (PD)

Una forma de evitar las fuertes oscilaciones que se pueden producir en torno a la referencia es añadir a la acción proporcional otra acción proporcional a la derivada del error. Esto es lo mismo que dotar al sistema de una cierta capacidad de “anticipación” porque la inclusión del término derivativo es equivalente a actuar proporcionalmente al error que existirá dentro de “ $T_d$ ” segundos [16]. Esta antelación es beneficiosa porque el sistema es capaz de “frenar” antes de llegar a la referencia. En la Figura 12 se muestra cómo en el instante “ $t_1$ ” el error todavía es positivo, por lo que el control proporcional seguirá actuando en la planta para acercar la masa a la referencia, aunque sea una fuerza pequeña. Pero debido a la inercia del sistema en un tiempo relativamente pequeño se rebasará la posición de referencia por lo que en ese instante se introduce una fuerza contraria o “de frenado”. Es decir, actuar en “ $t_1$ ” con la fuerza que se estima para  $t_2$ .

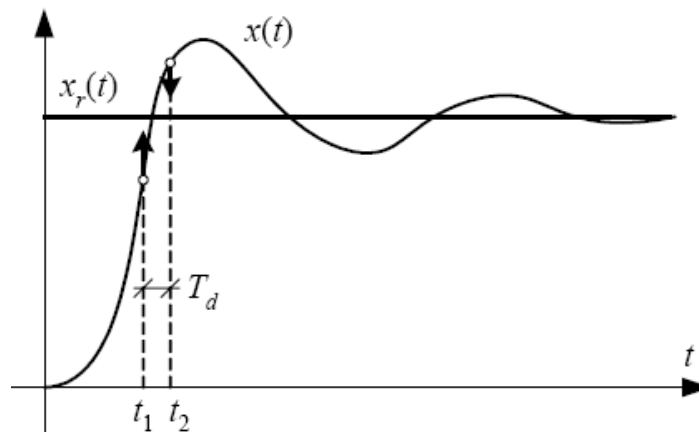


Figura 12. Acción derivativa sobre la respuesta de un sistema.



La salida derivativa es proporcional al régimen de cambio del error. Cuanto mayor sea el cambio, mayor será la acción derivativa. La acción derivativa se mantiene mientras la medición esté cambiando. Tan pronto como la medición deje de cambiar, esté o no en el valor de consigna, la respuesta debido a la acción derivativa cesará [16].

El tiempo derivativo, es el tiempo que la respuesta proporcional del lazo abierto más la respuesta derivativa está delante de la respuesta resultante del valor proporcional solamente [19]. Así, cuanto más grande sea el tiempo derivativo mayor será la respuesta derivativa (ver Figura 13).

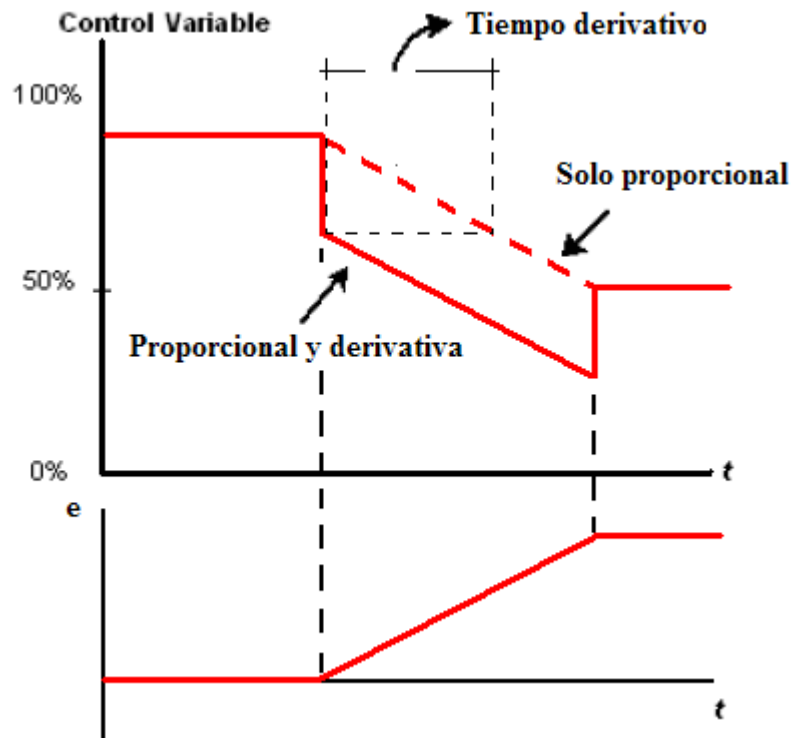


Figura 13. Respuesta proporcional derivativa a lazo abierto [19].

### **2.3.6. Entonación de un lazo de control**

Las ideas enunciadas en las secciones anteriores ayudan a conocer cómo cambia la respuesta del sistema modificando alguno de los parámetros del controlador, pero resultan insuficientes para poder asignar de forma adecuada sus valores numéricos. Para asignar valores a los parámetros del controlador sin conocer la función de transferencia de la planta que se desea controlar, han sido propuestas una serie de tablas que utilizan varios parámetros que se obtienen de forma experimental sobre la planta, así como de métodos automáticos de entonación (auto-tune) que poseen los controladores para el cálculo de los parámetros del PID.

#### **2.3.6.1. Método experimental de Ziegler-Nichols**

El ajuste Ziegler-Nichols propone unos parámetros para el PID de forma que el sistema controlado posea un buen rechazo a las perturbaciones que se puedan introducir en el sistema. Esto quiere decir que el seguimiento que hace el sistema a la referencia puede ser poco amortiguado (oscilatorio), con demasiado sobre impulso [16]. Pero esto puede considerarse intrascendente comparado con la especificación del sistema. En muchos procesos industriales un buen rechazo a las perturbaciones es mucho más interesante que un buen seguimiento a la referencia [16].

En concreto, la especificación que se pretende con Ziegler-Nichols es obtener una relación de caída de sobre impulsos de un cuarto, es decir, que ante la entrada de una perturbación los sucesivos rebases en torno a la referencia sean sucesivamente cada uno cuatro veces inferior al anterior, ver Figura 14 [16].

Existen dos formas de ajuste, uno emplea los parámetros “a” y “L” de la respuesta de la planta ante una entrada escalón unitario y otro que emplea los parámetros de ganancia crítica “ $K_{CR}$ ” y periodo de oscilación crítico “ $T_{CR}$ ” de la planta.

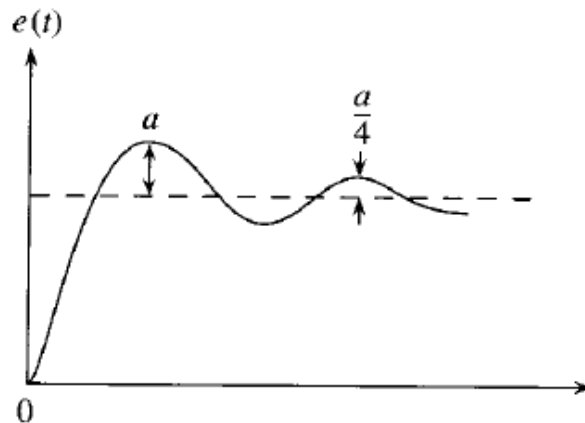


Figura 14. Curva de respuesta para un relación de decrecimiento de 1/4 [16].

Los parámetros “a” y “L” se obtienen de la curva de reacción generada de la respuesta de la planta ante una entrada escalón unitario, como se muestra en la Figura 15. El valor de la salida en régimen permanente “K” se relaciona por trigonometría con el tiempo muerto “L” y la constante de tiempo “T”, según la Figura 16 y la ecuación  $a = \frac{KL}{T}$  (7) [16].

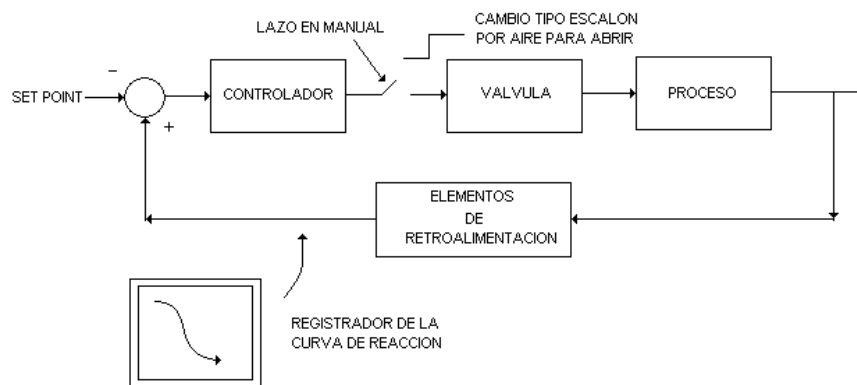


Figura 15. Diagramas de bloques para la obtención de la curva de reacción del proceso [18].

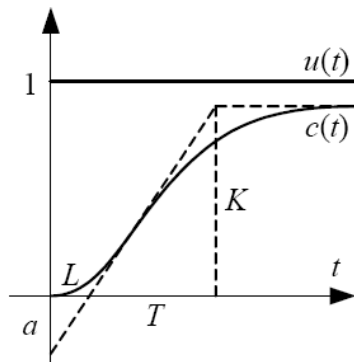


Figura 16. Curva de reacción del proceso [18].

La ecuación utilizada para el cálculo es la siguiente:

$$a = \frac{KL}{T} \quad (7)$$

Los valores para los parámetros del PID se obtienen con las relaciones presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Obtención de parámetro Ziegler-Nichols a través de la curva de reacción [18].

Modo de control	Kp	Ti	Td
P	(1/a)	$\infty$	0
PI	(0,9/a)	3L	0
PID	(1,2/a)	2L	0,5L

Los parámetros de ganancia crítica “K<sub>CR</sub>” y período de oscilación crítico “T<sub>CR</sub>” de la planta se pueden obtener experimentalmente de varias formas. Una posibilidad es introducir la planta en un sistema de control proporcional y aumentar la ganancia hasta volver la salida del sistema oscilatoria ante una entrada escalón (como se muestra en la Figura 17), es decir, en el límite de estabilidad. La ganancia que deja el sistema en el límite de estabilidad es la ganancia crítica “K<sub>CR</sub>”, mientras que el

período de oscilación que se observe en la salida del sistema es el crítico “ $T_{CR}$ ”, ver Figura 18 [16]-[18].

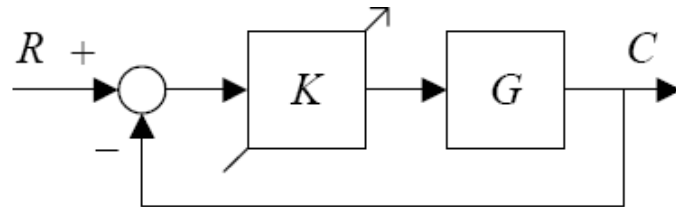


Figura 17. Diagrama de bloques para la obtención de la curva de oscilación crítica con ganancia crítica.

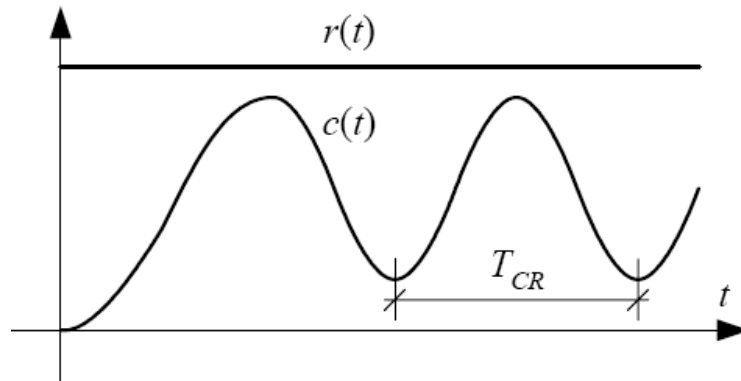


Figura 18. Período de oscilación crítica con ganancia crítica [16].

Los valores para los parámetros del PID se obtienen con la Tabla 3.

Tabla 3. Obtención de parámetros Ziegler-Nichols a través del período de oscilación crítica con ganancia crítica [18].

Modo de control	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{CR}$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{CR}$	$T_{CR}/1,2$	0
PID	$0,6K_{CR}$	$T_{CR}/2$	$T_{CR}/8$

### **2.3.6.2. Entonación por Auto-tune**

En el control moderno existen incorporado en algunos dispositivos como los PLC, sistema de algoritmos que calculan los parámetros del PID de forma automática, es decir, son capaces de auto-ajustarse a sí mismos, ya sea a través de un método experimental como el de la sección 2.3.6.1, como también de métodos propietarios algo más complejos. Los controladores que poseen auto-ajuste (Auto-tune) también pueden realizar acciones de cálculo de parámetros de forma continua adaptándose al comportamiento y a los diferentes estados del proceso. En cada cambio de referencia se calculan nuevamente los valores, esta función optimiza automáticamente los parámetros ajustados en el PID de una manera continua.

Los algoritmos del auto-ajuste pueden variar en cada marca o modelo de PLC, pudiendo a veces requerir de un pre-ajuste con parámetros iniciales proporcionados por el usuario, de esta forma, el programa automáticamente comienza el cálculo de los parámetros para entonar el lazo.

## **2.4. CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLCs)**

Un PLC (Programmable Logic Controller), es un equipo electrónico que se encarga de controlar en tiempo real y en medio industrial procesos secuenciales. El PLC trabaja recibiendo ordenes del operador, con lo cual revisa sus entradas, y dependiendo del estado de éstas y las condiciones impuestas por los controles accesibles al operador, manipula el estado de sus salidas ejecutando así las funciones previstas.

Para que el sistema realice correctamente las funciones requeridas por el proceso, el PLC debe poseer un programa interno realizado por un usuario o programador el cual usualmente lo ingresa vía el software (programa) propietario, que en la mayoría de los casos es particular en cada marca y/o modelo de PLC [15].

### 2.4.1. Componentes de un PLC

El PLC está compuesto básicamente por un CPU (unidad central de proceso, por su significado en español), área de memoria, y circuitos electrónicos apropiados para recibir y gestionar los datos de entrada y salida, ver Figura 19 [15]. Adicionalmente los PLC pueden poseer módulos avanzados de comunicación y visualización, integrados o expandibles, con el fin de ampliar las posibilidades de control sobre el sistema. Las pantallas o HMI (interface hombre máquina, por su significado en español) o los módulos y protocolos de comunicación permiten tener una nueva gama de soluciones para los requerimientos de los sistemas de control avanzados.

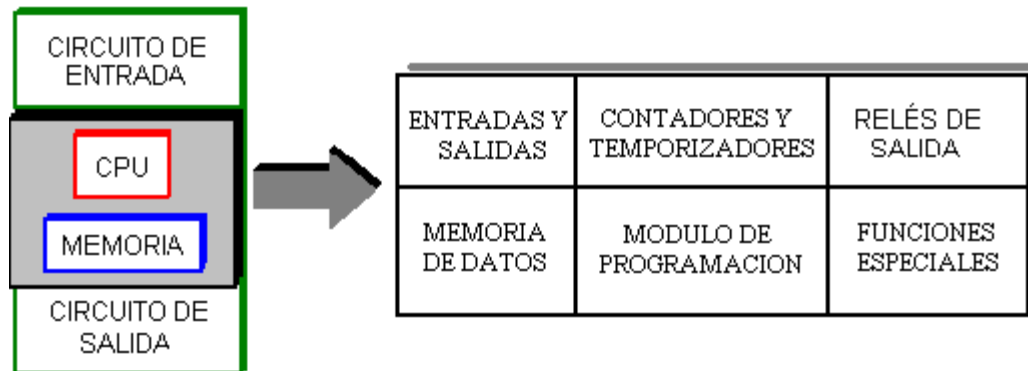


Figura 19. Composición básica de un PLC.

Para la integración del PLC con la instrumentación y el sistema en general se utilizan los siguientes componentes:

- **Entradas digitales y analógicas:** reciben las señales de instrumentación del sistema, conectándose así, a los sensores, interruptores, señales analógicas, señales digitales y otros [17].
- **Salidas digitales y analógicas:** se encargan de enviar las señales de encendido y apagado a los solenoides, luces, bobinas de relés, relés de estado sólido, y otros actuadores de tipo ON/OFF en el sistema. En caso de ser

salidas analógicas, se encargan de regular el estado de apertura de la válvula, el valor del indicador o regular aquel equipo de instrumentación que depende de un rango de operación [17].

- **Puertos de comunicación:** a través de este componente, el PLC puede comunicarse con sensores, otros controladores lógicos programables, equipos de supervisión y/o configuración remotos, pantallas para ilustrar y controlar el proceso y otros; todo lo anterior a través de diversos puertos y protocolos de comunicación libres o propietarios.

#### 2.4.2. Modo de operación de un PLC

Un PLC trabaja corriendo continuamente el programa almacenado en su memoria. Podemos entender estos ciclos como la ejecución consecutiva de tres pasos principales. Típicamente hay más de tres pasos, debido a las múltiples funciones avanzadas que poseen los PLC actuales como por ejemplo actualizar el HMI, pero podemos enfocarnos en los mostrados en la Figura 20, ya que dan una buena idea del funcionamiento general [17].

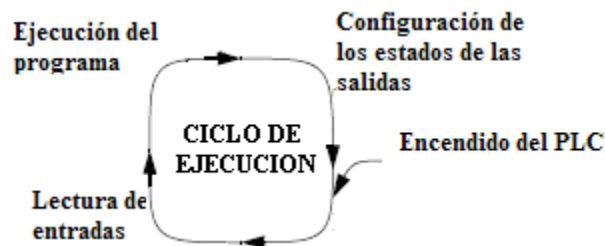


Figura 20. Ciclo de un PLC.



## **2.5. INSTRUMENTACIÓN BÁSICA EN EL AUTOCLAVE**

La Instrumentación es el grupo de elementos que sirven para medir, controlar o registrar variables de un proceso con el fin de optimizar los recursos utilizados en éste. En otras palabras, es la ventana a la realidad de lo que está sucediendo en el proceso, que se pueda sentir lo que sucede y determinar si el mismo va encaminado hacia donde se desea, para luego tomar acciones de control programadas en el PLC, que actúen sobre los parámetros del sistema pudiendo así obtener los resultados operativos deseados. La instrumentación es la clave para que la automatización sea posible.

A continuación se presenta el tipo de instrumentación y señales que posee una máquina esterilizadora, necesarias para su automatización. El diseño, instalación y selección dependerán de los parámetros del sistema y del diseño de ésta.

### **2.5.1. Transductor de presión**

El transductor es un dispositivo o elemento que convierte una señal de entrada en una de salida pero de diferente naturaleza física. Normalmente se desea transformar señales de las variables físicas que deseamos medir, en magnitudes eléctricas que son las que se manejan en el control y automatización. En la Figura 21 se muestra un transductor de presión, dispositivo por medio del cual puede transformarse la variable presión de un sistema en una magnitud eléctrica.

En el proceso de esterilización uno de los parámetros a controlar del sistema es la presión (ver sección 2.2.4), por lo tanto el transductor de presión podrá realizar la conversión entre presión física y una señal eléctrica. La tensión es usual en los sistemas de control y su rango de operación es de 0 a 10V; otra señal también muy habitual, es la de corriente de campo (4 a 20 mA). La última permite ser transmitida por cable trenzado a distancia, esta transmisión en corriente proporciona una notoria inmunidad al ruido ya que la información no es afectada por caídas de tensión,

impulsos parásitos, resistencias o voltajes inducidos por contaminación electromagnética, etc.



**Figura 21. Transductor de presión de kilo pascales a corriente.**

### **2.5.2. Sensor de temperatura**

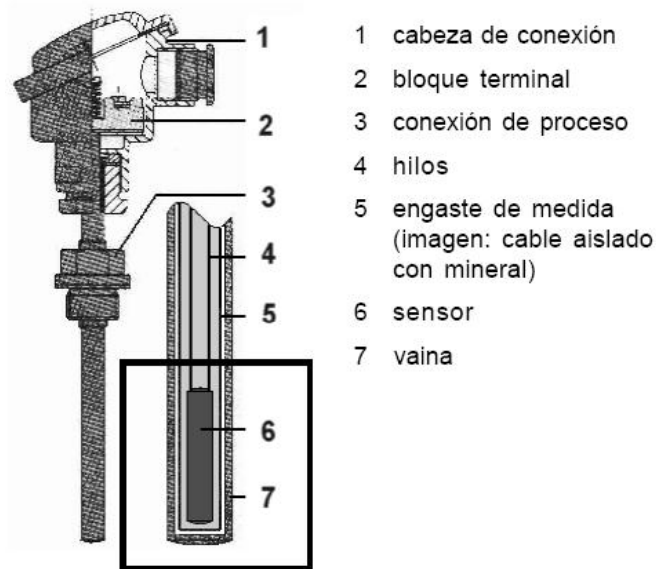
Por lo general los controladores pueden recibir directamente la señal del sensor de temperatura; éstos en el ambiente industrial se caracterizan por tener ciertos parámetros definidos para estandarizar la medición de esta variable física. Dentro de estos estándares se encuentran los sensores de tipo termorresistencia y los de tipo termopar. De no existir entradas de tipo temperatura en el controlador existe la posibilidad de utilizar un transductor como en el caso de la presión.

En el proceso de esterilización la señal de temperatura es crítica dentro del proceso, por lo tanto es importante una buena selección del sensor de temperatura adecuado a los requerimientos del proceso.

#### **2.5.2.1. Termorresistencia**

Las termorresistencias utilizadas en el ambiente industrial son por lo general de tipo “PTC”, es decir, cuando la temperatura aumenta, también el valor de su resistencia. Por ejemplo, un sensor de temperatura de tipo termorresistencia “Pt 100”

es un resistor, donde “Pt” significa platino, 100 significa 100 Ohm a 0°C (138,5 Ohm a 100°C) según DIN EN IEC 60751. En la Figura 22, se observa una termorresistencia inmersa en un termopozo industrial.



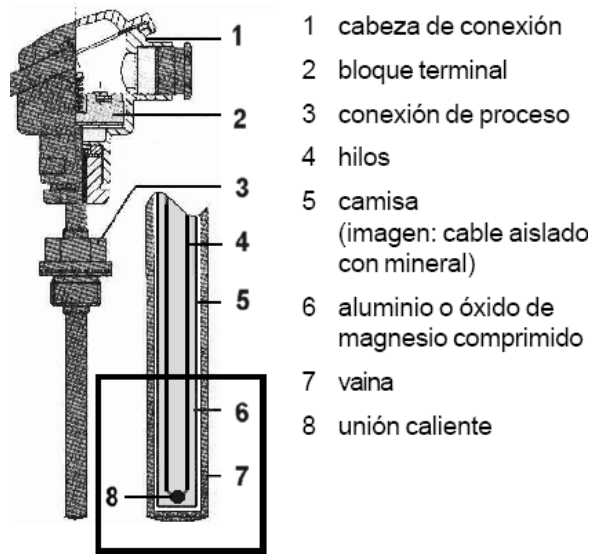
**Figura 22. Componentes de una termorresistencia en encapsulado o termopozo industrial [17].**

Generalmente una termorresistencia se utiliza cuando se requiere una precisión alta (hasta los 0.05%), se quiere evitar todos los problemas eléctricos que pueden ocurrir utilizando termopares (menos fuentes de errores) y no se requiere tiempos de respuesta rápidos.

### 2.5.2.2. Termopar

Un termopar es un sensor de temperatura, que suministra una señal de tensión eléctrica, que depende directamente de la temperatura, sin energía adicional auxiliar, a causa de sus características termoeléctricas. Este efecto termoeléctrico hace posible la medición de temperatura. Hay varios tipos de termopares con

características físicas diferentes según IEC 584 (DIN EN 60584). En la Figura 23, se observa un termopar inmerso en un encapsulado industrial.



**Figura 23. Componentes de un termopar en encapsulado o termopozo industrial [17].**

Generalmente un termopar se utiliza cuando el lugar de medida requiere un termómetro muy pequeño o delgado ( $< 1 \text{ mm}$ ), se esperan choques o vibraciones y se requieren tiempos de respuesta rápidos.

### **2.5.3. Nivel de líquido**

Existen numerosas formas de medir nivel de líquido, en el caso de un autoclave, su estructura le permite ser considerada como un tanque, pero con la particularidad de que va a estar lleno de producto sólido el cual va a ser enfriado en su debido momento con un líquido refrigerante o agua fresca; debido a lo anterior es de notar que la cantidad de producto a esterilizar puede variar en tamaño, cantidad, forma o tipo de agrupación. Adicionalmente la medición de nivel es requerida por el automatismo para detectar si el autoclave está vacío de agua (por ejemplo para iniciar

un proceso de esterilización), ó si el nivel del autoclave está lleno (por ejemplo para detectar que el líquido refrigerante ha entrado en contacto con todos los productos).

Lo anterior respalda la utilización de un simple medidor de señal ON/OFF de tipo conductivo o resistivo para indicar bajo y alto nivel. Este sensor puede consistir en uno o varios electrodos y un relé mecánico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico, y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor, tal como ocurre en los autoclaves.

#### **2.5.4. Válvulas de control**

Para el control del proceso es necesario actuar sobre las diferentes variables del sistema, como los son la presión de aire dentro del autoclave, el control de temperatura, el enfriamiento con líquido, y otras; todas estas acciones son manejadas por el PLC o controlador, el cual genera una señal de control para hacer efectiva la acción.

La señal generada por el PLC es de “control”, y como su nombre lo indica no está necesariamente capacitada para actuar directamente sobre la válvula; de allí el requerimiento de las características de la misma. De no estar capacitada la señal de control directa del PLC para actuar sobre la válvula, es necesaria la utilización de actuadores, los cuales tendrán la tarea de manejar la potencia requerida para el accionamiento de las válvulas.

##### **2.5.4.1. Accionamiento de válvulas ON/OFF**

Como su nombre lo indica, estas válvulas poseen dos estados durante su funcionamiento y un tercer estado cuando no están siendo accionadas. Los dos primeros estados corresponden a ON (abierta) u OFF (cerrada), y el tercer estado

corresponde al estado de la válvula cuando no está siendo energizada, en otras palabras, el estado de reposo, también llamado “normalmente abierta” o “normalmente cerrada”; este último estado es de gran importancia para la seguridad del sistema, ya que, de éste depende el estado de las válvulas cuando el proceso se encuentra inactivo y desenergizado.

El control de estas válvulas puede realizarse directamente del controlador, si las características eléctricas de ambos lo permiten, de lo contrario se requiere la utilización de un intermediario ó actuador eléctrico ON/OFF para la alimentación eléctrica o activación del solenoide encargado de abrir o cerrar la válvula, este dispositivo puede ser el relé.

#### **2.5.4.2. Accionamiento de válvulas regulatorias**

Por requerimientos del proceso, existen variables que van a ser controladas de forma regulatoria, en donde, la cantidad de apertura de la válvula está dentro de un rango de 0 a 100% de apertura. El control de cuanto se va a abrir la válvula recae sobre el autómatas o PLC y su acción de control dependerá de la medición, su programación y el valor de consigna deseado.

Para relacionar la orden del PLC en cuanto a la apertura de la válvula es posible ser necesaria la utilización de actuadores que realicen ésta función, los cuales pueden ser de tipo hidráulico, neumático o eléctrico. Por lo general se utiliza un módulo o transductor para en el caso de un actuador neumático, convertir nivel de corriente o tensión enviada por el PLC a presión en la línea de control de la válvula en cuestión, en otras palabras, convertir la señal eléctrica del PLC en nivel de presión que a su vez se relaciona con el porcentaje de apertura.

## **2.6. DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTOS (D.T.I)**

Los símbolos y diagramas son usados en el control de sistemas para indicar la aplicación en el proceso, los tipos de señales empleadas, la secuencia de componentes interconectados y de alguna manera, la instrumentación empleada. La Sociedad de Instrumentistas de América (ISA por sus siglas en inglés: Instruments Society of America) publica normas para símbolos, términos y diagramas que son generalmente reconocidos en la industria. Entre las normas de la ISA se encuentra la S-5.1, cuyo propósito es unificar la manera en que se elabora un diagrama de tuberías e instrumentos [20].

La forma internacional de llamar a un DT.I es P&ID, la cual tiene dos interpretaciones, ambas válidas en cuanto a significados: la primera es “Piping and Instruments Diagram” (Diagrama de Tuberías e Instrumentos) y la segunda es “Process and Instrumentation Diagram” (Diagrama de Procesos e Instrumentos) [20].

El P&ID como todo esquema, no necesariamente tendrá alguna relación con la distribución física de equipos en planta. Sin embargo, será una buena práctica guardar cierta analogía. Los espacios físicos no tienen que ser representados a escala, así como las distancias entre los instrumentos de campo y los instrumentos en paneles locales o en salas de control, tampoco pueden ser representados en estos. Un sistema en general podrá generar varios P&ID, lo que implica, que se pueden generar diferentes diagramas por área de la ingeniería [20].

## CAPÍTULO III

### DESCRIPCIÓN DEL CONTROLADOR

#### 3.1. SELECCIÓN

En el caso particular de este trabajo de grado, la selección de la “marca” o “fabricante” del PLC no es requerida, esto a causa de que la empresa propietaria del proyecto asignado (INTRA VE C.A.), es distribuidora exclusiva para Venezuela de una marca de PLC llamada Unitronics® y proveedora no exclusiva de otras marcas de PLCs, por lo tanto, la implementación de sus proyectos principalmente serán basados en equipos o PLCs de su marca insignia (Unitronics®).

Las familias de modelos disponibles en la línea de PLC Unitronics® para importación a Venezuela, capaces de manejar por lo menos 8 lazos PID y expansión de salidas, aparte de poseer las capacidades propias de un PLC, son los mostrados en la Tabla 4.

El estudio de este proyecto afirmó que la implementación del mismo efectivamente puede ser basándose en la utilización de esta marca de PLC, y arrojó varios modelos como candidatos para su utilización. Debido a aspectos económicos impuestos por la empresa cliente, la selección del PLC básicamente debe ser el equipo más económico que cumpla con las condiciones del proceso, lo que da como resultado la utilización de alguno de los modelos Unitronics® de la familia Vision120™. Indiferentemente del modelo específico de PLC Vision120™ [ANEXO N°2] que se utilice, el paquete de programación será el provisto por la empresa Unitronics® llamado Visilogic™.



**Tabla 4. Imágenes de las familias de PLCs Unitronics.**

Familia	Imagen
Vision 570	
Vision 350	
Vision 530	
Vision 130	
Vision 120	

El PLC seleccionado posee un pantalla de interfaz hombre-proceso HMI y un teclado funcional, el cual es un requerimiento explícito por los principios del proyecto, en donde se acotaba que el sistema debía tener alguna forma de interactuar con el proceso y modificar ciertos parámetros del mismo, de forma avanzada y moderna, lo cual es cumplido a cabalidad gracias a la pantalla y al teclado que posee integrado el PLC. En la Figura 24 se puede observar el HMI y el teclado funcional dentro de los modelos de PLC Vision120™.



Figura 24. Controlador lógico programable Unitronics Vision120.

### 3.2. PAQUETE DE PROGRAMACIÓN VISILOGIC™

**VisiLogic** es el software que se usa para crear proyectos de control para los controladores o PLC Vision™ de la familia Unitronics®. Después del conocimiento de todos los parámetros de funcionamiento del proyecto, y posterior a su diseño de implementación a la programación, el paquete de programación Visilogic™ se utiliza para escribir, depurar, y descargar el programa de control de proceso al PLC.

Las tareas de control y aplicaciones que poseerá el PLC en su control automatizado, debe ser programado usando el editor en diagrama de escalera. Las aplicaciones requeridas para ser presentadas en la pantalla de interfaz hombre proceso se configuran usando el editor de HMI, en el cual se diseñan las aplicaciones que se muestran en la pantalla del controlador.

Las pantallas programadas en el HMI pueden entre otras cosas, indicar a los operadores qué hacer en diversas situaciones, permiten la utilización de acceso por contraseña a diferentes áreas de los menús, introducción de puntos de consigna, selección de receta, indicar problemas en el sistema y/o generar alarmas visuales. Una

pantalla puede contener tanto texto como imágenes. Los textos e imágenes pueden ser fijos y/o variables.

Las variables que se introducen en la pantalla sirven para mostrar valores en tiempo real, como números enteros o de coma flotante, representar valores en tiempo real con texto, imágenes o barras gráficas, mostrar mensajes de texto dinámicos en función de las condiciones de ejecución, permitir a un operador introducir datos usando el teclado alfanumérico de los PLC Vision™.

### **3.2.1. Diagrama de escalera Visilogic™**

El editor de diagrama de escalera (también llamado “ladder”, por su significado en inglés) sirve para crear y diseñar la estructura y programación lógica del PLC enfocada a la aplicación de control respectiva. Los diagramas de escalera están compuestos por contactos, bobinas y elementos de bloque de función ordenados en segmentos.

Un segmento de escalera es la división más pequeña de un diagrama de escalera. Un segmento puede contener una o varias filas de elementos de programación. En la Figura 25 se muestra el ambiente de programación en el diagrama de escalera.

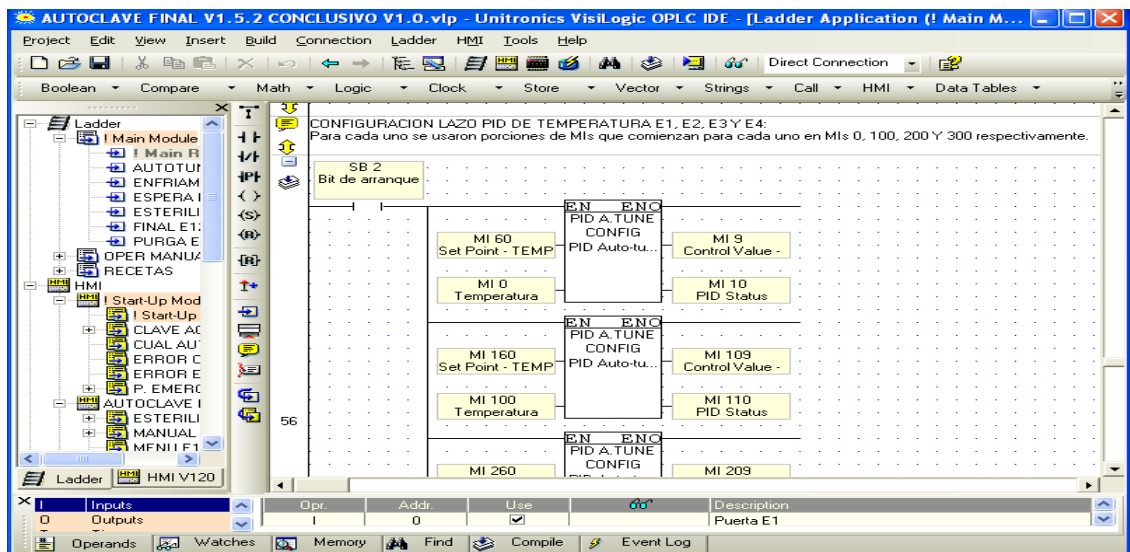
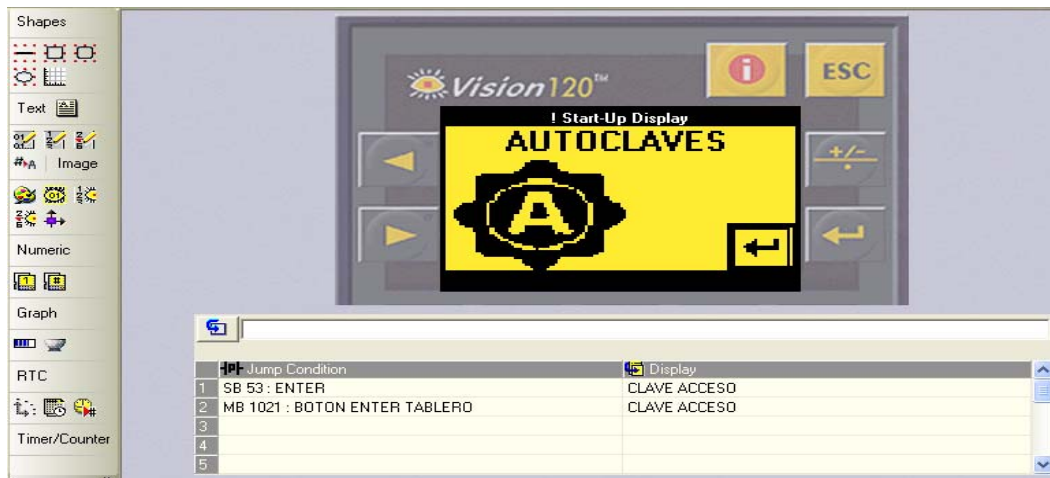


Figura 25. Escalera de programación.

### 3.2.2. Editor de pantallas Visilogic™

Dentro del ramo industrial este editor de pantallas se encarga de configurar el HMI ó interface hombre máquina. En este editor se diseñan, configuran y programan las pantallas con las que el usuario va a tener contacto con el proceso, ya sea para visualizar o ejecutar funciones adecuadas a las necesidades del automatismo.

Las pantallas indican a los operadores qué hacer en ciertas circunstancias del proceso, se puede tener niveles de acceso con contraseña, introducir puntos de consigna e indicar al operador que hacer en caso de que surja un problema de sistema o una alarma. Una pantalla puede contener tanto texto como imágenes. Los textos y las imágenes pueden ser fijos y/o variables, con las cuales se pueden condicionar diferentes funciones que se estén ejecutando. Mostrar valores, textos, imágenes o barras gráficas en tiempo real. En la Figura 26 se presenta la interface de programación y configuración de las pantallas.



**Figura 26. Interface de configuración y programación de las pantallas.**

En el ANEXO N°1 se puede observar el manual de operaciones que se le entregó a la empresa cliente para el manejo, control y navegación de las pantallas del sistema de esterilización de las cuatro (4) autoclaves.

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO**

#### **4.1. ALCANCE DEL PROYECTO**

La empresa “AVECAISA – AVENCATUN INDUSTRIAL, S.A.” con ubicación de sus industrias y plantas de proceso en el Estado Sucre, contrata a INTRAVE C.A., empresa que suministra servicios de control, instrumentación y automatización ubicada en el Distrito Capital, para la automatización de cuatro máquinas esterilizadoras o autoclaves.

El contacto empresa cliente con la empresa suministradora del servicio se manejó vía remota, para después ejecutar una primera visita en búsqueda de supervisar todos los puntos de operatividad necesarios, así como inspeccionar el avance de las modernizaciones del sistema. Esto se realizó de esta manera debido a que, la automatización fue realizada sobre máquinas esterilizadoras utilizadas anteriormente de forma manual, es decir, no poseían instalados equipos e instrumentos adecuados para la automatización.

El alcance del proyecto en cuestión, es completar la implementación de una primera fase, la cual concluye con el funcionamiento totalmente automático de las cuatro (4) máquinas esterilizadoras, basándose en los parámetros y requerimientos que suministre la empresa cliente. Adicionalmente la generación de un manual de operaciones y entrenamiento al personal operativo que se encargará del manejo del sistema.

En cuanto al controlador lógico programable (PLC), debido a aspectos económicos ya mencionados en la sección 3 del capítulo III, donde la empresa cliente

busca la mayor economía de costos posibles; la selección fue de un (1) solo PLC para el control de los cuatro (4) autoclaves, por lo que el programa debe cumplir con la siguiente característica: manejar el proceso en su totalidad, es decir, tener la capacidad de controlar las cuatro (4) máquinas esterilizadoras al mismo tiempo e independientemente.

Con respecto a una segunda fase del proyecto, se realizarán los análisis y recomendaciones pertinentes para su presentación al cliente.

## **4.2. ASIGNACIÓN DE FUNCIONES**

En el marco de éste proyecto siempre están involucrados asuntos económicos, en donde, se busca una solución que satisfaga tanto a la empresa cliente como a la prestadora del servicio.

En el caso de la asignación de funciones, el sistema y las máquinas esterilizadoras requieren de una modernización instrumental, la cual será costeadada de manera directa por el cliente debido a sus contactos con empresas de instrumentación, que le suministran instrumentos y sensores para el control de toda su planta, adicionalmente de poseer un inventario de instrumentos posiblemente adaptables al sistema a automatizar. A todo lo anterior se añade la petición del cliente de realizar todas las instalaciones necesarias debido a la tenencia de sendos departamentos de mecánica, mantenimiento e instrumentación; adicionalmente el tablero de control también será fabricado y armado por el cliente.

Con respecto al suministro de los equipos de control, como lo son el PLC y sus módulos de expansión, estos serán suministrados y seleccionados por “Intrave”.

En otras palabras, el encargado de proveer la automatización y los equipos de control (previa aprobación de presupuestos) es la empresa contratada (INTRAVE). En cuanto al resto del equipamiento, Intrave generará las peticiones de instrumentación y sensores requeridos para la automatización, con el fin de que la

empresa cliente (AVECAISA) proceda a comprar, instalar, seleccionar y/o montar; siempre abiertos a recomendaciones y/o modificaciones propuestas por la empresa contratada.

### **4.3. LEVANTAMIENTO DEL PROYECTO**

Como primera fase de ingeniería, se tiene el levantamiento de información en el cual se desea obtener el máximo de especificaciones del proceso a automatizar desde el punto de vista del cliente, así como ofrecer las posibles soluciones e implementar las opciones adecuadas al producto que se esté manejando.

#### **4.3.1. Requerimientos del cliente en funciones y operaciones**

Posterior a conversaciones con el cliente, se obtuvieron los siguientes requerimientos en cuanto a funcionalidad y operación del sistema:

- Control de acceso con clave al sistema de control.
- Capacidad de seleccionar una lista de recetas, para facilitar el proceso de esterilización de diferentes productos; con los puntos de consignas y tiempo de esterilización suministrados por el cliente.
- Capacidades básicas visuales para representar el estado actual del sistema.
- Visualización en tiempo real de los principales parámetros del proceso en la pantalla del sistema. Obligatoria temperatura y presión en tiempo real.
- Capacidad de enfriamiento con alta presión para disminuir los tiempos de la etapa de enfriamiento.



- Utilización de accionamiento dual de botones y pulsadores, es decir, los principales botones a utilizarse en el PLC, deben ser replicados en pulsadores, los cuales van a ser ubicados en el tablero.
- Selector con llave, para evitar que los operadores desactiven un estado crítico en el sistema, sin que el supervisor de área tome las acciones correspondientes.

A continuación se presenta en la Tabla 5, suministrada por la empresa cliente, el ajuste de los parámetros en el proceso de esterilización de cada producto.

**Tabla 5. Recetas posibles a esterilizar.**

Código Producto	Tiempo Esterili.	Temp. Esterili.	Tipo de Producto	Peso Neto	Tipo de envasado
V-125--114	50	114	Ventresca atún	125	1/4 de club
V-125--115	45	115	Ventresca atún	125	1/4 de club
V-125--116	40	116	Ventresca atún	125	1/4 de club
V-125-117	37	117	Ventresca atún	125	1/4 de club
F-125--114	50	114	Filetes de atún	125	1/4 club/dingley
F-125--115	45	115	Filetes de atún	125	1/4 club/dingley
F-125--116	43	116	Filetes de atún	125	1/4 club/dingley
F-125-117	40	117	Filetes de atún	125	1/4 club/dingley
P-140-114	110	114	Pepitona	140	211*202
P-140-115	100	115	Pepitona	140	211*202
P-140-116	95	116	Pepitona	140	211*202
P-140-117	90	117	Pepitona	140	211*202
S-125-117	80	117	Sardina	125	1/4 dingley
S-125-118	72	118	Sardina	125	1/4 dingley

S-125-119	70	119	Sardina	125	1/4 dingley
S-125-117	80	117	Sardina	125	1/4 de club
S-125-118	72	118	Sardina	125	1/4 de club
S-125-119	70	119	Sardina	125	1/4 de club

#### 4.3.2. Equipos, instrumentos y sensores

La selección de marca y modelo de los equipos, instrumentos y sensores a cargo de la empresa cliente, correrán bajo su responsabilidad en cuanto a calidad y funcionamiento adecuado en su tarea específica, de aquí la necesidad de explicar detalladamente la función de los equipos, instrumentos y sensores exigidos para la automatización; para posteriormente recibir del cliente las especificaciones de los equipos, instrumentos y sensores para su posterior acople con el sistema de control.

Los equipos, instrumentos y sensores requeridos para la automatización de una (1) máquina esterilizadora, en concordancia con las peticiones adicionales, son las siguientes:

- **Válvula variable, para el control regulatorio del suministro de vapor.** De tipo variable debido a que se desea controlar de manera precisa la temperatura del sistema durante la esterilización, a través de un control proporcional integral derivativo (PID).
  - El vapor es la variable que suministra calor al sistema, por lo tanto, solo con la regulación del mismo es posible controlar la temperatura y la inercia térmica dentro de la cámara del autoclave.
- **Válvula variable, para el control regulatorio del venteo.** De tipo variable debido a que se desea controlar de manera precisa la presión de la autoclave durante la etapa de enfriamiento del sistema, esto a través de un control proporcional integral derivativo (PID).

- Durante la etapa de enfriamiento (ver sección 4.5.5), la presión se regula a través de la entrada de aire y de la salida del mismo a través del venteo. La válvula de venteo por su instalación física y mecánica posee mayor capacidad de descarga de presión, que la carga de presión de la línea de aire a través de válvula de entrada de aire, por lo tanto, el control regulatorio se va a efectuar sobre la válvula de venteo.
- **Válvula ON/OFF, para el control de la entrada de aire.**
- **Válvula ON/OFF, para el control del drenaje.**
- **Válvula ON/OFF, para el control de la entrada de agua.**
- **Sensor de temperatura, para el control y visualización de éste parámetro.** El error de lectura de éste sensor depende exclusivamente de los parámetros exigidos por el departamento de calidad y de producción de la empresa cliente.
- **Sensor de presión, para el control y visualización de éste parámetro.** El error de lectura de éste sensor depende exclusivamente de los parámetros exigidos por el departamento de calidad y de producción de la empresa cliente.
- **Sensor de bajo nivel, de tipo ON/OFF, para la detección del estado de nivel de agua.**
- **Sensor de alto nivel, de tipo ON/OFF para la detección del estado de nivel de agua.**
- **Sensor de posición, de tipo ON/OFF para detectar si la puerta de la autoclave se encuentra cerrada.**
- **Tres (3) luces piloto, para la indicación visual del estado del autoclave.**
- **Doce (12) pulsadores, para el manejo del sistema.** Cuatro (4) pulsadores para la navegación por los menús, cuatro (4) pulsadores para seleccionar de cada autoclave y cuatro (4) pulsadores para el inicio del proceso de esterilización de cada autoclave.

- **Cuatro (4) pulsadores tipo hongo con retención, para la activación de la parada de emergencia del sistema.**
- **Un (1) selector con llave.** Para evitar que los operadores desactiven un estado de parada de emergencia sin autorización del supervisor del área.
- **Un (1) selector para el encendido y apagado del tablero de control.**

#### 4.3.3. Especificaciones para el control de instrumentos y sensores

Posterior a las exigencias en cuantos a equipos, instrumentos y sensores, la empresa cliente proporciona las especificaciones técnicas, requeridas para el debido control del sistema automatizado.

A continuación se recopilan las especificaciones técnicas, de los equipos, instrumentos y sensores proporcionados por la empresa cliente:

- **Válvulas variables:** son controladas a través de una señal analógica de 4 a 20 mA, con lo cual se logra que la válvula aperture desde 0% hasta 100% respectivamente.
- **Válvulas ON/OFF:** el control de estado entre abierta o cerrada es controlado a través de un relé que se activa con 110 voltios alternos (Vac); donde 0 Vac cierra la válvula y 110 Vac la abre totalmente.
- **Sensores de temperatura:** señal de voltaje propia de un termopar tipo K.
- **Sensores de presión:** para la lectura de ésta variable se utiliza un transductor de presión con salida 4 a 20 mA, donde 4 mA representa 0 psig y 20 mA 50 psig.
- **Sensores de tipo ON/OFF:** generan una señal de 24 V para indicar un estado de encendido (ON) y de 0 V para indicar un estado apagado (OFF). Configurados de tal forma que cuando generen un estado de encendido, es consecuencia de detectar lo que están censando, por ejemplo, nivel bajo, nivel alto ó puerta cerrada.

- **Luces piloto:** accionadas con 110 Vac.
- **Pulsadores:** se genera detección de pulsado, cuando el controlador detecta 24 V en la entrada correspondiente.
- **Selectores:** se detecta su accionamiento, cuando el controlador detecta 24 V en la entrada correspondiente.

#### 4.3.4. Diagrama D.T.I

Para la ejecución del diagrama de tuberías e instrumentos, se aplica la norma S-5.1 de la ISA. A continuación se describen los elementos que integran el diagrama de procesos e instrumentación de un (1) autoclave, presentado en la Figura 27.

Instrumentos:

- PY: convertidor de corriente a presión.
- ZT: sensor de posición de la puerta.
- LT: transmisor de nivel.
- TT: transmisor de temperatura.
- PT: transmisor de presión.
- TI: indicador de temperatura.
- PI: indicador de presión.

Elemento final de control:

- TV: válvula para el control de temperatura.
- PV: válvula para el control de presión.

Controlador:

- YIC: controlador lógico programable.

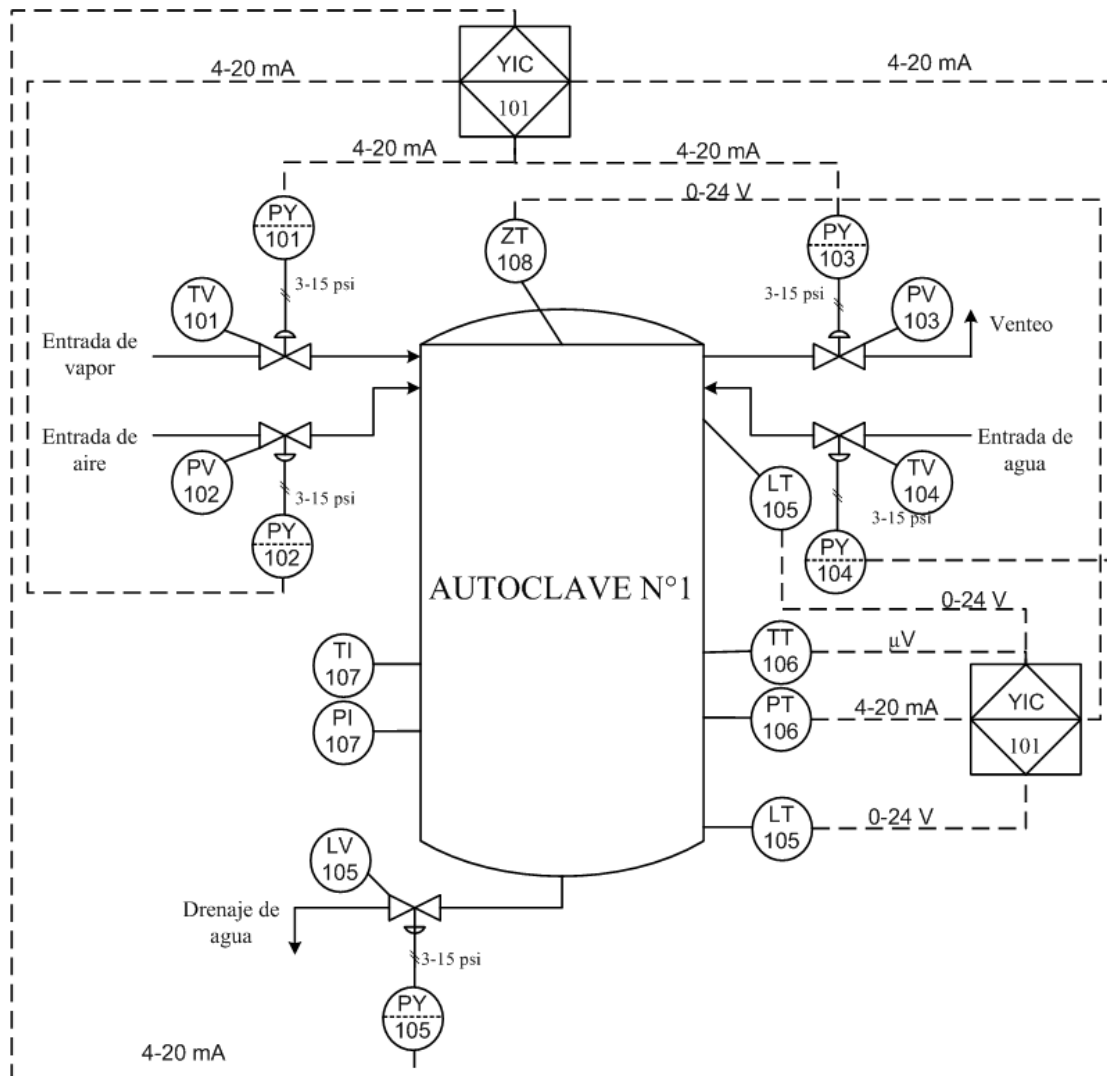


Figura 27. Diagrama de tuberías e instrumentos de un (1) Autoclave.

#### 4.3.5. Número de entradas y salidas

El estudio realizado para la selección del modelo de PLC y de sus módulos de expansión dentro de familia Vision120™, se basó en la cantidad de entradas y salidas requeridas por el sistema, ya que, cualquiera de los modelos que contiene ésta familia es capaz de manejar hasta 12 lazos PID, y el sistema en total posee 8 lazos, los cuales son presentados a continuación en la Tabla 6.

**Tabla 6. Lazos de control PID.**

N° de Lazo PID	Descripción
1	Control de temperatura – Autoclave 1
2	Control de temperatura – Autoclave 2
3	Control de temperatura – Autoclave 3
4	Control de temperatura – Autoclave 4
5	Control de presión – Autoclave 1
6	Control de presión – Autoclave 2
7	Control de presión – Autoclave 3
8	Control de presión – Autoclave 4

A continuación se presenta en las Tablas 7, 8, 9 y 10 todas las entradas y salidas requeridas para la automatización y control de las cuatro (4) máquinas esterilizadoras.

**Tabla 7. Entradas digitales del sistema.**

N°	Descripción
1	Sensor de puerta cerrada – Autoclave 1
2	Sensor de puerta cerrada – Autoclave 2
3	Sensor de puerta cerrada – Autoclave 3
4	Sensor de puerta cerrada – Autoclave 4
5	Pulsador de arranque – Autoclave 1
6	Pulsador de arranque – Autoclave 2
7	Pulsador de arranque – Autoclave 3
8	Pulsador de arranque – Autoclave 4
9	Pulsador con retención de “parada de emergencia” – Autoclave 1
10	Pulsador con retención de “parada de emergencia” – Autoclave 2
11	Pulsador con retención de “parada de emergencia” – Autoclave 3
12	Pulsador con retención de “parada de emergencia” – Autoclave 4
13	Pulsador con llave para desbloquear estado de “parada de emergencia”
14	Pulsador replica del botón número uno (1) del PLC
15	Pulsador replica del botón número dos (2) del PLC
16	Pulsador replica del botón número tres (3) del PLC
17	Pulsador replica del botón número cuatro (4) del PLC
18	Pulsador replica del botón número cinco (5) del PLC
19	Pulsador replica del botón “enter” del PLC
20	Pulsador replica del botón “esc” del PLC
21	Pulsador replica del botón “flecha arriba” del PLC
22	Pulsador replica del botón “flecha abajo” del PLC



**Tabla 8. Salidas digitales del sistema.**

N°	Descripción
1	Luz piloto #1 – Autoclave 1
2	Luz piloto #2 – Autoclave 1
3	Luz piloto #3 – Autoclave 1
4	Luz piloto #1 – Autoclave 2
5	Luz piloto #2 – Autoclave 2
6	Luz piloto #3 – Autoclave 2
7	Luz piloto #1 – Autoclave 3
8	Luz piloto #2 – Autoclave 3
9	Luz piloto #3 – Autoclave 3
10	Luz piloto #1 – Autoclave 4
11	Luz piloto #2 – Autoclave 4
12	Luz piloto #3 – Autoclave 4
13	Válvula, suministro de aire – Autoclave 1
14	Válvula, suministro de aire – Autoclave 2
15	Válvula, suministro de aire – Autoclave 3
16	Válvula, suministro de aire – Autoclave 4
17	Válvula, drenaje – Autoclave 1
18	Válvula, drenaje – Autoclave 2
19	Válvula, drenaje – Autoclave 3
20	Válvula, drenaje – Autoclave 4
21	Válvula, suministro de agua – Autoclave 1
22	Válvula, suministro de agua – Autoclave 2
23	Válvula, suministro de agua – Autoclave 3
24	Válvula, suministro de agua – Autoclave 4

**Tabla 9. Entradas analógicas del sistema.**

N°	Descripción
1	Sensor de temperatura – Autoclave 1
2	Sensor de temperatura – Autoclave 2
3	Sensor de temperatura – Autoclave 3
4	Sensor de temperatura – Autoclave 4
5	Transductor de presión (sensor de presión) – Autoclave 1
6	Transductor de presión (sensor de presión) – Autoclave 2
7	Transductor de presión (sensor de presión) – Autoclave 3
8	Transductor de presión (sensor de presión) – Autoclave 4

**Tabla 10. Salidas analógicas del sistema.**

N°	Descripción
1	Válvula regulatoria, suministro de vapor – Autoclave 1
2	Válvula regulatoria, suministro de vapor – Autoclave 2
3	Válvula regulatoria, suministro de vapor – Autoclave 3
4	Válvula regulatoria, suministro de vapor – Autoclave 4
5	Válvula regulatoria, venteo – Autoclave 1
6	Válvula regulatoria, venteo – Autoclave 2
7	Válvula regulatoria, venteo – Autoclave 3
8	Válvula regulatoria, venteo – Autoclave 4

#### **4.3.6. Selección de los módulos I/O del PLC**

Dadas las especificaciones de entradas salidas del sistema el modelo de PLC seleccionado fue el V120-22-R34 debido a las siguientes características:

- **Entradas digitales:** debido al alto requerimiento del sistema en cuanto a número de entradas digitales, éste modelo es uno de los que trae mayor número de entradas de este tipo con un total de veinte y dos (22), con la posibilidad de ser configuradas tipo “pnp”, es decir, detectan 24 V como un uno (1) lógico y 0 V como un cero (0) lógico. A pesar de que el sistema solo requiere veinte y dos (22), va a ser necesario utilizar un módulo de expansión de entrada digitales, debido a que este modelo de PLC convierte dos (2) entradas digitales en entradas analógicas, las cuales se desean utilizar como reserva; adicionalmente el módulo de expansión de entradas digitales permite al sistema posibles expansiones, detalles inesperados en la implementación, falla o daño.
- **Salidas digitales:** igualmente que en el caso de las entradas, el sistema tiene un alto requerimiento de número de salidas digitales, pero éstas deben ser de tipo relé debido a que todas las salidas son a 110 Vac; por lo anterior, el modelo V120-22-R34, posee doce (12) salidas a relé. A pesar de esto va a ser necesario utilizar módulos de expansión para completar el número de salidas digitales que en total son veinte y cuatro (24)
- **Entradas analógicas:** el número de entradas analógicas del sistema, obligatoriamente requiere de la utilización de un módulo de expansión, por lo que, las dos (2) entradas analógicas que posee éste modelo de PLC no son suficientes.

#### 4.3.7. Selección de módulos de expansión de entradas y salidas

Como primer requerimiento, para poder expandir el equipo de control o PLC, es necesario utilizar un módulo encargado de comunicar las expansiones de entradas y salidas con el PLC, ver Figura 28, llamado módulo de comunicación EXA1.

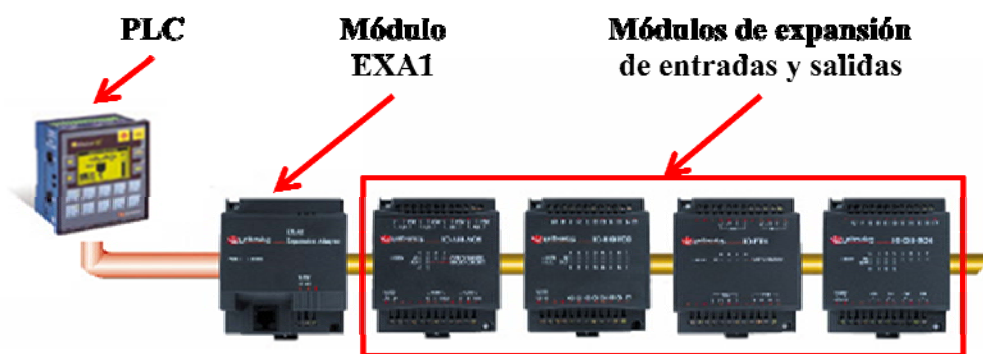


Figura 28. Conexión de los módulos de expansión de entradas y salidas.

- **Entradas digitales:** en vista de que las entradas que provee integrada el PLC no son suficientes para el sistema, por lo que es seleccionado un módulo de expansión Unitronics® para el PLC Vision120™ modelo IO-DI16, con 16 entrada digitales; dejando cuatro (4) salidas para posibles expansiones, cambios inesperados en la implementación, falla o daño de alguna de las entradas.

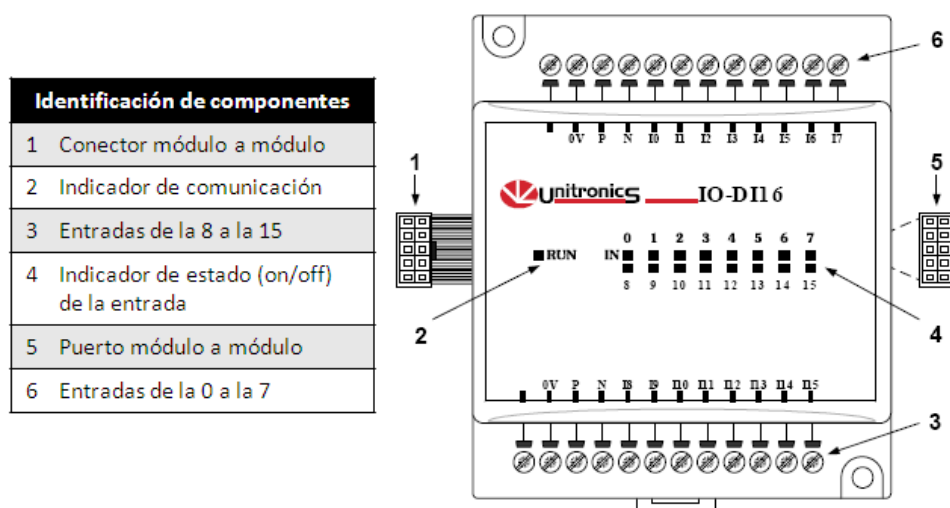


Figura 29. Módulo IO-DI16 de expansión de entradas digitales.

- **Salidas digitales:** las salidas que provee integrada el PLC son doce (12), por lo que no son suficientes para el sistema el cual requiere de por lo menos

veinticuatro (24), teniendo en cuenta que deben ser de tipo relé, son seleccionados dos (2) módulos de ocho (8) salidas cada uno, dejando cuatro (4) salidas para posibles expansiones, cambios inesperados en la implementación, falla o daño de alguna de las salidas.

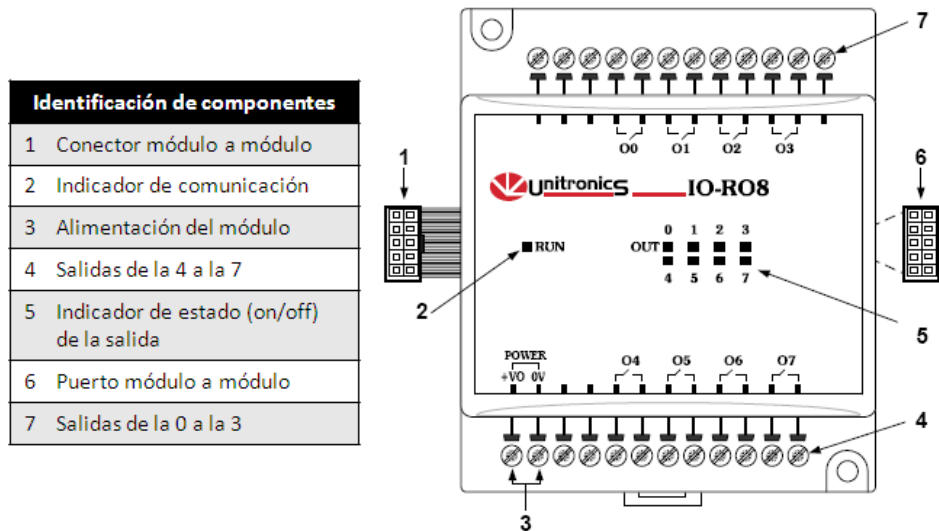


Figura 30. Módulo IO-RO8 de expansión de salidas digitales.

- Entradas analógicas:** para suplir los requerimientos de entradas de éste tipo, se dispuso de un módulo de ocho (8) entradas analógicas (las requeridas por el sistema), compatible con señales de 4 a 20 mA (transductor de presión) y compatible con señales de termopar tipo K (sensor de temperatura); dejando dos (2) entradas en el PLC para posibles expansiones, cambios inesperados en la implementación, falla o daño de alguna de las salidas.

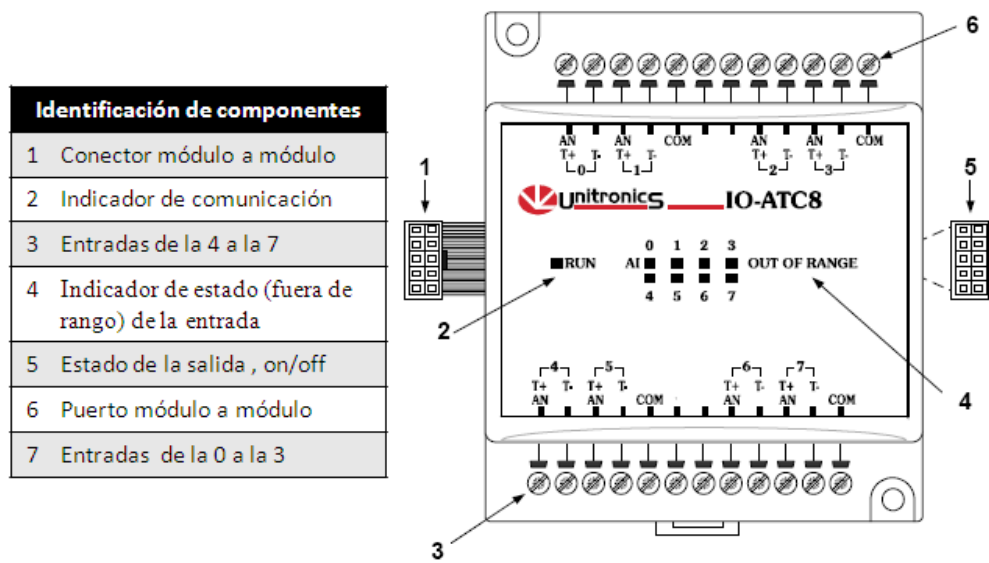


Figura 31. Módulo IO-ATC8 de expansión de entradas analógicas.

- Salidas analógicas:** para suplir la falta de salidas de éste tipo en el PLC, se dispuso de dos (2) módulos de salidas analógicas de seis (6) salidas cada uno, compatible con señal de 4 a 20 mA para cumplir con las ocho (8) salidas que se requieren en el control de las válvulas regulatorias.

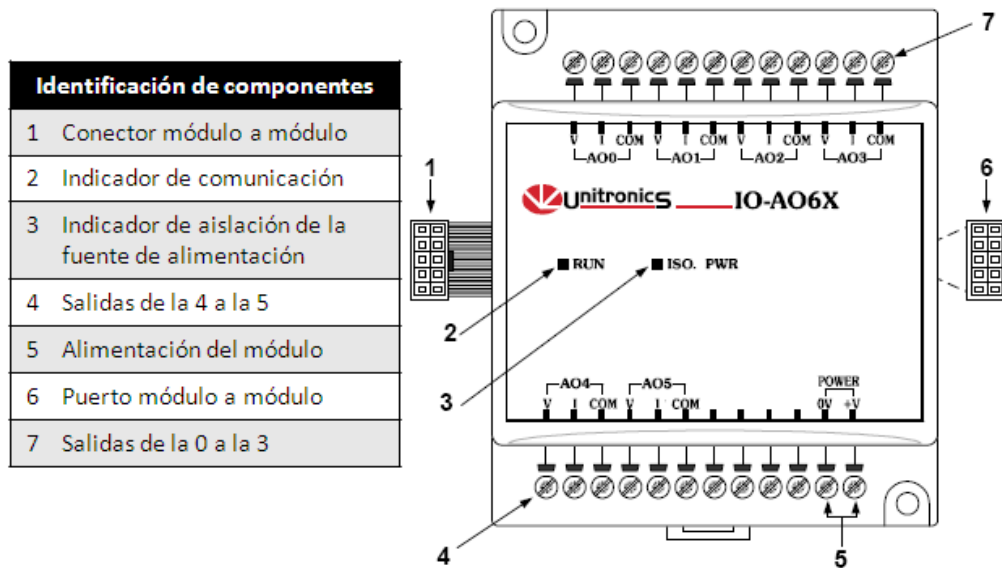


Figura 32. Módulo IO-AO6X de expansión de salidas analógicas.

#### **4.4. DISEÑO DEL AUTOMATISMO**

La descripción del diseño conllevará el manejo general de las etapas del sistema, las cuales representan un ciclo de esterilización completo, dejando los detalles de operaciones del sistema en el manual de operaciones presentado en el ANEXO N°1. En la Figura 33 se presentan los diagramas de flujo generales de un proceso de esterilización en un autoclave.

##### **4.4.1. Etapa de purga del autoclave**

En esta fase se desea suplantar el aire dentro del esterilizador por vapor de agua saturado; debido a la falta de una bomba de vacío, este proceso se va a realizar inyectando vapor a la máquina con el venteo y el drenaje abierto, para así empujar y expulsar el aire, además de drenar posibles restos de agua contenida en el autoclave.

Esta etapa es sumamente importante; dependiendo del nivel de purga de aire que se obtenga, el sistema trabajará durante la etapa de esterilización a una presión correcta para la temperatura de esterilización, lo que indica que la misma se está realizando a vapor de agua saturado, aspecto que es de gran importancia en la eficiencia de la esterilización del producto. Adicionalmente una correcta evacuación del agua, permite que el vapor entre en contacto con todo el producto, y la esterilización sea adecuada y eficiente en cualquier zona.

Se deben realizar las pruebas pertinentes para la detección del tiempo mínimo necesario para la extracción de los niveles requeridos de aire, con el fin de obtener un nivel de error aceptable entre la presión a vapor de agua saturado y la temperatura de esterilización. Las pruebas constan de los siguientes puntos:

- a) Utilizar diferentes tiempos de purga, escogiendo empíricamente la base inicial de tiempo.
- b) Colocar el autoclave cerrado sin agua y producto.

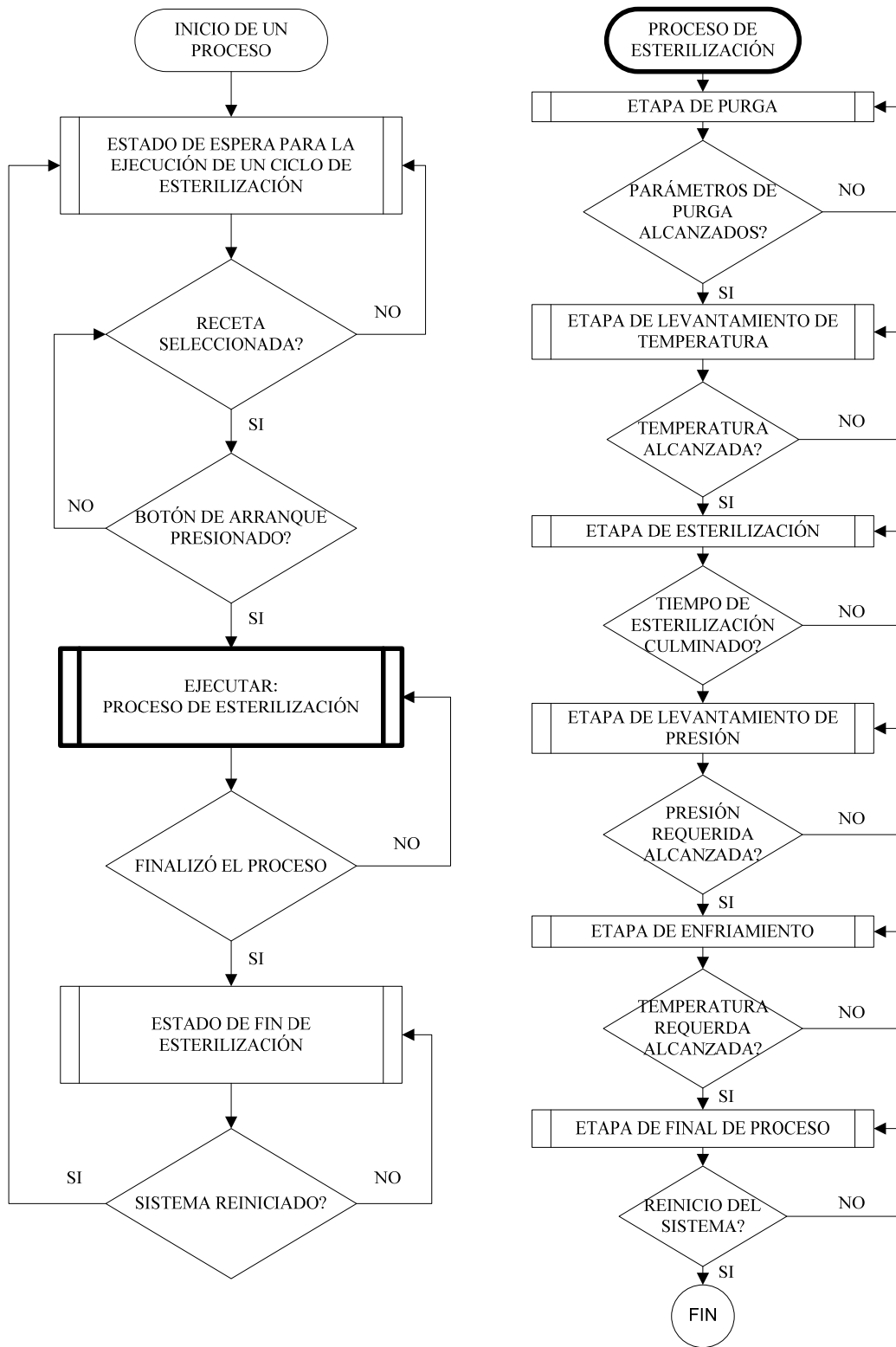


Figura 33. Diagrama de flujo general de un proceso de esterilización.



- c) Realizar un simulacro de esterilización para los diferentes tiempos, inmediatamente posterior a la purga.
- d) Medir la presión a 121 °C.
- e) Comparar la presión obtenida experimentalmente con la presión teórica de vapor de agua saturado, para así calcular el error.
- f) Pedir a la empresa cliente cual es error aceptable en el proceso.
- g) Realizar los análisis correspondientes con los errores obtenidos versus el error permitido, para concluir en la utilización de un tiempo eficiente.
- h) Repetir el proceso con cada base de tiempo por lo menos tres (3) veces.

Como condición adicional, la etapa de purga no solo debe extraer el aire necesario sino también el autoclave debe estar “seco”, es decir, sin contener agua. El sistema debe verificar a través de los sensores de nivel, si el agua ya fue expulsada en su totalidad para que junto con el cumplimiento del tiempo de purga establecido se pueda completar la presente etapa, dando paso a la fase de calentamiento.

#### **4.4.2. Etapa de levantamiento de temperatura**

Posterior a la etapa de purga la temperatura se debe elevar a través de la inyección de vapor de agua saturado dentro del autoclave hasta llegar al punto de operación de la receta seleccionada, esto para poder habilitar el comienzo de la siguiente fase, la cual es la etapa de esterilización.

Durante el levantamiento de temperatura, en condiciones normales, la presión no debería exceder valores no deseados o peligrosos, por lo tanto no se requiere su control, pero sí su supervisión, porque de existir aire dentro del equipo, fallas en la pureza del vapor u otros problemas, la presión podría elevarse a niveles peligrosos siendo necesario activar automáticamente la parada de emergencia.

El control PID se activa en esta etapa, ya que cuando llegue al punto de operación, comenzará la etapa de esterilización y a su vez el conteo regresivo del tiempo de esterilización, todo lo anterior con el control PID ya regulando la temperatura.

#### **4.4.3. Etapa de esterilización**

Durante esta etapa la temperatura lograda en el levantamiento se debe mantener a través de control PID sobre la válvula de vapor, por el tiempo configurado en la receta seleccionada. La presión en ésta fase es de gran interés, debido a que alejarse de la relación presión vs temperatura a vapor de agua saturado sería peligroso para la eficiencia del proceso.

Adicionalmente, se tiene que el parámetro de temperatura debe ser supervisado, debido a que el mismo no puede descender más allá de un rango de seguridad, establecido por el cliente en  $\pm 2$  °C, ya que de ocurrir esto, la esterilización no es confiable y se considera fallida; por lo tanto, se debe indicar cuando esto ocurra, para que así el operador pueda reiniciar el proceso o tomar las acciones requeridas.

Para el cálculo de los parámetros del control PID que posee ésta etapa, se utilizará el método automático de entonación del lazo presente en el equipo de control (PLC), llamado “auto-tune”. Para esto se debe realizar e incluir en el programa final, la lógica requerida para la ejecución de dicha función especial cuando se esté implementando el sistema, ya que el proceso de cálculo de los parámetros del PID con el auto-tune, se realizará solo una vez. Adicionalmente se desea ejecutar algunos de los métodos experimentales de entonación presentados en la sección 2.3.6.

#### **4.5.4. Etapa de levantamiento de presión**

Terminado el tiempo de esterilización, comienza la presente etapa, la cual permite preparar el sistema para que el enfriamiento sea rápido y eficiente sin daños o deformaciones al producto; en otras palabras ésta fase prepara el autoclave para aplicar el método de enfriamiento con agua a alta presión (ver sección 2.2.6.3).

Para subir la presión al valor establecido por el proceso y por la empresa cliente (20 psi aproximadamente) se contamina el vapor existente dentro de la autoclave a través de la inyección de aire a presión, logrando así un aumento de la presión dentro de la cámara hasta el punto de consigna.

Para el buen control de la presión se van a manejar las válvulas de venteo con un control proporcional integral derivativo (PID) y la válvula de aire con un control ON/OFF, en donde la misma se va a mantener abierta para que la válvula de venteo realice el control preciso de la ubicación del sistema en el punto de operación.

Para el cálculo de los parámetros del control PID que posee ésta etapa (los mismos que se aplicarán en la fase de enfriamiento), se utilizará el método automático de entonación del lazo presente en el equipo de control (PLC), llamado “auto-tune”. Para esto se debe realizar e incluir en el programa final, la lógica requerida para la ejecución de dicha función especial cuando se esté implementando el sistema, ya que el proceso de cálculo de los parámetros del PID con el auto-tune, se realizará solo una vez. Adicionalmente se desea ejecutar algunos de los métodos experimentales de entonación presentados en la sección 2.3.6.

#### **4.5.5. Etapa de enfriamiento**

Después del levantamiento de presión se requiere la inyección de agua para enfriar el producto manteniendo obligatoriamente la presión obtenida en el levantamiento (20 psig); ésta acción de mantención la debe realizar el control PID de la válvula de venteo junto con la presión de la línea de aire. La inyección debe

realizarse aplicando todo el poder de agua disponible debido a que el choque térmico con el producto no va a deformarlos, gracias a la presión controlada durante todo el proceso de enfriamiento.

El final del enfriamiento vendrá definido por una temperatura menor a 45°C (dato entregado por la empresa cliente) y por un nivel bajo de agua dentro del esterilizador (señal del sensor de nivel).

Al inyectar agua se corre el peligro de desbordar la autoclave, por lo tanto, el control de la inyección de la misma debe ser controlado por los sensores de nivel alto y de nivel bajo. Al activarse la señal de nivel alto, además de detener por razones obvias la inyección de agua, se debe abrir la válvula de drenaje para así facilitar la expulsión del agua ya caliente y gracias a la presión constante, esta será expulsada como en un hidroneumático; así cuando se active el sensor de nivel bajo, volver a inyectar agua fría al recipiente.

Al lograr la temperatura final del enfriamiento, la válvula de agua se cierra, la de drenaje y la de presión se siguen controlando, para facilitar la expulsión del agua como en un hidroneumático; para cuando se active el sensor de bajo nivel, se deba cerrar la válvula de aire y activar la de venteo con el fin de obtener menos de 2 psig de presurización dentro del autoclave, condición requerida por el cliente para concluir el proceso de esterilización.

#### **4.5.6. Final del proceso**

Al finalizar el enfriamiento se debe indicar que la esterilización finalizó y que se puede dar apertura a la compuerta; durante esta fase es necesario poder indicarle al operador que la autoclave número “X” (donde “X” puede ser un número del 1 al 4) se encuentra en estado de fin de proceso y para poder realizar otra esterilización debe realizar una acción establecida y así de manera correcta se inicializaran las variables y luces de indicación, previniendo equivocaciones de los operadores, como la re-esterilización no deseada de producto.

#### **4.5.7. Estado de “parada de emergencia”**

La parada de emergencia colocara al autoclave en un estado seguro, donde la válvula de venteo y drenaje se colocan en ON (abierto) y la de vapor, agua y aire totalmente cerradas, esto con el fin de prevenir o evitar que alguna situación crítica pueda dañar o generar mayores daños al sistema o al recurso humano presente en el área, como lo es una posible explosión del autoclave por exceso de presión y temperatura.

### **4.5. PROGRAMACIÓN DEL PLC**

En búsqueda de simplificar y mantener organizada la programación, ésta se realizó de forma modular donde se utilizan rutinas específicas para las diversas funciones del sistema, las cuales son llamadas a ejecutarse por la rutina principal (Main Routine) dependiendo de las necesidades del proceso. Se puede observar en la parte izquierda de la Figura 34 el navegador del proyecto, donde se muestran todas las rutinas utilizadas en la programación del PLC.

Las rutinas que manejan un proceso de esterilización automático son las siguientes: ESPERA, PURGA, ESTERILIZACIÓN (controla también el levantamiento de temperatura), ENFRIAMIENTO (controla también el levantamiento de presión) y FINAL.

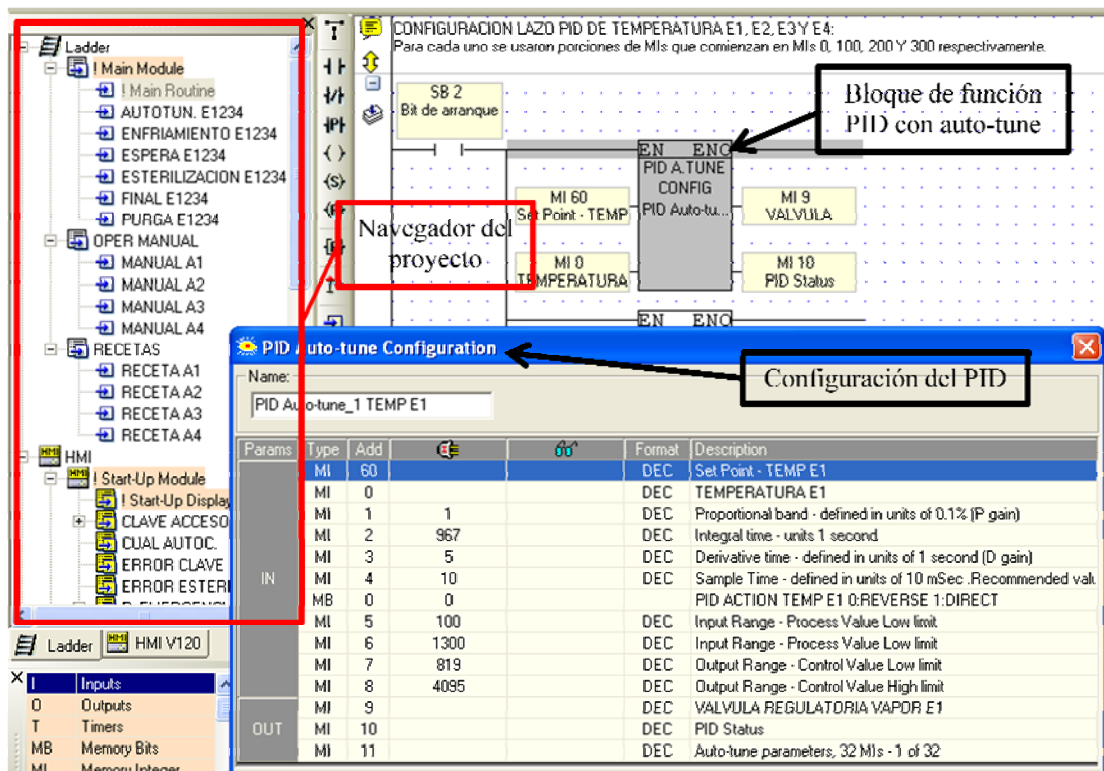


Figura 34. Rutinas en el navegador del proyecto y área de configuración un bloque PID.

Otras rutinas que se pueden observar en la Figura 34 son las utilizadas para operar manualmente cada autoclave: MANUAL A1, MANUAL A2, MANUAL A3 y MANUAL A4; así como las rutinas programadas para la lectura de las tablas que contienen las recetas de cada autoclave: RECETA A1, RECETA A2, RECETA A3 y RECETA A4.

La configuración de un bloque PID para el control de temperatura se puede ver en la zona de la escalera de programación mostrada en la Figura 34. Adicionalmente como ejemplo de programación se puede observar en la Figura 35 las condiciones de programación necesarias para arrancar un proceso de esterilización automático.

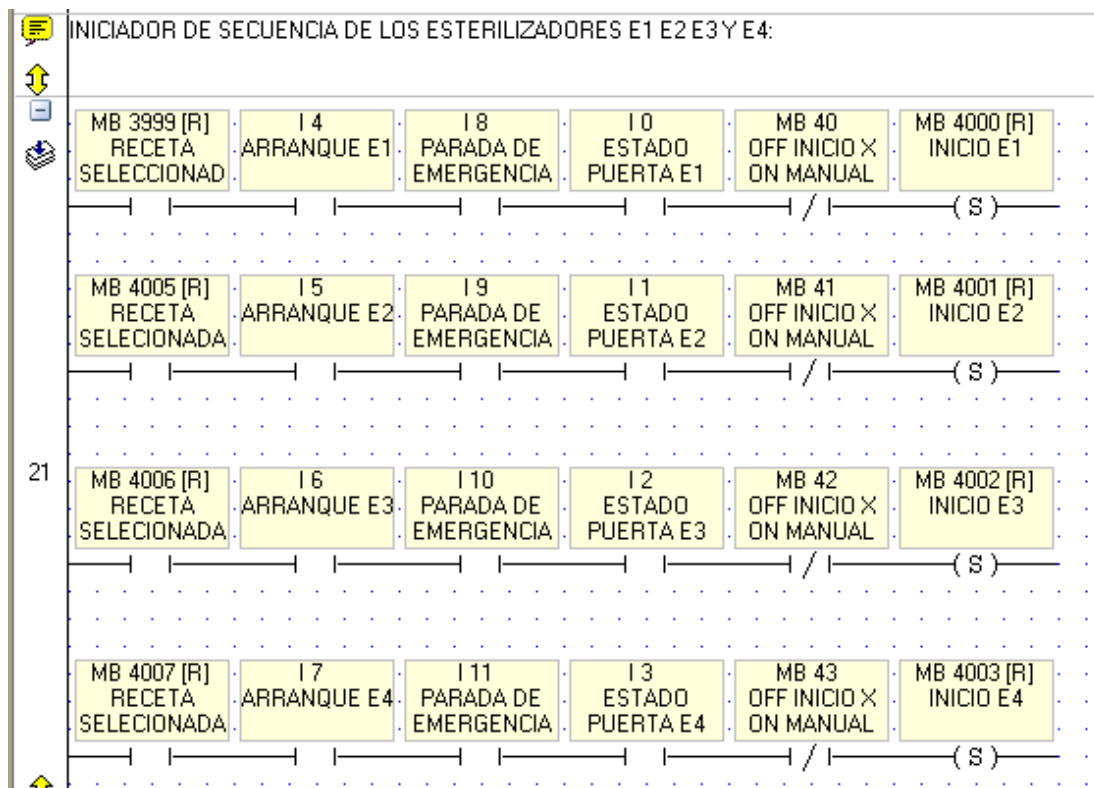


Figura 35. Escalera de programación con las condiciones para el arranque de cada esterilizador.

#### 4.5.1. Área de programación del HMI

En la zona izquierda de la Figura 36, se observa el navegador del proyecto donde se muestran las pantallas programadas para el control y visualización del sistema. En la misma figura se muestra el área que se utiliza para programar las pantallas, en este caso particular se presenta la que permite seleccionar la receta para la esterilización así como las condiciones para realizar los saltos básicos de pantalla.



**Figura 36. Pantallas en el navegador del proyecto y de programación de una pantalla.**

Dentro del funcionamiento del programa se encuentra el manejo general de las pantallas para el control del sistema, en la Figura 37 se puede observar las condiciones para navegar entre en el HMI del PLC. Cada una de estas pantallas realiza una función específica la cual es explicada con detenimiento en el manual de operaciones ubicado en el ANEXO N°1.



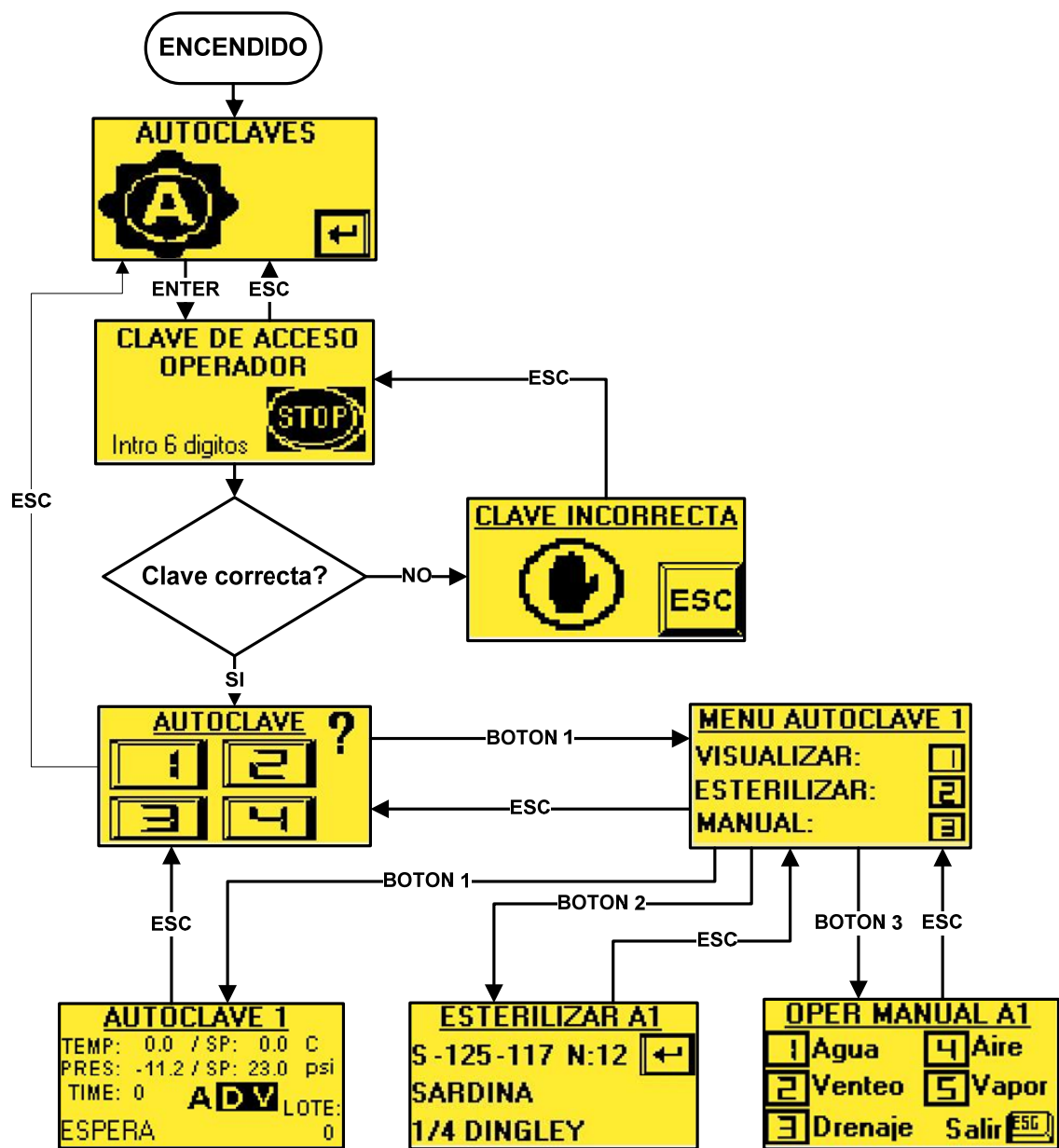


Figura 37. Diagrama de navegación por las pantallas programadas en el PLC.

#### **4.6. PROYECCIÓN DE LA SIGUIENTE ETAPA**

Completada la fase inicial de implementación del sistema, las máquinas esterilizadoras deben tener total operatividad en cuanto a esterilización de productos enlatados, lo que permite analizar la posible próxima fase a implementarse en el sistema. Dentro de la propia necesidad del cliente, se puede mencionar el requerimiento de registrar las variables más importantes de cada proceso de esterilización, para su supervisión e históricos, con lo cual se puede aumentar la calidad del producto, el mejoramiento del manejo de la producción y la confianza de los clientes.

Dentro del estudiado y análisis, se ha encontrado la posibilidad más económica, en donde, se pueden utilizar y programar las funcionalidades de tabla de datos incorporada en el PLC, con lo que a simple vista el operador con un computador portátil pudiera descargar cada cierto tiempo las tablas del PLC, para el posterior análisis de información. Las tablas del PLC son muy abiertas debido a que son programables para las necesidades específicas del sistema. Adicionalmente se puede utilizar la red de la empresa y conectar el PLC a la misma, pudiendo realizar la descarga desde las oficinas o sala de control de la planta sin la necesidad de llevar un operador con un computador a la ubicación de las máquinas.

Como solución más costosa pero que trae beneficios en la calidad y reputación de la empresa, es recomendable un sistema paralelo de recolección de data (registrador) que pueda ser monitorizado desde la sala de control, y conectado a la red de la empresa para la descarga de información remotamente. Lo que beneficia el proceso, siendo un sistema paralelo con sensores independientes que estaría auditando en tiempo real al sistema de control y a los procesos de las máquinas esterilizadoras.

Otro posible proyecto a diseñar e implementar es la supervisión remota de los procesos realizados en dichas autoclaves, debido a que actualmente la planta cuenta con una sala de control y supervisión en la cual es posible añadir la

monitorización remota de las cuatro (4) máquinas esterilizadoras. Lo anterior puede venir incluido dentro de alguna de las dos (2) soluciones presentadas en los párrafos anteriores, en donde el PLC tiene capacidad de conexión vía remota a través de un software propietario, así como poseer los controladores necesarios para ser incluido dentro de un sistema de control, supervisor y de adquisición de datos, también llamado SCADA, por sus siglas en inglés; así como las librerías necesarias para la programación de un supervisorio en lenguajes de programación de alto nivel.

En el caso de un sistema de registro o uno supervisorio, las soluciones son sumamente abiertas por lo deben realizarse los estudios de factibilidad, funcionalidad y economía, para la correcta recomendación, diseño y posible implementación del sistema, todo esto posterior a que la empresa cliente requiera de los servicios mencionados, con el fin de que la empresa prestadora del servicio (INTRAVE) destine recursos y personal para su ejecución.

#### **4.7. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA**

La implementación del sistema se va a ejecutar después de que se cumplan dos aspectos. El primero: la empresa cliente debe tener instaladas y probadas todas las tareas bajo su responsabilidad, descritas dentro de la “asignación de funciones” (ver sección 4.2), las cuales fueron previamente analizadas, diseñadas y limitadas, ajustándose a los aspectos económicos y funcionales que se dispongan durante la ejecución de la primera fase de éste proyecto. El segundo: que el diseño, la programación y manual de operaciones culminados.

El tiempo requerido para la implementación del sistema fue calculado para una (1) semana, en donde, el cronograma de actividades es presentado en la Tabla 11.

**Tabla 11. Cronograma de actividades para implementación del sistema.**

Día	Actividad propuesta
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estado del sistema:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión de las instalaciones de control e instrumentación.</li> <li>• Revisión del cableado de las entradas y salidas del PLC y sus módulos de expansión.</li> <li>• Verificación de la correcta detección y accionamiento de cada una de las entradas y salidas.</li> </ul> </li> <li>- Pruebas básicas de operación, en cada una de las etapas del sistema.</li> <li>- Corrección de errores.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Continuación de las pruebas básicas de operación, en cada una de las etapas del sistema.</li> <li>- Corrección de errores.</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obtención del tiempo mínimo de la etapa de purga.</li> <li>- Obtención de los parámetros del PID del sistema de control de temperatura a través de la inyección de vapor.</li> <li>- Obtención de los parámetros del PID del sistema control de presión a través de la expulsión de aire.</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pruebas completas del proceso de esterilización con diferentes recetas.</li> <li>- Pruebas de esterilización simultánea en las cuatro (4) autoclaves.</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Culminación de los requerimientos y detalles pendientes en el proceso de implementación del sistema.</li> </ul>

## CAPÍTULO V

### PRUEBAS Y RESULTADOS FINALES

#### 5.1. RESULTADOS GENERALES

La implementación del sistema se logró realizar dentro del cronograma propuesto, obteniendo los resultados esperados, los cuales fueron la implementación del automatismo del sistema en las cuatro (4) máquinas esterilizadoras. Los resultados específicos de cada etapa de la implementación se presentan en las secciones a continuación:

#### 5.2. TIEMPO DE PURGA

Durante las pruebas de obtención del tiempo de purga más eficiente, la empresa cliente, dentro de sus rangos de temperatura de esterilización permiten un error de +/-20% del valor adecuado de presión de vapor de agua saturado a una temperatura dada. La definición del error a una temperatura dada se presenta en la ecuación (8):

$$E(\%) = \left( \frac{p_{real} \cdot 100}{p_{ideal}} \right) - 100 \quad (8)$$

Donde:

E: es el error porcentual de la presión ideal contra la presión real.

p(real): presión real medida en el sistema, durante las pruebas.

$p(\text{ideal})$ : presión ideal del vapor de agua saturado a nivel del mar.

Las pruebas fueron realizadas usando como temperatura de prueba 115 °C, debido a que es una temperatura muy cercana a las utilizadas en las recetas, además de que colocar el autoclave a mayor temperatura requiere de mucho más tiempo por causas de poder calórico en la línea de vapor y por problemas con el aislante térmico de las máquinas esterilizadoras. Los resultados que se muestran en la Tabla 12, son el promedio de tres (3) corridas por prueba con cada base de tiempo; y los valores resultantes son aproximados ya que el sistema no tiene una estabilidad ideal en la medición de presión y temperatura.

**Tabla 12. Resultados de las pruebas para el cálculo del tiempo de purga.**

Tiempo (minutos)	Presión ideal a 115 °C (psig)	Presión real (psig)	Temperatura real (°C)	Error (%)
1	10 psig	15,2	115 °C	52
3	10 psig	11,6	115 °C	16
6	10 psig	11,3	115 °C	13
10	10 psig	11,2	115 °C	12

El tiempo mínimo seleccionado para la etapa de purga fue de 3 minutos en concordancia con el representante de la empresa cliente. Recordando que es el tiempo mínimo, debido a que si el autoclave no se ha vaciado de líquido en su totalidad, el sistema no progresa a la próxima fase.

### 5.3. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROL PID

Debido a que el tiempo permitido para la implementación se hizo escaso, esto a causa de los múltiples detalles que se presentaron en la marcha, la obtención de los parámetros de los lazos de control para las válvulas que estaban controladas por un sistema proporcional integral derivativo (PID) solo fueron calculados a través del método automático de “auto-tune” o “auto-ajuste” que posee el equipo de control o PLC.

La aplicación de ésta función según recomendaciones del manual de programación del PLC requiere de por lo menos la activación de tres (3) fases, es decir, que el “auto-tune” se ejecute tres veces seguidas, con el fin de obtener parámetros más precisos. En este caso se configuró en cinco (5) fases.

Los parámetros obtenidos para que el sistema PID encargado de controlar la temperatura en la etapa de esterilización, es decir, el control regulatorio de la apertura en la válvula de inyección de vapor; y los parámetros obtenidos para el sistema PID encargado de controlar la presión del sistema en la etapa de enfriamiento, es decir, el control regulatorio de la apertura en la válvula de inyección de aire (ver sección 5.4), se presentan a continuación:

**Tabla 13. Parámetros de los controladores PID.**

Parámetros	PID	PID
	(control de temperatura)	(control de presión)
Banda proporcional	0,1 %	0,9 %
Tiempo integral	967 seg.	9855 seg.
Tiempo derivativo	5 seg.	4 seg.
Tiempo de muestreo	100 mseg.	100 mseg.

Las pruebas de obtención de los parámetros fueron realizadas dos (2) veces en un solo autoclave y los parámetros fueron replicados a las otras máquinas esterilizadoras, utilizándose el promedio entre ambas corridas.

#### **5.4. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA**

El levantamiento de temperatura y la mantención del punto de operación de temperatura impuesto por la receta seleccionada, es controlado por la inyección regulatoria de vapor a través de un control PID, este sistema efectuó a plena cabalidad la función requerida, obteniéndose errores en el control de la temperatura no mayores al 1% en todas de las pruebas realizadas con un punto de operación del 115°C, además de un levantamiento de temperatura rápido y eficiente, prácticamente con la válvula al 100% hasta colocarse muy cerca del punto de consigna.

#### **5.5. SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN**

Debido a un error en la instalación de la instrumentación y control por parte de la empresa cliente, la válvula regulatoria para el control de presión en la etapa de enfriamiento, no es la de venteo sino la de aire, dejando así la de venteo como una válvula de control ON/OFF.

El cambio en la instalación de la instrumentación en las cuatro (4) máquinas, buscando el cumplimiento del diseño propuesto no pudo ser efectivo, debido a la imposibilidad de los departamentos encargados de realizar dicho cambio por falta de disponibilidad de tiempo, lo que produciría que la implementación se pospusiera, aspecto que no se desea llevar a cabo debido a los requerimientos de producción y a los aspectos económicos propios de los proyectos entre la empresa cliente y la



empresa prestadora de servicio, retardando los pagos y la conclusión del mismo. Por lo anterior se realizaron las modificaciones en el programa para que el sistema funcione como se encuentra instalado, es decir, la válvula de aire controlada por el PID y la válvula de venteo funcionando como ON/OFF.

En sí el sistema logra controlar y ejecutar correctamente la etapa de “levantamiento de presión”, ya que el control PID sobre la válvula de aire logra regular adecuadamente la presión dentro del autoclave manteniendo la misma dentro del 1% de error y ejecutando un levantamiento de presión rápido y eficiente; posteriormente se presentaron dos problemas de inestabilidad en el control de presión durante la etapa de “enfriamiento”, expuestos en la sección 5.6.

## **5.6. INESTABILIDADES EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO**

La primera inestabilidad se presenta cuando el agua que refrigera el producto comienza a entrar en el autoclave, produciendo una caída de presión de hasta 8 psig, efecto totalmente indeseado, porque puede causar daño en la integridad física del enlatado. La solución a éste problema radicó en incrementar el punto de operación del control PID a través de la válvula de aire a 23 psig e inhibir la inyección del líquido refrigerante cuando la presión sea menor a 21 psig, consiguiendo caídas de presión que no disminuían a menos de 18 psig.

La segunda inestabilidad encontrada en el control de presión se atribuye a los cambios realizados en el programa, debido a la conexión invertida del control válvula de aire con válvula de venteo mencionado en la sección 5.5. El sistema presenta una inestabilidad a causa de que el manejo de la válvula de venteo es a través de un sistema ON/OFF, lo que genera gran pérdida de presión a pesar de que la válvula dure el mínimo tiempo de apertura requerido para no acortar la vida útil del sistema encargado de abrir y cerrar la válvula.

La presión cuando comienza a elevarse, a causa de la dinámica del proceso y la entrada de agua a presión, genera lógicamente el cierre total de la válvula de aire y habilita un proceso de control ON/OFF con la válvula de venteo para controlar la elevación de presión, lo que genera, que cuando se abra la válvula de venteo aunque sea por un instante, el autoclave pierda excesiva presión, entre los 3 y 6 psig, por lo que mantenerse muy cerca del punto de consigna original (20 psig) o del nuevo punto de operación (23 psig) es imposible.

Aparentemente la alta presión no es dañina para el producto, pero sí lo es la baja presión, así que se tuvo especial énfasis en esto. Debido a éste fenómeno, el punto de operación del control de venteo debió elevarse a un valor de 25 psig, evitando que la presión disminuya por debajo de un valor especificado por el cliente de 18 psig.

Las pruebas realizadas con producto dentro del autoclave utilizando las especificaciones anteriores, presentaron como resultado una integridad absoluta en el enlatado, usando como método de prueba una receta temporal con un corto tiempo de esterilización (10 minutos) para así realizar procesos completos de prueba de esterilización y enfriamiento de forma más eficiente.

## **5.7. CIRCULACIÓN DEL AGUA REFRIGERANTE**

Debido a que el levantamiento del punto de operación de la válvula de venteo y la inyección controlada del agua logra resolver el problema de la caída de presión. Durante la expulsión del líquido, en donde se apertura el drenaje para permitir la expulsión del agua caliente y posteriormente volver a inyectarla de forma controlada, cabe destacar que la presión no es afectada en lo absoluto y el control PID de la válvula de aire logra mantener adecuadamente el nuevo punto de operación.

Donde se presentaron problemas de eficiencia productiva fue durante la circulación de agua entre las horas 2 a 6 pm, más crítica aún al final de la tarde,

donde el tiempo de enfriamiento se incrementa en exceso debido a que el agua refrigerante se encuentra a una temperatura bastante cercana (30 a 40 °C) del valor de temperatura para proceder a ejecutar la etapa de “final del proceso”.

Por motivos de aumento en la eficiencia de la producción, la temperatura (45 °C) para que la etapa de enfriamiento finalice no puede ser elevada, ya que inmediatamente después de la esterilización de producto, es pasado a la zona de etiquetación y si el enlatado se encuentra muy caliente, las etiquetas no quedan bien adheridas al producto.

## **5.8. ESTADO DE PARADA DE EMERGENCIA**

Una de las desventajas de activar éste estado de forma no adecuada es la posible descompresión del sistema en la etapa de enfriamiento con consecuencias como la deformación del producto contenido; por este motivo, se realizaron las recomendaciones pertinentes para que la empresa cliente entrene de forma adecuada a los operadores del sistema.

## CONCLUSIONES

El desarrollo, diseño e implementación de un sistema de control automático de máquinas esterilizadoras para productos alimenticios enlatados fue satisfactorio, en otras palabras, las cuatro (4) máquinas se encuentran realizando procesos completos de esterilización de forma automática e independiente.

Las etapas dentro del diseño del control automático, salvo ciertas modificaciones explicadas en las secciones anteriores, se pudieron aplicar y poner en funcionamiento de manera exitosa, por lo que la estructuración del sistema y del proceso permitió una buena y eficiente ejecución de la fase de implementación, solo generándose ciertos problemas e inconvenientes propios de un proyecto de tal envergadura.

El manual de operación fue enviado a la empresa cliente para su revisión y posterior crítica, las cuales fueron tomadas e incluidas en la versión final del manual de operaciones del sistema “Automatización de cuatro esterilizadores para productos alimenticios enlatados”, por lo que se logra el objetivo de dotar a la empresa cliente de la documentación necesaria para la comprensión, operación y mantenimiento del sistema.

La fase inicial del proyecto comprendía el sistema que se encuentra actualmente implementado, lo que abre el camino para el desarrollo de las próximas fases posibles. Para proyectar una siguiente etapa, se ha rescatado durante la implementación los posibles faltantes y/o integraciones que se tengan con la planta en general, así como requerimientos informalmente presentados por la empresa cliente, dentro de los cuales se puede mencionar una posible expansión de los límites actuales, es decir, complementar el sistema actual con la inclusión del registro de variables críticas y comunicaciones ampliadas para la supervisión desde la sala de control de la planta.

## RECOMENDACIONES

- **Efectos negativos para el proceso**

Dentro de los pros y contras del sistema implementado en el presente trabajo de grado, las pruebas realizadas constataron que el sistema puede funcionar de manera correcta, adecuada y eficiente salvo cuando se presentan dos efectos.

El primero, se presenta cuando la torre de enfriamiento no realiza a cabalidad su función y el agua refrigerante en la etapa de enfriamiento se encuentra cercana a la temperatura para que el proceso culmine la etapa enfriamiento, lo que ocasiona retrasos hasta a veces excesivos en los tiempos de ejecución de dicha etapa. Se recomienda el mantenimiento, mejoramiento o crecimiento del sistema encargado (torre de enfriamiento) de mantener el líquido refrigerante, en este caso agua, a la menor temperatura posible para así mantener la eficiencia en tiempo de la producción del sistema.

El segundo, depende del poder en la línea de vapor y el aislamiento de las máquinas esterilizadoras, siendo posibles causas de que el sistema se tome mucho tiempo en obtener levantamientos de temperatura mayores o iguales a los 118 °C, por lo que las recetas que posean alto punto de consigna en la temperatura de esterilización aumentarán sensiblemente el tiempo de la etapa de levantamiento de temperatura; si a lo anterior se le añade que cuando se comienzan a realizar esterilizaciones múltiples, es decir, esterilizaciones simultáneas en dos (2) y hasta cuatro (4) autoclaves, los tiempos de levantamiento se incrementan aún más, y costándole al sistema alcanzar temperaturas mayores e iguales a los 114 °C.

Las cuatro (4) máquinas esterilizadoras implementadas no son los únicos procesos dentro de la planta de la empresa cliente que requieren de vapor para su funcionamiento, por lo tanto, es recomendable así incrementar la potencia de la línea de vapor, aislar de mejor manera la línea de vapor, aislar de mejor manera las

máquinas esterilizadoras y por último manejar las producciones de forma no simultanea, o por lo menos evitarlo en las etapas que requieran de vapor, generando por ejemplo, una secuencia de accionamientos de procesos y un ciclo de producción general para la planta.

- **Control de presión en la etapa de enfriamiento**

Debido a la conexión invertida de control entre la válvula de aire y la de venteo realizada por el cliente, en referencia a lo propuesto en el diseño, la banda de operación de presión se encuentra aproximadamente entre los 18 y los 25 psig, aspecto que podría afectar a productos futuros con nuevos envases que posean menores tolerancias, por lo que se recomienda tener especial cuidado con este parámetro. Así mismo existe la posibilidad de contratar un servicio de reprogramación en donde se cumpla con el diseño propuesto y así disminuir las variaciones de presión en el control de la etapa de enfriamiento.

- **Expansión del sistema en próximas fases**

La fase inicial de implementación del sistema, al ser realizada satisfactoriamente, permite la posibilidad de que la empresa cliente requiera los servicios para el diseño e implementación de las próximas fases propuestas, debido a que si no se realiza el requerimiento, INTRAVE no destinará recurso ni personal para la ejecución de dicho diseño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cofrusa y Frutas S.A. Enlatado de alimentos. Disponible en: <<http://www.cofrusa.com/web/es/historia.php>>. [Consulta 08/2007].
- [2] Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos. *Nutrición 21*. Vol. 5. 2001. p. 26-28.
- [3] Clavell, L. y Pedrique de Aulacio, M. *Microbiología. Manual de Métodos Generales*. Segunda Edición. Caracas. Facultad de Farmacia. Universidad Central de Venezuela. 1992. p. 63-95.
- [4] Black, J. *Microbiology and Exploration*. Cuarta Edición. Ed: John Wiley & Son, Inc. New York. 1988. p. 55-78.
- [5] Universidad Autónoma Metropolitana de Iztapalapa. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 4. N° 1. 2005. p. 2-3.
- [6] Microbiología Argentina. Dedicada al ramo de la microbiología. Disponible en: <<http://www.microbiologia.com.ar/bacteriologia/esterilizacion.php>>. [Consulta 08/2007].
- [7] Zechman, L. y Pflug, I. *Location of slowest heating zone for natural convection heating fluids in metal containers*. Journal of Food Science. Vol. 54. 1989. p. 205-210.
- [8] Gadonna, J., Pain, J. y Barigou, M. *Determination of convective heat transfer coefficient between a free particle and a conveying fluid in horizontal pipe*. Food and Bioproducts Processing. Vol 74. 1996. p. 27-39.
- [9] Jiménez Islas, H., López Isunza, F. y Ochoa Tapia, J. *Natural convection in a cylindrical porous cavity with internal heat source: a numerical study with Brinkman extended Darcy model*. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 42. 1999. p. 4185-4195.

- [10] Abbot, M., Van Ness, H. *Termodinámica*. Serie Schaum. Libro. Mc Graw-Hill, México. 1975. [Consulta 08/2007].
- [11] Vaxa Software. Soluciones de software educacionales y documentos. *Presión de vapor de agua a varias temperaturas*. Disponible en: <[http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/pvh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/pvh2o.pdf)>. [Consulta 08/2007].
- [12] Vila Jato, José Luis. *Tecnología Farmacéutica. Volumen I: Aspectos fundamentales de los sistemas farmacéuticos y operaciones básica*. Primera Edición. Madrid. 2001. p. 25-110.
- [13] Systec The Autoclave Company. Manufactura de autoclaves. *Process Engineering*. Disponible en: <<http://www.systec-lab.com/>>. Sección: *Process Engineering*. [Consulta 08/2007].
- [14] PIEDRAFITA, Ramón. *Ingeniería de la Automatización Industrial*. Segunda edición. Alfaomega-Rama. Madrid. 2003. p. 155-210.
- [15] Hugh, Jack. *Automating Manufacturing Systems with PLCs*. Quinta Edición. 2007. p. 20-88 y 596-612.
- [16] Chen, Chi Tsong. *Analog and Digital Control System Design*. Saunders College Publishing & Harcourt Brace Jovanovich College Publisher. Primera Edición. University of New York. p. 551-563.
- [17] Instrumentación y Automatización Venezolana, Intrave C.A. *Introducción a los PLC's Controladores Lógicos Programables*. Ingeniero MBA Delgado M., Enrique. 2005. p. 3-11 y 46-72.
- [18] Instrumentación y Automatización Venezolana, Intrave C.A. *Control de procesos*. Ingeniero MBA Delgado M., Enrique. 2005. p. 52-63.
- [19] Unitronics. *Visilogic Software Manual Function Block*. 2004. p. 6-21.
- [20] Instrumentación y Automatización Venezolana. *Instrumentación para la Industria*. Ingeniero MBA Delgado M., Enrique. 2005. p. 8-14.



## BIBLIOGRAFÍAS

- BELA, Liptak. *Instrument Engineer's Handbook on Process Control*. The Instrumentation, Systems, and Automation Society. Cuarta Edición.
- Clavell, L. y Pedrique de Aulacio, M. *Microbiología. Manual de Métodos Generales*. Segunda Edición. Caracas. Facultad de Farmacia. Universidad central de Venezuela. 1992.
- Dos Reis De Abreu, Avelino Gilberto. *Automatización de la línea de producción de alimentos a escala*. Dos Reis De Abreu Avelino Gilberto (Tesis).-- Caracas: Universidad Central de Venezuela. 1999.
- Hugh, Jack. *Automating Manufacturing Systems with PLCs*. Quinta Edición. 2007.
- Instrumentación y Automatización Venezolana, Intrave C.A. *Control de procesos*. Ingeniero MBA Delgado M., Enrique. 2005.
- Instrumentación y Automatización Venezolana, Intrave C.A. *Introducción a los PLC's Controladores Lógicos Programables*. Ingeniero MBA Delgado M., Enrique. 2005.
- Instrumentación y Automatización Venezolana. *Instrumentación para la Industria*. Ingeniero MBA Delgado M., Enrique. 2005.
- Misle S., Juan G. Modernización del sistema de control de un generador de vapor (Caldera) en la empresa Agroindustrial Lesmi utilizando un controlador Industrial. Misle S. Juan G. (Tesis).-- Caracas: Universidad Central de Venezuela. 2005.
- Unitronics. *Visilogic Software Manual Function Block*. 2004.
- Vaxa Software. Soluciones de software educacionales y documentos. *Presión de vapor de agua a varias temperaturas*. Disponible en: <[http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/pvh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/pvh2o.pdf)>. [Consulta 08/2007].

- Vila Jato, José Luis. *Tecnología Farmacéutica. Volumen I: Aspectos fundamentales de los sistemas farmacéuticos y operaciones básica*. Primera Edición. Madrid. 2001.

# **ANEXOS**

[ANEXO N°1]

[Manual de operaciones del sistema automatizado]

# PROYECTO DE AUTOMATIZACION UNITRONICS



## *AUTOMATIZACION DE CUATRO ESTERILIZADORES PARA PRODUCTOS ALIMENTICIOS ENLATADOS*

Julio 2008

INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN VENEZOLANA

INTRAVE, C.A

R.I.F.: J-31267778-3

Caracas - Venezuela

Telfs: (0212) 953.50.80 / 953.51.80 / 952.45.89

Fax (0212) 951.25.21 ✉ [sopORTE@intrave.com](mailto:sopORTE@intrave.com)

[www.intrave.com](http://www.intrave.com)



## INDICE

EQUIPOS UNITRONICS, TABLERO DE CONTROL .....	110
MANUAL DE OPERACIONES .....	113
1. TECLADO DEL OPLC VISION120 .....	113
2. PULSADORES DEL TABLERO DE CONTROL.....	114
3. PANTALLA DE INTERFAZ, OPERADOR – PROCESO .....	115
3.1. Pantalla de inicio:.....	115
3.2. Pantalla de clave de acceso y de clave errada:.....	116
3.3. Pantalla de selección de autoclave:.....	117
3.4. Pantalla de menú de autoclave:.....	117
3.5. Pantalla de visualización de proceso: .....	118
3.6. Pantalla de recetas de autoclave: .....	120
3.7. Pantalla de menú modo manual:.....	121
3.8. Pantalla de parada de emergencia: .....	121
4. DIAGRAMA DE FLUJO DE NAVEGACIÓN POR LAS PANTALLAS...	125
5. LUCES PILOTO DEL TABLERO DE CONTROL .....	126
5.1. Estado de “Espera”: .....	126
5.2. Estado de “Receta seleccionada - En espera de inicio de proceso”: .....	127
5.3. Estado de “Etapa de purga”:.....	127
5.4. Estado de “Etapa de calentamiento”:.....	128
5.5. Estado de “Etapa de esterilización”:.....	128
5.6. Estado de “Etapa de enfriamiento”: .....	129
5.7. Estado de “Etapa de final de proceso”: .....	129
5.8. Estado de “Parada de emergencia”: .....	129
5.9. Estado de “Modo manual”:.....	130
6. DETALLES IMPORTANTES DEL PROGRAMA .....	130
6.1. Estado de “Espera”, “Fin de esterilización” y “parada de emergencia”:.....	130

6.2.	Re-Inicio, Proceso y finalización de la esterilización:.....	131
6.3.	Parada de emergencia: .....	132
6.4.	Uso manual: .....	133
7.	ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA:.....	133
8.	SOFTWARE .....	138
9.	MANTENIMIENTO DEL SISTEMA.....	138

## EQUIPOS UNITRONICS, TABLERO DE CONTROL

OPLC Vision120 (Figura 38), encargado de **controlar el proceso de esterilización de las cuatro (4) autoclaves**, integrado a pantalla gráfica y teclado, conectado a una gran variedad de I/Os propios del OPLC y en módulos de expansión, que intervienen en el proceso. Alimentación 24V. 22 entradas digitales utilizadas para: relés de compuerta, pulsadores de arranque, pulsadores de parada de emergencia y pulsadores de escape. 12 salidas digitales utilizadas para: luces piloto verde #1, verde #2 y roja. Ubicación: Puerta principal del tablero de control, con acceso externo.



**Figura 38. OPLC Vision 120.**

Módulo adaptador de expansiones EX-A1 (Figura 39), utilizado para realizar la conexión de comunicación entre el OPLC Vision120 y los módulos de expansión de I/Os, alimentación 24V. Ubicación: Riel DIN dentro del tablero de control.



**Figura 39. Módulo de comunicación EX-A1.**

Dos (2) módulo de expansión IO-RO8 (Figura 40), con 8 salidas a relé cada uno, utilizados para controlar las salidas de venteo, drenaje y agua de cada autoclave, alimentación 24V. Ubicación: Riel DIN dentro del tablero de control.



**Figura 40. Módulo de expansión de salidas a relé IO-RO8.**

Dos (2) módulo de expansión IO-AO6X (Figura 41), con 6 salidas analógicas cada uno, utilizados para el control de la válvula de vapor y la válvula de aire de cada autoclave, alimentación 24V. Ubicación: Riel DIN dentro del tablero de control.



**Figura 41. Módulo de expansión de salidas analógicas IO-AO6X.**

Módulo de expansión IO-DI16 (Figura 42), con 16 entradas digitales, utilizado para los pulsadores ubicados en la puerta principal del tablero, alimentación 24V. Ubicación: Riel DIN dentro del tablero de control.





**Figura 42. Módulo de expansión de entradas digitales IO-DI16.**

Módulo de expansión IO-ATC8 (Figura 43), con 8 entradas analógicas para termopar y/o para señales de corriente y voltaje, utilizado para la lectura de temperatura y presión de cada autoclave, alimentación 24V. Ubicación: Riel DIN dentro del tablero de control.



**Figura 43. Módulo de expansión de entradas analógicas IO-ATC8.**

## MANUAL DE OPERACIONES

Para el manejo del proceso de esterilización el operador posee cuatro vínculos con el sistema, los cuales son: la pantalla gráfica del OPLC Vision120, el teclado del propio OPLC, los pulsadores del tablero de control y por último las luces piloto también del tablero de control.

### 1. TECLADO DEL OPLC VISION120

En la Figura 44 se observa el OPLC Vision120 el cual posee una pantalla para el interfaz hombre-proceso y un grupo de teclas.

Fácilmente se pueden ubicar las teclas que principalmente se manejan dentro del proceso, como los son: el ENTER; las flechas ARRIBA y ABAJO; y los números “1”, ”2”, ”3”, ”4”, “5”, “6”, “7”, “8”, “9” y “0”. Estas teclas tendrán diversas funciones dentro del programa del equipo.



**Figura 44. Imagen del OPLC Vision 120.**

## 2. PULSADORES DEL TABLERO DE CONTROL

En La Figura 45, se observa la distribución de los pulsadores en el tablero de control, y se muestra la función que posee cada uno.

Estos pulsadores son equivalentes a las teclas del OPLC, es decir, realizan las mismas funciones, por lo tanto da lo mismo presionar el pulsador 1 que presionar el botón 1 del teclado del OPLC. Al igual que en el teclado del OPLC, estos pulsadores realizan ciertas funciones, relacionadas con la interfaz de la pantalla del equipo. Los únicos pulsadores que no tienen equivalencia en el teclado del OPLC, son los pulsadores de “INICIO”, la “LLAVE” y “PARADA DE EMERGENCIA”.

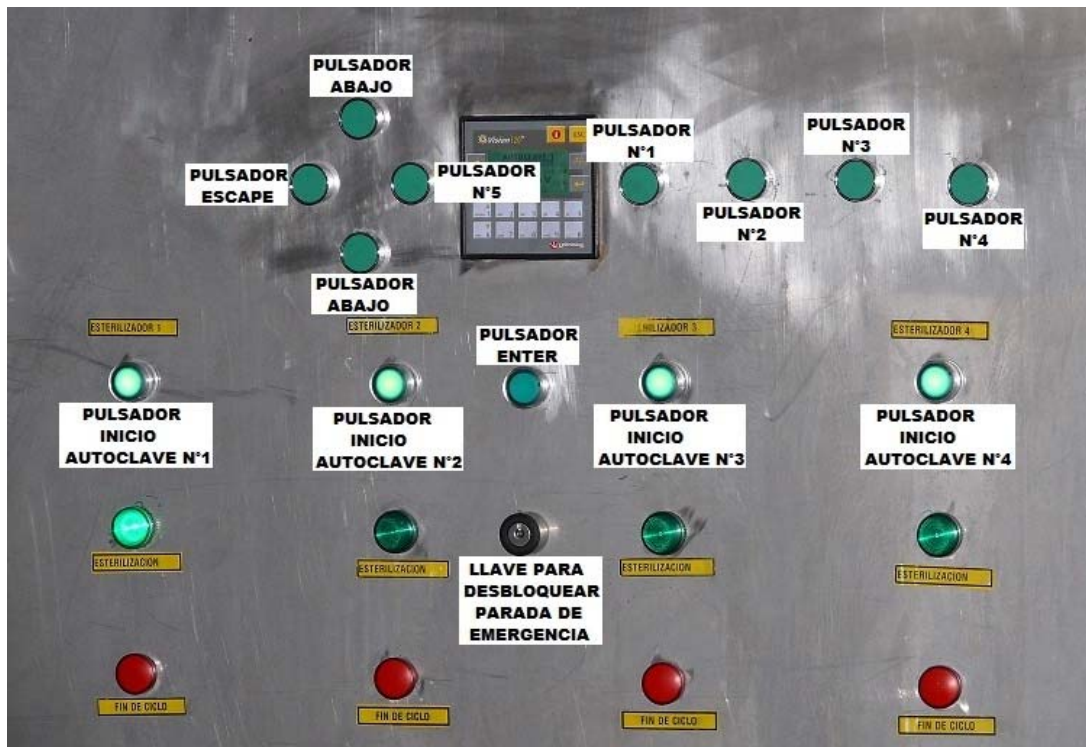


Figura 45. Tablero de control.

**Nota:** En la Figura 45 no aparecen el pulsador de “parada de emergencia”, el cual está ubicado debajo de las luces piloto rojas.

**Nota:** Los pulsadores tienen el propósito de no desgastar o dañar el teclado del OPLC, esto a petición de la empresa cliente, debido a que se sospecha que los operadores puedan darle un trato inadecuado al teclado en cuestión.

**Nota:** ¡A partir de este momento al referirse a un botón del teclado del OPLC también se estará haciendo mención del pulsador (en el tablero) que representa esa tecla!, siendo no necesario referirse a ambos.

### 3. PANTALLA DE INTERFAZ, OPERADOR – PROCESO

#### 3.1. Pantalla de inicio:

La **pantalla de inicio** es la mostrada en la Figura 46, la cual puede aparecer debido a dos sucesos, el primero, el OPLC pasa de un estado de apagado a encendido, y el segundo, debido a que el operador pulso las veces necesarias la tecla ESC. Esta pantalla simplemente presenta el nombre del programa y el sello de la empresa.



**Figura 46. Pantalla de inicio.**

Dentro de la pantalla se encuentra el símbolo de ENTER, lo que hace referencia a que si la tecla de ENTER es presionada se accederá a otra pantalla, que en este caso es la de **clave de acceso**.

### 3.2. Pantalla de clave de acceso y de clave errada:

Esta pantalla (Figura 47) requiere la introducción de la clave de acceso al programa. Esta clave solo debe poseerla el personal autorizado, y solamente podrá ser escrita a través del teclado del OPLC.



**Figura 47. Pantalla de clave de acceso.**

Luego de introducir correctamente la clave de 6 dígitos, el programa automáticamente pasará a la próxima pantalla; de introducirse una clave errónea el programa saltará a la **pantalla de clave errada** y será necesario presionar la tecla ESC para regresar a la **pantalla de clave de acceso**.



Figura 48. Pantalla de clave errada.

### 3.3. Pantalla de selección de autoclave:

En la presente pantalla se puede seleccionar a cual menú de las cuatro autoclaves se desea acceder, debido a que al presionar el respectivo número de cada autoclave, se entrará a la **pantalla de menú autoclave X** (donde X representa el número de la autoclave seleccionada 1, 2, 3 o 4).



Figura 49. Pantalla de selección del autoclave.

### 3.4. Pantalla de menú de autoclave:

En la presente pantalla se visualiza el menú de la autoclave n°1, en donde se puede elegir entre acceder a la **pantalla de visualización del proceso del autoclave 1** presionando la tecla n°1, como a la **pantalla de recetas del autoclave 1**

presionando la tecla n°2, por último a la **pantalla de menú modo manual del autoclave 1** presionando la tecla n°3.



**Figura 50. Pantalla de menú autoclave 1.**

**Nota:** Esta pantalla y el acceso a las otras pantallas ocurren de forma similar con las demás autoclaves, por lo tanto, solo se procede a explicar las pantallas para una autoclave, que en este caso es la n°1.

### **3.5. Pantalla de visualización de proceso:**

En la Figura 51 se observa la presente pantalla, donde se visualiza los siguientes parámetros del proceso:



**Figura 51. Pantalla de visualización del proceso autoclave 1.**

- a) TEMP: Muestra la temperatura actual del autoclave.
- b) SP: En el caso de la temperatura, muestra el punto de operación solo de la etapa de ESTERILIZACION. En el caso de la presión muestra el punto de operación únicamente de la etapa de ENFRIAMIENTO.
- c) PRES: Indica la presión actual del autoclave.
- d) TIME: Presenta el tiempo de esterilización de la receta seleccionada, y únicamente va a correr de forma regresiva cuando se esté en la etapa de ESTERILIZACION.
- e) LOTE: Muestra el lote actual que se está esterilizando.
- f) A: Letra que indica el estado de la válvula de AGUA. Fondo Amarillo indica válvula en OFF, fondo negro indica válvula en ON.
- g) D: Letra que indica el estado de la válvula de DRENAJE. Fondo Amarillo indica válvula en OFF, fondo negro indica válvula en ON.
- h) V: Letra que indica el estado de la válvula de VENTEO. Fondo Amarillo indica válvula en OFF, fondo negro indica válvula en ON.
- i) MENSAJE: En esta área se indica la etapa en la cual se encuentra el autoclave, y los mensajes posibles son los siguientes:
  - i. “ESPERA”: Indica que la autoclave se encuentra en un estado seguro y a la espera de que se proceda a esterilizar en ella.
  - ii. “PURGA”: Indica que la autoclave a comenzado la esterilización y se encuentra en la etapa de purga de aire.
  - iii. “CALENTAMIENTO”: Indica que ha terminado la PURGA y a comenzado la etapa de calentamiento para llegar al punto de operación de temperatura de la esterilización seleccionada.
  - iv. “ESTERILIZACION”: Indica que ha terminado el CALENTAMIENTO y que ha comenzado la etapa de ESTERILIZACION y por lo tanto el tiempo comenzará a contar regresivamente.



- v. “ENFRIAMIENTO”: Indica que la ESTERILIZACION ha concluido y la etapa de ENFRIAMIENTO ha comenzado, en donde la presión comienza a alcanzar su punto de operación.
- vi. “FIN ESTERILIZACION!!!”: Indica que la esterilización en la autoclave a concluido y ya se puede proceder a la apertura de la misma.
- vii. “PARADA DE EMERGENCIA”: Indica que ha ocurrido una parada de emergencia.

### 3.6. Pantalla de recetas de autoclave:

Esta pantalla muestra las diferentes recetas almacenadas en el OPLC; utilizando las teclas de las flechas ARRIBA y ABAJO, se puede navegar alrededor de las diez y ocho (18) recetas. Como se observa en la Figura 52 se tienen tres líneas que representan los siguientes significados:



**Figura 52. Pantallas de receta autoclave 1.**

- a) PRIMERA LINEA: se ubica el número clave de la receta, como en el ejemplo mostrado en la Figura 52 F-125-117; y adicionalmente se muestra el número de la receta dentro del OPLC (ej: N:7).
- b) SEGUNDA LINEA: El tipo de producto que poseen los enlatados (ej: FILETE DE ATUN).

- c) TERCERA LINEA: El tipo de envase que posee el producto (ej: ¼ CLUB-DINGEY).

### 3.7. Pantalla de menú modo manual:

En la Figura 53 se observa el menú que permite el accionamiento manual del autoclave. Cuando se tiene el cuadro que rodea al número con un fondo negro, significa que la válvula está 100% abierta y cuando el fondo es amarillo la válvula está totalmente cerrada.



Figura 53. Pantalla de menú modo manual autoclave 1.

### 3.8. Pantalla de parada de emergencia:

Esta área de visualización es la misma para cualquiera de las autoclaves, con la diferencia de que se indica cual de las autoclaves produjo la “parada de emergencia”, en la Figura 54 se puede observar esto; si el autoclave que genero este estado es el n°1, se mostrará el texto “A1” que significa “Autoclave 1”; de manera similar ocurre para los otros equipos esterilizadores, en donde, el mensaje cambiaría por el correspondiente A2, A3 o A4.



**Figura 54. Pantalla de parada de emergencia (botón presionado).**

La **pantalla de parada de emergencia** aparece debido a diferentes eventos en el proceso, y esto se ve reflejado en la última línea en donde aparece el mensaje relacionado con la causa que provocó este estado. Los eventos se describen a continuación:

a) “BOTON PRESIONADO”:

En la Figura 54 se observa como aparece en pantalla el mensaje, el cual se origina debido a que el operador o alguna persona presiono el pulsador de PARADA DE EMERGENCIA de cierta autoclave.

b) “ALTA TEMPERATURA”:

Este mensaje de alerta se presenta cuando la temperatura ha excedido valores no recomendados, como lo es 130°C. En la Figura 55 se presenta la pantalla de “parada de emergencia” generada por este mensaje.



**Figura 55. Pantalla de parada de emergencia (alta temperatura).**

c) “ALTA PRESION”:

Debido a una subida de presión mayor a los 35 psig, se presenta esta “parada de emergencia”, la cual se puede observar en la **Figura 56**.



**Figura 56. Pantalla de parada de emergencia (alta presión).**

d) “BAJA TEMPERATURA”:

Este tipo de parada de emergencia puede ocurrir durante la etapa de esterilización, y su razón de ser es que el sistema a detectado que la temperatura a caído 2 grados por debajo del punto de operación de la etapa de esterilización.



**Figura 57. Pantalla de parada de emergencia (baja temperatura).**

#### 4. DIAGRAMA DE FLUJO DE NAVEGACIÓN POR LAS PANTALLAS

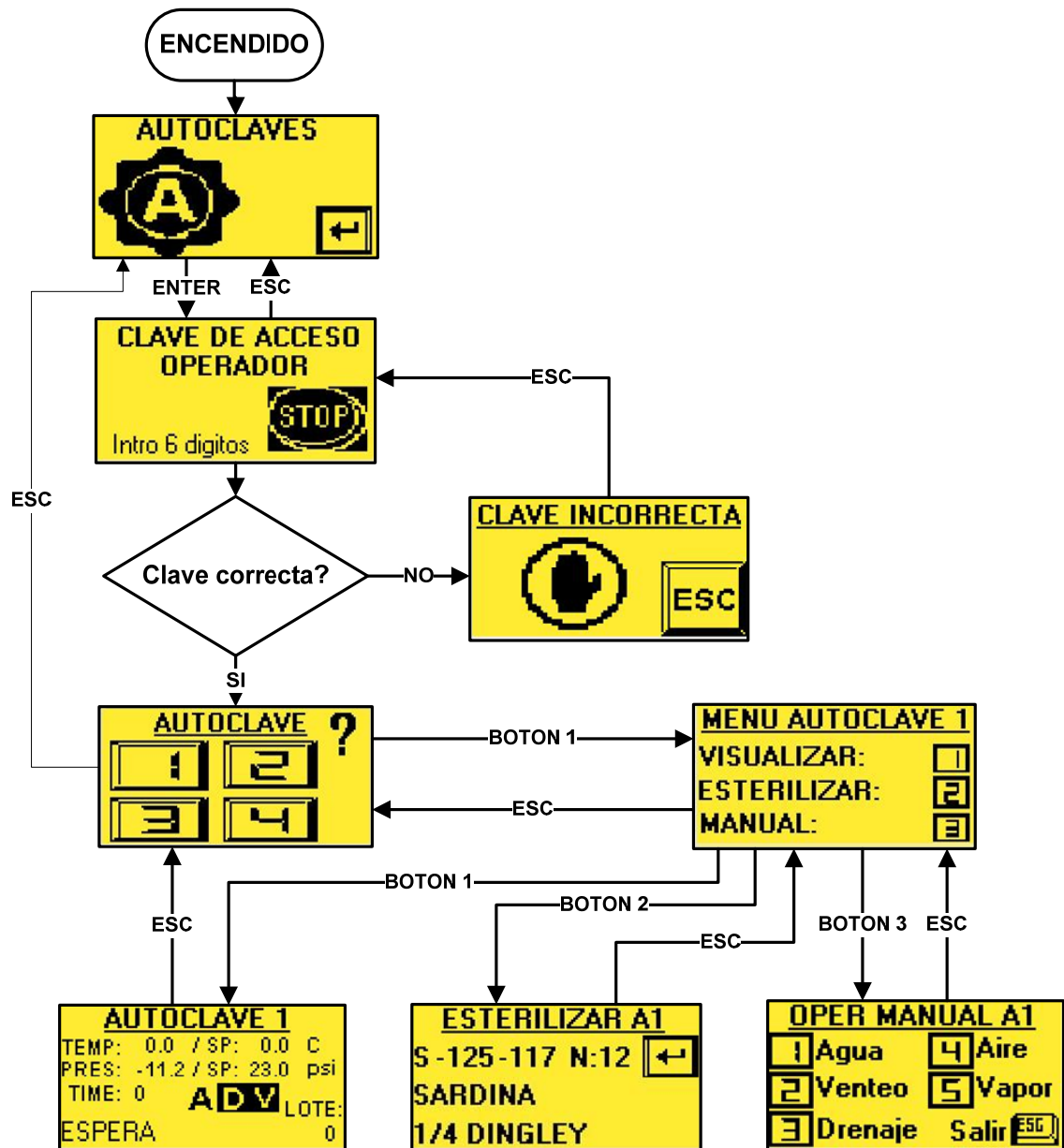


Figura 58. Diagrama de flujo de pantallas.

## 5. LUCES PILOTO DEL TABLERO DE CONTROL

En el tablero de control se encuentra un juego de luces piloto por cada autoclave, cada juego de luces posee tres bombillos pilotos, dos de los cuales son verdes y uno rojo; en la Figura 59 se describe la distribución y nombre de cada luz piloto.

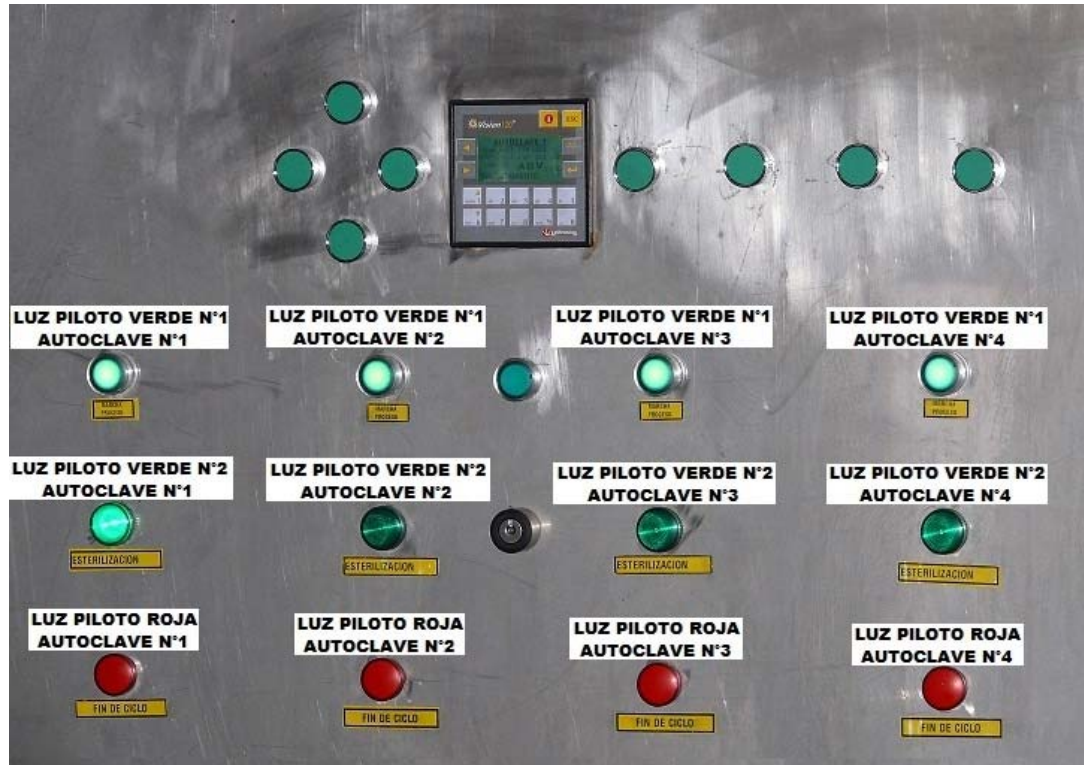


Figura 59. Descripción de la función de las luces piloto.

### 5.1. Estado de “Espera”:

La autoclave se encuentra inactiva, segura y disponible para realizar el proceso de esterilización; las luces se encuentran en los siguientes estados:

**Tabla 14. Luces piloto en estado de espera.**

<b>LUCES</b>	<b>ESTADO</b>
Luz piloto verde N°1	ON
Luz piloto verde N°2	OFF
Luz piloto roja	OFF

**5.2. Estado de “Receta seleccionada - En espera de inicio de proceso”:**

Al ser escogida la receta el programa se coloca en un estado de inminente comienzo del proceso, la luz piloto verde n°1 comienza a titilar indicando que es necesario ser presionado el pulsador de “INICIO” para que el proceso comience.

**Tabla 15. Luces piloto en estado de receta seleccionada, en espera de inicio.**

<b>LUCES</b>	<b>ESTADO</b>
Luz piloto verde N°1	TITILANDO
Luz piloto verde N°2	OFF
Luz piloto roja	OFF

**5.3. Estado de “Etapa de purga”:**

El proceso de esterilización ha comenzado y la etapa actual en la que se encuentra es la de “PURGA”.

**Tabla 16. Luces piloto en estado de etapa de purga.**

<b>LUCES</b>	<b>ESTADO</b>
Luz piloto verde N°1	ON



Luz piloto verde N°2	TITILANDO
Luz piloto roja	OFF

#### 5.4. Estado de “Etapa de calentamiento”:

El proceso de esterilización se encuentra en la etapa de “CALENTAMIENTO”.

**Tabla 17. Luces piloto en estado de etapa de calentamiento.**

LUCES	ESTADO
Luz piloto verde N°1	ON
Luz piloto verde N°2	ON
Luz piloto roja	OFF

#### 5.5. Estado de “Etapa de esterilización”:

El proceso de esterilización se encuentra en la etapa de “ESTERILIZACION”.

**Tabla 18. Luces piloto en estado de etapa de esterilización.**

LUCES	ESTADO
Luz piloto verde N°1	ON
Luz piloto verde N°2	ON
Luz piloto roja	TITILANDO

### 5.6. Estado de “Etapa de enfriamiento”:

El proceso de esterilización se encuentra en la etapa de “ENFRIAMIENTO”.

**Tabla 19. Luces piloto en estado de etapa de enfriamiento.**

<b>LUCES</b>	<b>ESTADO</b>
Luz piloto verde N°1	ON
Luz piloto verde N°2	ON
Luz piloto roja	ON

### 5.7. Estado de “Etapa de final de proceso”:

El proceso de esterilización se encuentra en la etapa de “FIN DE ESTERILIZACION”.

**Tabla 20. Luces piloto en estado de etapa final del proceso.**

<b>LUCES</b>	<b>ESTADO</b>
Luz piloto verde N°1	ON y OFF (en secuencia con las demás luces)
Luz piloto verde N°2	ON y OFF (en secuencia con las demás luces)
Luz piloto roja	ON y OFF (en secuencia con las demás luces)

### 5.8. Estado de “Parada de emergencia”:

La autoclave se encuentra en “PARADA DE EMERGENCIA.

**Tabla 21. Luces piloto en estado de parada de emergencia.**

<b>LUCES</b>	<b>ESTADO</b>
Luz piloto verde N°1	TITILANDO
Luz piloto verde N°2	TITILANDO
Luz piloto roja	TITILANDO

### **5.9. Estado de “Modo manual”:**

La autoclave se encuentra en “MODO MANUAL”.

**Tabla 22. Luces piloto en estado de modo manual.**

<b>LUCES</b>	<b>ESTADO</b>
Luz piloto verde N°1	OFF
Luz piloto verde N°2	OFF
Luz piloto roja	OFF

## **6. DETALLES IMPORTANTES DEL PROGRAMA**

Ciertas áreas y etapas en el programa requieren de cierta mención para el buen entendimiento operador máquina; estas observaciones y comentarios se desglosan a continuación:

### **6.1. Estado de “Espera”, “Fin de esterilización” y “parada de emergencia”:**

En estos estados la autoclave se encuentra inactiva, y sus variables de control se encuentran posicionadas de forma tal que la autoclave se encuentre en un estado

seguro y disponible para realizar otra esterilización. Este estado de seguridad se caracteriza por mantener las válvulas en la siguiente configuración:

**Tabla 23. Configuración de las válvulas en estado de espera, fin de proceso y parada de emergencia.**

<b>VALVULA</b>	<b>ESTADO</b>
VAPOR	OFF
AIRE	OFF
AGUA	OFF
VENTEO	ON
DRENAJE	ON

## **6.2. Re-Inicio, Proceso y finalización de la esterilización:**

Al final de un proceso completo y exitoso de esterilización, para poder iniciar un nuevo ciclo en esa autoclave se requiere **presionar por 3 segundos el botón de inicio**, a pesar de que el equipo se encuentre en estado de **“fin de esterilización”**; esto previene un descuido del operador y por lo tanto un reproceso de producto. Posterior al paso antes indicado, el programa se colocara en **estado de espera** y disponible para un nuevo ciclo de esterilización. Cabe mencionar que la pantalla de recetas se encontrará bloqueada mientras la autoclave se encuentre en estado de **“fin de esterilización”**.

Por las razones ya mencionadas como el descuido del operador, debido a que éste pueda estar realizando varias esterilizaciones al mismo tiempo y/o por distracciones propias del trabajo diario, se ha implementado en el programa un sistema que evita el reprocesado de producto, ya que, durante el proceso de esterilización, cuando se quiera acceder a la **pantalla de recetas** aparecerá un mensaje como el de la Figura 60 (**pantalla de bloqueo de menú de recetas**), la cual

tiene como objetivo evitar el acceso al área de recetas e indicarle al operador que hay producto procesándose actualmente.



**Figura 60. Pantalla de bloqueo de menú de recetas.**

### **6.3. Parada de emergencia:**

Cuando ocurre una parada de emergencia en alguno de los equipos, el proceso de esterilización se detiene solamente en el equipo que la generó y coloca a la autoclave en un estado seguro; después de revisar los motivos por los cuales se presentó la parada de emergencia es necesario llamar al encargado de la llave que acciona el **“pulsador de llave”**, para así, desbloquear la pantalla de recetas y poder realizar una nueva esterilización en esa autoclave.

Es notorio que mientras no se active el **“pulsador de llave”** la autoclave que se encuentra en “parada de emergencia” no podrá iniciar un nuevo proceso, pero esto no evita que las demás autoclaves continúen su proceso y/o inicien uno nuevo.

**Nota: Si se desea observar el evento que generó la “parada de emergencia” en cierta autoclave, solo es necesario intentar acceder a la “pantalla de recetas” de esa autoclave y ahí aparecerá alguno de los cuatro eventos que maneja el programa en una “parada de emergencia”.**

#### 6.4. Uso manual:

El uso manual es exclusivo para personal autorizado y entrenado en el funcionamiento de estos equipos y **NO ES OPERATIVO PARA REALIZAR PROCESOS DE ESTERILIZACION**. Cuando se accede a este menú todas las válvulas estarán en los estados ON u OFF dependiendo de cómo aparezcan en pantalla (ver sección 3.7), por lo tanto, la autoclave sale del estado en el que se encontraba; y de estarlo trunca el proceso de esterilización, ya que, al salir del modo manual el equipo regresa a un estado de espera y de Inicio de proceso.

#### 7. ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA:

Para el manejo de las señales dentro del tablero, el OPLC Vision120 se conecta a través de sus entradas y salidas.

**Tabla 24. Entradas analógicas (módulo IO-ATC-8).**

N°	Descripción
0	Señal de temperatura - Autoclave 1
1	Señal de temperatura - Autoclave 2
2	Señal de temperatura - Autoclave 3
3	Señal de temperatura - Autoclave 4
4	Señal de presión - Autoclave 1
5	Señal de presión - Autoclave 2
6	Señal de presión - Autoclave 3
7	Señal de presión - Autoclave 4

**Tabla 25. Entradas digitales (módulo IO-DI16).**

N°	Descripción
0	Sensor de nivel bajo - Autoclave 1
1	Sensor de nivel bajo - Autoclave 2
2	Sensor de nivel bajo - Autoclave 3
3	Sensor de nivel bajo - Autoclave 4
4	Sensor de nivel alto - Autoclave 1
5	Sensor de nivel alto - Autoclave 2
6	Sensor de nivel alto - Autoclave 3
7	Sensor de nivel alto - Autoclave 4
8	Pulsador #1
9	Pulsador #2
10	Pulsador #3
11	Pulsador #4
12	Pulsador del tablero “flecha arriba”
13	Pulsador del tablero “flecha abajo”
14	Pulsador del tablero “enter”
15	Pulsador con llave del tablero

**Tabla 26. Entradas digitales (OPLC).**

N°	Descripción
0	Sensor de puerta - Autoclave 1
1	Sensor de puerta - Autoclave 2
2	Sensor de puerta - Autoclave 3
3	Sensor de puerta - Autoclave 4

4	Pulsador de arranque de proceso - Autoclave 1
5	Pulsador de arranque de proceso - Autoclave 2
6	Pulsador de arranque de proceso - Autoclave 3
7	Pulsador de arranque de proceso - Autoclave 4
8	Pulsador de “parada de emergencia – Autoclave 1
9	Pulsador de “parada de emergencia – Autoclave 2
10	Pulsador de “parada de emergencia – Autoclave 3
11	Pulsador de “parada de emergencia – Autoclave 4
12	-
13	Pulsador #5
14	Pulsador “esc”
15	-

**Tabla 27. Salidas analógicas (módulo #1 IO-AO6X).**

N°	Descripción
0	Señal de la válvula regulatoria de vapor - Autoclave 1
1	Señal de la válvula regulatoria de vapor - Autoclave 2
2	Señal de la válvula regulatoria de vapor - Autoclave 3
3	Señal de la válvula regulatoria de vapor - Autoclave 4
4	-
5	-



**Tabla 28. Salidas analógicas (módulo #2 IO-AO6X)**

N°	Descripción
0	Señal de la válvula regulatoria de aire - Autoclave 1
1	Señal de la válvula regulatoria de aire - Autoclave 2
2	Señal de la válvula regulatoria de aire - Autoclave 3
3	Señal de la válvula regulatoria de aire - Autoclave 4
4	-
5	-

**Tabla 29. Salidas digitales (módulo #1 IO-RO8).**

N°	Descripción
0	Válvula de venteo - Autoclave 1
1	Válvula de venteo - Autoclave 2
2	Válvula de venteo - Autoclave 3
3	Válvula de venteo - Autoclave 4
4	Válvula de drenaje – Autoclave 1
5	Válvula de drenaje – Autoclave 2
6	Válvula de drenaje – Autoclave 3
7	Válvula de drenaje – Autoclave 4

**Tabla 30. Salidas digitales (módulo #2 IO-RO8).**

N°	Descripción
0	Válvula de agua - Autoclave 1
1	Válvula de agua - Autoclave 2
2	Válvula de agua - Autoclave 3

3	Válvula de agua - Autoclave 4
4	-
5	-
6	-
7	-

**Tabla 31. Salidas digitales (OPLC).**

N°	Descripción
0	Luz piloto verde #1 - Autoclave 1
1	Luz piloto verde #1 - Autoclave 2
2	Luz piloto verde #1 - Autoclave 3
3	Luz piloto verde #1 - Autoclave 4
4	Luz piloto verde #2 - Autoclave 1
5	Luz piloto verde #2 - Autoclave 2
6	Luz piloto verde #2 - Autoclave 3
7	Luz piloto verde #2 - Autoclave 4
8	Luz piloto roja #1 - Autoclave 1
9	Luz piloto roja #1 - Autoclave 2
10	Luz piloto roja #1 - Autoclave 3
11	Luz piloto roja #1 - Autoclave 4

**Tabla 32. Puerto de comunicaciones del OPLC**

Puerto N°	Descripción
1	Libre, para realizar la conexión con un PC. <ul style="list-style-type: none"><li>• Cable de teléfono 4 hilos con conectores RJ-11 y convertidor RJ-RS232.</li></ul>
2	Libre, para realizar la conexión con un PC. <ul style="list-style-type: none"><li>• Cable de teléfono 4 hilos con conectores RJ-11 y convertidor RJ-RS232.</li></ul>
3	Cable de conexión para el módulo de comunicaciones EXA1.

## **8. SOFTWARE**

Durante la realización de este proyecto se programo el OPLC VISION120 usando la versión 5.2.2 de programa VisiLogic de UNITRONICS, instalado sobre el Sistema Operativo Microsoft Windows XP SP2 actualizado a la fecha.

## **9. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA**

Los instrumentos equipados en el sistema de control, en su mayoría adquiridos por el cliente y susceptibles a mantenimientos programados, quedan bajo la responsabilidad del cliente en cuanto al plan de mantenimiento que se les pueda realizar; esto debido a que fueron adquiridos por el mismo y pueden acceder a información importante por parte de sus propios proveedores.

## [ANEXO N°2]

### [Modelos de PLC Vision120™]

Article Number	V120-22-R1	V120-22-R34 <sup>4</sup>	V120-22-R2C	V120-22-R6C	V120-22-R2C	V120-22-T1	V120-22-T38 <sup>4</sup>	V120-22-UW2	V120-22-UW2	V120-22-RA2 <sup>4</sup>
Power supply	12/24VDC	24VDC	12/24VDC	24VDC	12/24VDC	12/24VDC	24VDC	24VDC	24VDC	24VDC
Digital inputs	10 pnp/npn (source/sink) 12/24VDC	22 <sup>2</sup> pnp/npn (source/sink) 24VDC	10 pnp/npn (source/sink) 12/24VDC	6 pnp/npn (source/sink) 24VDC	12 <sup>2</sup> pnp/npn (source/sink) 12/24VDC	12 pnp/npn (source/sink) 12/24VDC	22 pnp/npn (source/sink) 24VDC	12 <sup>2</sup> pnp/npn (source/sink) 24VDC	12 <sup>2</sup> pnp/npn (source/sink) 24VDC	12 <sup>2</sup> pnp/npn (source/sink) 24VDC
High-speed counter/ Shaft-encoder/ Frequency measurer <sup>3</sup>	Three 10 kHz, 32 bit resolution	Three 10 kHz, 32 bit resolution	Three 10 kHz, 32 bit resolution	One 10 kHz, 32 bit resolution	Three 10 kHz, 32 bit resolution	Two 10 kHz, 32 bit resolution	Two 10 kHz, 32 bit resolution	One 10 kHz, 32 bit resolution	One 10 kHz, 32 bit resolution	One 10 kHz, 32 bit resolution
Analog input types	One 10 bit input: 0-10V, 0-20mA, 4-20mA	Two <sup>2</sup> 10 bit inputs: 0-10V, 0-20mA, 4-20mA	Two 10 bit inputs: 0-10V, 0-20mA, 4-20mA	Six 10 bit inputs: Two 0-10V, 0-20mA, 4-20mA, Four 0-20mA, 4-20mA	Two <sup>2</sup> 10 bit inputs: 0-10V, 0-20mA, 4-20mA	None	None	Two <sup>2</sup> 14 bit inputs: 0-10V, 0-20mA, 4-20mA	Two <sup>2</sup> 14 bit inputs: 0-10V, 0-20mA, 4-20mA	Two <sup>2</sup> 14 bit inputs: 0-10V, 0-20mA, 4-20mA
Temperature measurement	None	None	None	None	None	None	None	Two <sup>2</sup> PT100 or Thermocouple inputs	Two <sup>2</sup> PT100 or Thermocouple inputs	Two <sup>2</sup> PT100 or Thermocouple inputs
Digital outputs	5 relay outputs	12 relay outputs	6 relay outputs	6 relay outputs	12 pnp (source)	12 pnp (source)	16 pnp (source)	10 pnp (source)	8 relay outputs	8 relay outputs
High-speed outputs/ PWM	None	None	None	None	None	First 2 outputs can function as HSO, 2 kHz maximum	None	None	None	None
Analog outputs	None	None	None	None	None	None	None	Two 12 bit Outputs: 0-10V, 4-20mA	Two 12 bit Outputs: 0-10V, 4-20mA	Two 12 bit Outputs: 0-10V, 4-20mA