

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**AUTOMATIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE
AUTOCLAVES EMPLEANDO TÉCNICAS DE
CONTROL CLÁSICA Y AVANZADA**

INFORME DE SUFICIENCIA

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

PRESENTADO POR:

LEONARDO RAFAEL MORA AYLAS

PROMOCIÓN

1993 – I

LIMA – PERÚ

2003

A mis Padres
A mi Esposa Marlene
A mis Hijos Yadira y Leo

**AUTOMATIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE
AUTOCLAVES EMPLEANDO TÉCNICAS DE
CONTROL CLÁSICA Y AVANZADA**

SUMARIO

El presente estudio aborda la automatización de una línea de autoclaves de esterilización, en una planta de conservas enlatadas de la empresa Austral Group S.A.A. La automatización de cada autoclave responde a la misma filosofía y estructura de diseño. Por esta razón, el estudio se lleva a cabo en una sola autoclave.

La autoclave es un tanque metálico cilíndrico y vertical, con puertas en la parte superior e inferior, y con tuberías de ingreso y de salida. Se llena con agua para amortiguar la caída de los botes (producto enlatado a procesar) que ingresan por la puerta superior. Luego de cerrar ambas puertas, el vapor (agente esterilizante) ingresa a la autoclave y desaloja el agua, y todo el aire en la etapa de venteo. En la etapa de esterilización, la temperatura se estabiliza durante un tiempo, luego del cual se cierra el ingreso de vapor, ingresa rápidamente el aire comprimido para compensar la presión, e ingresa lentamente el agua fría. En la etapa de enfriamiento los botes se enfrían a presión constante durante un tiempo. Luego la autoclave por la puerta inferior descarga los botes a un canal con agua para continuar con el enfriamiento.

El proceso completo de esterilización comprende las etapas de venteo, de esterilización, y de enfriamiento. La etapa de esterilización es la principal y en este estudio la expresión "proceso de esterilización" hace referencia solamente a la etapa de esterilización, y eventualmente se utiliza "proceso" como su abreviación.

La automatización del proceso completo de esterilización que desarrollan las autoclaves comprende: descripción del actual control a lazo abierto para cargar y descargar la autoclave, descripción del actual control a lazo cerrado en las etapas de venteo, de esterilización y de enfriamiento, y específicamente el diseño de otro controlador de temperatura para el proceso de esterilización empleando el método clásico (controlador PID) y el método avanzado (controlador óptimo cuadrático).

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
PLANTA DE CONSERVAS Y ESTERILIZACIÓN	2
1.1. Descripción de la Planta de Conservas – Planta de Crudos	2
1.2. La Esterilización en las Autoclaves	12
CAPÍTULO II	
LAS AUTOCLAVES DE ESTERILIZACIÓN	17
2.1. Descripción de la Línea de Autoclaves	17
2.2. Operación y Control Automático de la Autoclave	23
CAPÍTULO III	
MODELO DINÁMICO DEL PROCESO	32
3.1. El Método Experimental	32
3.2. Análisis de la Respuesta al Escalón	34
CAPÍTULO IV	
CONTROL CLÁSICO DEL PROCESO	38
4.1. Control Actual del Proceso de Esterilización	38
4.2. Diseño y Simulación del Controlador PID	43

CAPÍTULO V

CONTROL ÓPTIMO DEL PROCESO	48
5.1. El Control Óptimo Cuadrático Estacionario	48
5.2. Diseño y Simulación del Controlador Óptimo Cuadrático	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
ANEXO A: LISTADO DE PROGRAMAS	58
ANEXO B: PLANOS Y DIAGRAMAS	63
BIBLIOGRAFÍA	69

PRÓLOGO

En este estudio se aborda la automatización del funcionamiento y operación de una línea de autoclaves de esterilización de conservas enlatadas. En el proceso de esterilización se logra mantener constante la temperatura dentro de cada autoclave. La automatización comprende: el control a lazo abierto para cargar y descargar la autoclave, el control a lazo cerrado en las etapas de venteo y de enfriamiento, y específicamente el diseño del sistema de control de la temperatura de esterilización usando el controlador PID (método clásico) y el controlador óptimo cuadrático (método moderno). Este estudio comprende siete capítulos.

El capítulo **I** describe brevemente el proceso de elaboración de conservas en la planta de crudos de la empresa Austral Group S.A.A (planta Paita) y la esterilización en las autoclaves, sus etapas, su fundamento y principales conceptos.

El capítulo **II** desarrolla la configuración de una línea de autoclaves en la planta de conservas; y describe la secuencia completa de eventos en el actual control automático del funcionamiento y operación de una autoclave.

El capítulo **III** trata sobre el modelo dinámico del proceso de esterilización en una autoclave, y analiza las repuestas al escalón usando el método experimental.

El capítulo **IV** describe el actual sistema de control del proceso de esterilización, el actual controlador PID y sus limitaciones. También aborda el diseño y la simulación de otro controlador PID para una autoclave.

El capítulo **V** se ocupa del diseño y la simulación del sistema de control óptimo cuadrático del proceso de esterilización en una autoclave.

Luego, se discute los resultados del trabajo realizado y se presentan algunas conclusiones y recomendaciones para implementar en tiempo real el sistema de control óptimo diseñado.

El Anexo A contiene el listado de los programas escritos en código MATLAB empleados en este estudio. El Anexo B contiene los planos de las plantas referidas en este estudio, y un diagrama de eventos del ciclo de funcionamiento de la autoclave.

CAPÍTULO I

PLANTA DE CONSERVAS Y ESTERILIZACIÓN

1.1 Descripción de la Planta de Conservas - Planta de Crudos

La principal y más grande planta de conservas de pescado, de la empresa peruana Austral Group S.A.A., se encuentra ubicada en el puerto pesquero de la ciudad de Paita, departamento de Piura. Austral Group S.A.A. es una empresa privada dedicada a la elaboración de conservas, harina y aceite de pescado de la más alta calidad, cuyo mercado es en el 95% de exportación.

La planta de conservas se subdivide en dos, la planta de crudos, donde el envasado se realiza con el pescado todavía crudo, y la planta de cocidos, donde el envasado es con el pescado ya cocido; ambas plantas se ubican en la nave de conservas (ver el Plano 1.1). La continuación de la planta de conservas se ubica en la nave de etiquetado (ver el Plano 1.3) distante a tres kilómetros de la nave de conservas. En esta sección se describirá el proceso de elaboración de conservas en la planta de crudos. Todos los planos se adjuntan en el Anexo B.

Recepción de materia prima

El pescado, materia prima del proceso de conservas, es capturado en nuestro mar peruano y es transportado hasta el muelle de la planta de conservas en embarcaciones marítimas, que cuentan con un sistema de refrigeración para bajar la temperatura en el interior de las bodegas, donde se encuentra el pescado, y de esa forma mantenerlo en buenas condiciones.

En el muelle, un moderno sistema automático de absorción/bombeo, denominado Transvac, realiza la descarga de la materia prima utilizando el agua refrigerada de la embarcación para que el pescado pueda deslizarse en el interior de la tubería de envío, sin malograr la integridad del pescado.

Antes de ingresar a la planta, la tubería de envío descarga en un drenador, que permite separar la materia prima y el agua. El agua cae al tanque del drenador y la materia prima entra al transportador de malla, el cual abastece a una balanza (ver

zona balanza en el Plano 1.2), de instalación y funcionamiento en línea, para controlar y registrar el peso de la materia prima que está ingresando a la planta. La descarga de la balanza llega al extremo de un canalón, por donde se desliza el pescado, para alimentar a cada poza de almacenamiento, empujado con la ayuda de agua refrigerada, bombeada desde las mismas pozas.

Almacenamiento en pozas

Las diez pozas de almacenamiento contienen agua a baja temperatura (0°C), obtenido por un sistema de refrigeración, ubicado en la planta de agua fría (ver el Plano 1.2). El agua fría en las pozas permite cuidar la integridad del pescado pues además de mantenerlo refrigerado sirve para amortiguar la caída del pescado en la poza. Por lo menos dos pozas están destinadas solamente a contener el agua fría, el cual se utiliza en el canalón para ayudar a deslizar el pescado y para abastecer a las otras ocho pozas. El agua utilizada para el almacenamiento proviene del mar, bombeada desde la punta del muelle, y es filtrada y clorinada antes de su ingreso a la planta. En las pozas un inspector controla la calidad de la materia prima mediante el análisis físico - organoléptico, la medición de la temperatura del agua y del pescado, y el análisis de TBVN.

En cada poza un transportador elevador lleva la materia prima a dos transportadores colectores, donde manualmente se hace una selección por tamaños y especies si fuera necesario. Cada transportador colector abastece a dos transportadores de trasvase y éstos a otros dos transportadores de distribución (ver el Plano 1.2). Estos últimos abastecen de materia prima a las tinas de almacenamiento - corte.

Corte y eviscerado

Las tinas de almacenamiento - corte son cuatro y contienen un colchón de agua de mar refrigerada con hielo para conservar temporalmente el pescado, y un transportador elevador que abastece de materia prima a seis máquinas semi - automáticas de corte/eviscerado (ver zona cortadoras y evisceradoras en el Plano 1.2). Cada uno de dos elevadores abastece simultáneamente a dos máquinas, y cada uno de los otros dos elevadores abastece separadamente a una máquina.

Las máquinas de corte/eviscerado están constituidas por tres fajas en movimiento y a velocidad variable, según el ritmo de la producción. Una faja central sirve como mesa de alimentación y selección del pescado según la calidad y el tamaño; y dos fajas ubicadas lateralmente a la mesa, contienen capachos para depositar y

desplazar el pescado seleccionado. Las dos fajas capacho, se mueven de un extremo a otro de la máquina, pasando por la sección corte y la sección eviscerado. La sección corte contiene unas cuchillas circulares giratorias que corta la cabeza y la cola de cada pescado, mientras éste se desplaza. La sección eviscerado extrae todas las vísceras a cada trozo resultante mediante un sistema de succión, y finalmente aplica un chisguete de agua de mar clorinada para limpiar la cavidad ventral y sacar la sangre que deja el corte/eviscerado y no imparta una coloración nociva al producto acabado.

Las fajas capacho de las seis máquinas de corte/eviscerado descargan los trozos de pescado a un sólo transportador colector, el cual abastece al transportador elevador, y éste al transportador de distribución (ver zona cortadoras y evisceradoras en el Plano 1.2) que alimenta a las tinas de almacenamiento - envasado.

Envasado

Las tinas de almacenamiento - envasado son seis, contienen un colchón de agua de mar refrigerada con hielo para conservación temporal. Cada tina tiene un transportador elevador que abastece de trozos de pescado a cada máquina semi - automática de envasado, respectivamente.

Las máquinas de envasado son seis, y están constituidas por tres fajas en movimiento y a velocidad variable, según el ritmo de la producción. Una faja central sirve como mesa de alimentación y selección del trozo de acuerdo a la calidad y tamaño; y dos fajas ubicadas lateralmente a la mesa, contienen capachos para depositar y desplazar el trozo seleccionado. Las dos fajas capacho se mueven de un extremo a otro de la máquina, pasando por la sección envasado. De la faja central se selecciona manualmente de uno a seis trozos para ubicarlos en cada capacho, según el tipo de envase correspondiente. En la sección envasado un pistón empujador introduce los trozos, contenidos en cada capacho, a cada envase de lata. Los envases caen verticalmente en forma sincronizada a la velocidad de movimiento de las fajas capacho, y en posición horizontal por la parte superior a cada lado de la máquina. Una completa información de la máquina de envasado se encuentra en la referencia [4].

En la planta de crudos se utilizan envases de lata tipo tall, tipo austral pack, y tipo oval. Cuatro máquinas de envasado están destinadas para los envases tipo tall y dos para austral pack. El envasado para el tipo oval se realiza en forma íntegramente manual. Los envases de lata tipo tall y tipo austral pack provienen de los depaleti-

zadores y antes de ingresar a las correspondientes máquinas de envasado pasan, en su trayecto de caída vertical, por un sistema de lavado continuo con vapor directo.

Los depaletizadores son dos máquinas completamente automáticas que se encargan de depaletizar los correspondientes envases tipo tall y tipo austral pack, que llegan a la planta apilados en pallets. El operador coloca el pallet lleno en el transportador de entrada, y el sistema de control automático, de sensores y controlador lógico programable, se encarga de colocar los envases sueltos en la mesa transportadora de salida, que abastece a los carriles de transporte (ver zona depaletizadores en el Plano 1.2) que llevan los envases a cada una de las máquinas de envasado. Para mayor información de la máquina depaletizadora recurra a la referencia [5].

De aquí en adelante, se utiliza indistintamente el término "bote" para identificar al producto en las sucesivas zonas de la planta, hasta obtener la conserva enlatada.

Lavado de trozos

Un transportador colector recibe los envases llenos de trozos de pescado crudo a la salida de cada dos máquinas de envasado. Los tres transportadores colectores abastecen, en forma correspondiente, a tres transportadores de inspección, donde se inspecciona y evalúa la calidad de los trozos crudos de pescado. Cada transportador de inspección, envía los envases a una o dos lavadoras de trozos (ver zona lavadoras de trozos en el Plano 1.2), antes de ingresar a las máquinas de cocción/secado.

Las lavadoras de trozos son unas máquinas con dos secciones continuas y separadas; la primera es para lavar y la segunda para enjuagar los trozos crudos de pescado contenidos en los envases, mientras se desplazan por un transportador; dentro de las dos secciones se encuentran: los tubos dispersadores de chorros a presión de agua de mar clorinada y el transportador que recibe, desplaza y retira los botes de la lavadora de trozos.

Cocción inicial y secado

A la salida de cada lavadora de trozos, el transportador de entrada de carga permite el ingreso de los botes a una de las cinco máquinas de cocción/secado. Estas máquinas son los cocedores automáticos del tipo continuo donde se realiza, con vapor a presión, la cocción inicial y secado de los trozos de pescado envasado.

El cocedor automático continuo consta de una sección de cocción y otra sección de secado. En la sección de cocción, mediante unos tubos distribuidores ubicados en la parte superior, el vapor a presión ingresa en forma directa al recinto;

un controlador electrónico mantiene constante la temperatura en un valor entre 90°C y 100°C. En la sección de secado, dos ventiladores en la parte superior reciclan el aire caliente generado por el paso de vapor dentro de una tubería cerrada; y la temperatura se mantiene constante en un valor entre 130°C y 135°C. Dentro de las dos secciones, los botes permanecen en parrillas que se desplazan a lo largo del cocedor en circuito cerrado y siguiendo una trayectoria sinusoidal vertical. El tipo de trayectoria permite que los botes se inviertan y drenen el agua de lavado y algunos restos de sangre. El cocedor tiene un motorreductor de velocidad variable que hace desplazar a las parrillas y permite fijar el tiempo de recorrido del bote dentro del cocedor. Para información complementaria del cocedor continuo recurra a la referencia [6].

Los botes ingresan al cocedor y luego del tiempo de recorrido, de 30 a 45 minutos, salen con una adecuada cocción inicial y un apropiado secado de los trozos de pescado. Durante el recorrido, el trozo de pescado es cocido generando una pérdida de peso, una reducción de carga microbiana y un ligero desgrasado. A la salida del cocedor un inspector controla las características físico - organolépticas y el control de peso del bote. Tres cocedores están destinados para los envases tipo tall, un cocedor para austral pack, y un cocedor para oval (ver zona cocedores en el Plano 1.2).

Adición de líquido de gobierno y Cerrado

Un transportador colector recibe los botes que salen del o los cocedores de un mismo tipo de envase, y abastece a un transportador de inspección, donde se inspecciona y evalúa el producto. Este último abastece a un transportador de distribución y éste a las máquinas automáticas de llenado/cerrado del bote.

La máquina de llenado/cerrado comprende de dos secciones separadas y unidas por un pequeño transportador de trasvase, todos acoplados a un solo mecanismo de movimiento. La sección llenado, adiciona a los botes un apropiado líquido de gobierno a una temperatura de 80 a 95°C; el nivel de temperatura genera un vacío parcial en el bote, necesario para compensar la presión que se genera dentro del bote durante el proceso de esterilización (mayor información revise la sección "Evacuación" en Pág. 208 de la referencia [7]); después del llenado, en el transportador de trasvase, una ligera inclinación del bote logra un espacio libre en la parte superior del envase para no sobrellenarlo y evitar también problemas durante la esterilización. La sección cerrado, coloca una tapa del mismo material en la parte superior del envase y en dos operaciones logra cerrar herméticamente al bote; la primera operación, logra un

traslape entre los bordes del envase y de la tapa; la segunda operación, logra la hermeticidad o apriete necesario para evitar filtraciones de contaminantes al bote (mayor información revise el Cap. 16 de la referencia [8]). La sección cerrado tiene la opción de inyectar vapor en el bote, también para generar un vacío como en la sección llenado. Para información complementaria de la sección llenado de esta máquina recurra a la referencia [9] y para la sección cerrado a la referencia [10].

A la salida de las máquinas de llenado/cerrado se realiza un estricto control visual y una continua evaluación del cierre según normas establecidas. En la planta de crudos (ver zona de cerradoras en el Plano 1.2) se tiene cinco de estas máquinas: dos para los envases tipo tall, dos para austral pack, y una para oval. La máquina de llenado/cerrado para oval, aunque tiene el mismo principio, es distinta a las otras; para detalle de esta máquina, recurra a la referencia [11].

El apropiado líquido de gobierno (salmuera, salsa de tomate, etc.) se prepara en la Sala de Preparación de Líquido de Gobierno, teniendo como base una formulación establecida en el laboratorio de la planta. Se denomina líquido de gobierno a una mezcla líquida, comúnmente llamado salsa, que se adiciona al bote con la finalidad de modificar el sabor y mejorar el aspecto del producto final; para mayor información revise la sección "Salsas" en Pág. 220 de la referencia [7].

La sala de preparación es una pequeña, moderna y automática planta de proceso para elaborar el líquido de gobierno (ver zona correspondiente en el Plano 1.2). En resumen cuenta con: tanques, bombas y tuberías completamente de acero inoxidable; instrumentos de medición de temperatura, presión, volumen, viscosidad y flujo para uso sanitario; y con un sistema automático de control (controlador lógico programable y panel de operador "touch screen" o de pantalla táctil). Una completa información de esta planta se encuentra en los siete volúmenes "Austral Inline Dilution System" de la referencia [12].

Lavado de latas

Un transportador desplaza a los botes que salen de las máquinas de llenado/cerrado, y los lleva a las correspondientes lavadoras de latas. Estas son unas máquinas con dos secciones continuas y separadas: lavado y enjuague; la primera sección contiene agua con detergente a una temperatura de 70 a 90°C y lava externamente a los botes retirando los restos sólidos de salsa y grasa adheridos al envase de lata; la sección enjuague retira la presencia de detergente remanente en el envase de lata, con

agua a la misma temperatura. Se logra subir y mantener la temperatura con el ingreso de vapor controlado automáticamente. Dentro de las dos secciones se encuentran: los tubos dispersadores de chorros a presión de agua potable clorinada y el transportador que recibe, desplaza y retira los botes de la lavadora de latas.

Un transportador colector recibe los botes que salen de la o las lavadoras de latas de un mismo tipo de envase (ver zona lavadoras de latas en el Plano 1.2), y abastece a un transportador de envío, éste último abastece de botes a la faja magnética elevadora.

Codificado

Hay una faja magnética elevadora para cada tipo de envase, el cual abastece al correspondiente transportador de codificación, donde a cada bote se le coloca un código, para permitir identificar el tipo de producto, la fecha de producción y la fecha de vencimiento de la conserva, según programación de la producción.

La codificación se realiza a la misma velocidad de los botes que se desplazan en el transportador de codificación, y para ello se emplea un equipo electrónico de inyección de tinta (ver zona codificadores en el Plano 1.2), que a gran velocidad imprime el código en la tapa ó en la parte lateral superior de cada envase. La tinta utilizada para imprimir el código es del tipo térmico, que cambia de color al llegar a un nivel alto de temperatura durante un tiempo determinado; esto sirve como un indicador para determinar si el bote fue convenientemente esterilizado.

Esterilizado

El transportador de codificación abastece al transportador de distribución. La planta de crudos cuenta con trece autoclaves de esterilización del tipo vertical: siete para los envases tipo tall, tres para austral pack y tres para oval. El bote herméticamente cerrado, lavado y codificado ingresa por el transportador de distribución a cada una de las autoclaves verticales, allí es recibido en un colchón de agua caliente a 75°C. En dichas autoclaves se desarrolla la esterilización comercial a una temperatura y durante un tiempo establecido según el tipo de conserva a procesar, con la finalidad de garantizar la seguridad y durabilidad del producto por un período de hasta cuatro años, bajo condiciones adecuadas de almacenamiento. Las variables del proceso son controladas estrictamente. El funcionamiento, el control de las variables, y la operación de las autoclaves es completamente automático. La esterilización y las autoclaves son explicadas con mayor detalle en la sección y capítulo siguiente.

Enfriado

Las autoclaves descargan a su correspondiente canal de amortiguamiento, ubicado exactamente debajo de las autoclaves de un mismo tipo de envase. Este canal se extiende hasta el canal de enfriamiento (ver zona correspondiente en el Plano 1.2). Ambos canales contienen agua potable a una temperatura de 30 a 40°C y transportadores a muy baja velocidad, donde los botes mientras se desplazan lentamente se someten al proceso de enfriamiento final hasta lograr bajar la temperatura en su interior hasta un nivel determinado. Unos transportadores en rampa sacan los botes fríos del canal y abastecen a otros transportadores en la zona de secado.

El abastecimiento de agua a los canales proviene de la red pública almacenada en el tanque de agua potable destinada a la planta de conservas. Es de sumo cuidado mantener convenientemente clorinada el agua potable en los canales todo el tiempo que dure el enfriamiento; para información complementaria revise la sección "Cloración de las Aguas de Enfriamiento de los Envases" en Pág. 51 de la referencia [8].

Secado

Para los envases tipo austral pack y tipo oval, los botes fríos que salen de los canales de enfriamiento se desplazan por unos transportadores que contienen lateralmente unos sopladores de aire a temperatura ambiente para expulsar los restos de agua y lograr secar íntegramente el exterior del envase. Para el envase tipo tall, antes de pasar por los sopladores según la explicación anterior, los botes pasan por el interior de un túnel secador con aire caliente (110 a 120°C), que realiza el secado en forma más rápida y efectiva (ver zona secadores en el Plano 1.2).

Paletizado

Luego del secado, unos transportadores desplazan a los botes de un mismo tipo de envase a una máquina paletizadora, que se encarga de paletizarlos.

Las máquinas paletizadoras son completamente automáticas, con un sistema de control basado en un controlador lógico programable. Están constituidas por un transportador - mesa de entrada y un cabezal magnético giratorio. Al empezar el funcionamiento, se mueve el transportador - mesa y permite el ingreso y acomodo de los botes; un sensor detecta la cantidad máxima de botes acomodados, y envía la señal al controlador para que paralice al transportador - mesa y baje al cabezal magnético para tomar todo el conjunto de botes. Luego que el cabezal magnético levanta el contenido, el transportador - mesa se mueve otra vez para continuar con el

ingreso de botes, mientras el cabezal magnético gira 90° y vuelve a bajar hasta un transportador de salida donde deposita el contenido sobre una parihuela, para formar la primera cama del pallet; el funcionamiento continúa hasta que complete la última cama del pallet. Para una completa información revise la referencia [13].

Son tres las máquinas paletizadoras: el paletizador tall, el paletizador austral pack y el paletizador oval. El transportador de salida de cada máquina desplaza al pallet formado hasta el transportador de carga (ver zona paletizado en el Plano 1.2).

Oreado y Plastificado

El transportador de carga abastece de pallets a la máquina envolvente. Esta es una máquina automática que envuelve al pallet con varias vueltas de un plástico retráctil. Una información completa de esta máquina se encuentra en la referencia [14].

La envoltura protege al pallet del medio ambiente evitando que la superficie externa de los envases de lata sea expuesta a la humedad. El transportador de descarga saca de la envolvente (ver zona envolvente en el Plano 1.2) los pallets plastificados, y luego un operador coloca un sticker a cada pallet para identificar con códigos correspondientes a la producción.

Un operador retira los pallets plastificados e identificados del transportador de descarga hacia el área de productos terminados, donde los pallets son sometidos al oreado mediante la exposición durante un tiempo determinado al medio ambiente, con la finalidad de eliminar la posible humedad existente en los envases, evitando problemas de oxidación posteriores.

Despacho

Desde el área de productos terminados de la nave de conservas, los pallets luego del oreado son despachados o trasladados hasta el almacén general de la nave de etiquetado.

Almacenado

Al llegar a la nave de etiquetado (ver el Plano 1.3), los pallets son inspeccionados para verificar las condiciones de llegada o recepción; luego son trasladados al almacén general. El almacenamiento de los botes durante cierto periodo de tiempo permite que el contenido madure; esta estabilización físico - químico denominada periodo de cuarentena es para garantizar una conserva enlatada en buenas condiciones; para información complementaria revise la sección "Etiquetado y Empaquetado" en Pág. 217 de la referencia [7].

Etiquetado

Desde el almacén general, los pallets previamente verificados son trasladados a las máquinas depaletizadoras automáticas (ver el Plano 1.4), éstas depaletizan el pallet y colocan las conservas enlatadas en un transportador - mesa de alimentación. Estas máquinas son para los envases tipo tall y tipo austral pack solamente, y son similares a las máquinas explicadas en la subsección de paletizado. Los pallets con otro tipo de envase son depaletizados en forma manual.

El transportador - mesa de alimentación abastece a otro transportador donde está ubicado un detector de conservas enlatadas defectuosas: combadas, aplastadas, golpeadas, etc. Este detector funciona en línea (ver el Plano 1.4), es decir, mientras las conservas enlatadas están desplazándose por el transportador, detecta y expulsa la defectuosa, y permite el paso libre de las buenas. Estas últimas llegan a las máquinas etiquetadoras.

Existen dos máquinas etiquetadoras (ver el Plano 1.4), una para los envases tipo tall y otra para austral pack. Estas máquinas colocan una etiqueta en cada conserva enlatada, alrededor de todo la pared cilíndrica del envase, mientras éstas se desplazan en caída libre por el carril de la máquina. El contenido de la etiqueta es según el tipo de conserva y el cliente.

Para otro tipo de envase, las conservas son etiquetadas en forma manual. Finalmente y si es necesario, en la parte superior del envase se imprime otro código de identificación y vencimiento, según y a solicitud del cliente.

Encajonado

Unos transportadores desplazan a las conservas etiquetadas y codificadas hacia las máquinas encajonadoras (ver el Plano 1.4), donde las conservas son introducidas dentro de una caja de cartón, en una cantidad de 24 o 48 unidades. Hay dos máquinas encajonadoras, una para los envases tipo tall y otra para austral pack. Para otro tipo de envase el encajonado es manual.

Las cajas de cartón son rotuladas en forma manual, y formadas en las máquinas formadoras de cajas (ver el Plano 1.4) a partir de un cartón plano. Luego un transportador las traslada a la máquina encajonadora.

Las cajas llenas con conservas son manualmente cerradas con cinta adhesiva, y codificadas según el tipo de producto y a solicitud del cliente.

Estibado

El estibado se realiza en forma manual, y consiste en lo siguiente: las cajas con conservas son trasladadas y colocadas sobre una parihuela para formar varios niveles de apilamiento, según el tipo de envase y tamaño de la caja. Este apilamiento facilita el embarque de las cajas.

Embarque

En el embarque se revisan las condiciones de cantidad de embarque, sanidad, hermeticidad de los contenedores y protección debida contra los fenómenos naturales, y se llenan con cajas los contenedores u otros medios de transporte para entregar al cliente.

1.2 La Esterilización en las Autoclaves

Los botes son sometidos a la esterilización para lograr una conserva que tenga vigencia de consumo de varios años, cumpliendo con las estrictas normas nacionales e internacionales. En la esterilización, los botes son sometidos a un tratamiento térmico, el cual tiene dos objetivos, primero, inactiva todas las bacterias y enzimas que se hallen presentes dentro del bote, y segundo, logra la cocción final del pescado dentro del envase. En la práctica, las temperaturas y los tiempos necesarios para esterilizar el contenido del bote son más que suficientes para efectuar la cocción final del pescado dentro del envase. La determinación de la temperatura y el tiempo apropiados para la esterilización, es un punto de principal estudio en la industria de la elaboración de conservas; para mayor información revise el Cap. 7 de la referencia [8].

Muchos tipos de bacteria son resistentes a temperaturas elevadas durante considerables periodos de tiempo, especialmente si son capaces de formar esporas. Un amplio estudio de la microbiología de alimentos procesados térmicamente puede encontrarse en el Cap. 2 de la referencia [8].

Para destruir las esporas dentro del bote, la temperatura y duración del tratamiento térmico tienen valores adecuados, determinados como resultado de pruebas realizadas en el laboratorio de la planta. El tiempo del tratamiento disminuye al aumentar la temperatura de procesado, siendo preferibles en general los procesos cortos a altas temperaturas. Para el pescado envasado generalmente se usan temperaturas de 110 a 117°C, teniéndose que emplear vapor a presión para lograr dichas temperaturas. Por lo tanto la esterilización se efectúa en las autoclaves

estacionarias. Para información complementaria revise la sección "Tratamiento Térmico" en Pág. 212 de la referencia [7].

Una autoclave estacionaria es un tanque encaquetado, horizontal o vertical, de forma cilíndrica o rectangular. Emplea vapor saturado a alta presión (120psi). Opera sin agitación y en forma discontinua. Contiene puertas de entrada, para el ingreso de los botes, y de salida, para sacar los botes ya esterilizados y someterlas al enfriamiento final. En su interior los botes están apilados o en desorden; en canastas, carros, cestos o bandejas para ser cargadas o descargadas. Una información complementaria se encuentra en el Cap. 9 de la referencia [8].

En el caso de las autoclaves verticales, estas son del tipo sin canastas, donde los botes se alimentan por la parte superior, y se llenan con agua para amortiguar la caída de los botes. Al agua utilizada para este fin, se le denomina agua de amortiguamiento.

Según el tipo o principio de funcionamiento de la autoclave en particular, estas realizan la esterilización con las siguientes etapas principales: etapa de venteo, etapa de esterilización, y etapa de enfriamiento. Alguna otra etapa preliminar será expuesta en la sección correspondiente.

Para evitar confusiones, se denomina proceso completo de esterilización al proceso que involucra todas las etapas, y proceso de esterilización a la etapa de esterilización solamente.

Etapas de venteo

Venteo es la etapa previa a la esterilización de los botes, y consiste en expulsar todo el aire que esté contenido dentro de la autoclave, con la finalidad principal de mejorar la transferencia de calor hacia el bote y obtener así un mejor producto esterilizado, libre de bacterias y esporas, y con la finalidad adicional de evitar deterioros en los envases.

El aire tiene una relativa baja velocidad de transferencia del calor. Así, un poco de aire que quede en la autoclave puede acumularse alrededor de algunos botes, haciendo que disminuya la velocidad de transferencia del calor; esto hará que el bote reciba una cantidad de calor que no es suficiente para eliminar las bacterias y esporas en el tiempo establecido. Es más, los instrumentos de medición indicarán erróneamente que el proceso es satisfactorio y seguro. Por otro lado, el aire en presencia de humedad a altas temperaturas origina oxidación y deterioro en los envases de lata.

Cada tipo de autoclave en particular es sometido al venteo, cumpliendo en forma simultánea dos parámetros, que son establecidos considerando factores como, el tamaño y la forma de la autoclave, la distribución de las tuberías de vapor y las de venteo, y la forma de ubicación de los botes dentro de la autoclave. Estos parámetros son, la temperatura de venteo y el tiempo de duración, los cuales se determinan mediante pruebas de distribución de calor. Por ejemplo, si consideramos un venteo a una temperatura de 108°C y un tiempo de 5 minutos, estos dos parámetros se deben cumplir en forma simultánea; así, en la autoclave, con la válvula de venteo completamente abierta, se controla el ingreso de vapor durante cinco minutos, desde el inicio hasta que la temperatura alcance los 108°C; en el caso que, después de cinco minutos la temperatura del autoclave no haya llegado al valor de 108°C, entonces se sigue controlando la apertura de la válvula de vapor hasta que se alcance dicha temperatura; y en el otro caso que, la temperatura en la autoclave haya llegado a 108°C antes de cumplir los cinco minutos, entonces se controla la válvula de vapor para mantener constante la temperatura en ese valor hasta que se cumplan los 5 minutos especificados. La válvula de venteo permanece completamente abierta durante todo el tiempo que dure la etapa de venteo.

Etapa de esterilización y cocción

Es la etapa principal del proceso completo de esterilización que realiza la autoclave y consiste en someter a los botes a una temperatura de esterilización permanente durante un tiempo establecido, según el tipo de conserva a procesar y de acuerdo con las normas nacionales e internacionales. La medición del tiempo de esterilización se inicia inmediatamente después que en la autoclave, la etapa de venteo haya sido terminada y la temperatura de esterilización haya sido alcanzada y mantenida constante.

En esta etapa es de vital importancia asegurarse del valor de la temperatura de esterilización; así que normalmente el operador de las autoclaves considera el inicio de la esterilización, desde el momento en que observa en el termómetro de mercurio que la temperatura de esterilización haya alcanzado el valor establecido.

En esta etapa de esterilización se realiza también la cocción final o definitiva del pescado contenido dentro del envase. Pues como se mencionó antes, en la sección correspondiente, las máquinas automáticas de cocción/secado lograron solamente una cocción inicial del pescado.

Etapa de enfriamiento a presión constante

El enfriamiento en la autoclave es la etapa inmediatamente posterior a la de esterilización, y consiste en bajar rápidamente la temperatura en el interior del envase, manteniendo constante la presión externa al envase (presión del autoclave en la esterilización), con la finalidad de que ésta no sea menor a la presión interna al envase, generada este último por el aumento de la temperatura durante la esterilización, pues ello podría originar que el bote se hinche o se espigue, deteriorando el producto final.

Durante el calentamiento en la etapa de esterilización, en los envases cerrados se genera una presión interna considerable, que sólo es parcialmente contrarrestada por el vacío parcial del bote, logrado en las máquinas de llenado/cerrado. Si al final de la esterilización se deja escapar bruscamente el vapor, la presión neta del interior del envase puede aumentar súbitamente, causando una hinchazón en los botes, deformando el envase. Para evitar esto, se recurre al enfriamiento a presión constante, etapa en la cual para mantener constante la presión al mismo valor que tuvo en la etapa de esterilización, en el momento que se cierra la válvula de vapor se hace ingresar rápidamente el aire a presión, y luego se hace ingresar una cantidad de agua potable y clorinada, para lograr el enfriamiento de los botes; que cuando ya están lo suficientemente fríos, se reduce su presión interna, y puede exponerse a la presión atmosférica sin peligro de espigarse, luego de esto se corta el ingreso del aire. La autoclave logra enfriar a los botes solamente en forma parcial. Luego de descargar la autoclave, los botes continúan con el enfriamiento.

Un enfriamiento inapropiado de los botes puede causar el desarrollo de esporas de las bacterias termófilas, es decir aquellas que el calor favorece a su desarrollo. A medida que los botes se enfrían, su presión interna cambia rápidamente y en tales condiciones incluso una correcta sutura del envase (cierre hermético) puede permitir el paso de pequeñas cantidades de agua que, si se encuentra contaminada, dará lugar a la alteración del contenido del envase; para información complementaria revise la sección "Tratamiento Térmico" en Pág. 216 de la referencia [7]. Por consiguiente, es sumamente recomendable clorinar el agua utilizada para el enfriamiento en la autoclave. En los procesos completos de esterilización, el agua utilizada para este fin se denomina agua de enfriamiento.

El proceso completo de esterilización en la autoclave termina con la etapa de enfriamiento, luego del cual se descargan las autoclaves para continuar con el enfriamiento. En la planta de crudos, las autoclaves verticales descargan a un canal, que contiene agua a una temperatura de 30 a 40°C, para continuar enfriando los botes hasta temperaturas por debajo de los 32°C, para que el agua remanente sobre la superficie del envase de lata se evapore rápidamente y no favorezca a su corrosión. Es más, el cloro diluido en el agua a temperaturas arriba de los 40°C, puede evaporarse, poniendo en riesgo la adecuada clorinación del agua en el canal; para información complementaria revise la sección "Factores que Afectan la Cloración" en Pág. 49 de la referencia [8].

Procesos alternos

Según las normas nacionales y/o internacionales establecidas, si el proceso completo de esterilización en la autoclave, principalmente en la etapa de esterilización, se llega a interrumpir intempestivamente por alguna razón, como falla en el suministro de vapor, una rotura de tuberías o válvulas, etc., el proceso se vuelve a empezar, aún en el caso que se haya aplicado la mitad o las dos terceras partes del proceso.

Botes combados y aplastados

Como ya se explicó, los botes combados o espigados son causados por una presión interna muy grande dentro de los mismos. Esto ocurre cuando en la autoclave la presión disminuye de forma muy rápida al final de la etapa de esterilización, antes que los botes tengan tiempo de enfriarse. La alta presión en el interior del envase empuja las tapas hacia afuera causando la distorsión permanente de ellas, llamada joroba o espiga. La etapa de enfriamiento se realiza con la finalidad de no obtener botes espigados o combados.

La presión del vapor en la autoclave durante la etapa de esterilización, logra ejercer presión sobre la superficie de los envases. Tal presión externa hará que el cuerpo del envase colapse o se aplaste, si es que no se ha obtenido la suficiente penetración de calor en el interior del envase, que genera una presión interna que la equilibra. Es decir, para evitar que los botes se aplasten o colapsen es muy importante realizar correctamente la etapa de venteo. Si la válvula de venteo se cierra muy rápido, ciertos botes con alto vacío todavía pueden estar tan fríos que la presión elevada de la autoclave puede colapsar o aplastar el envase.

CAPÍTULO II

LAS AUTOCLAVES DE ESTERILIZACIÓN

2.1 Descripción de la Línea de Autoclaves

En la planta de crudos, existen trece autoclaves verticales que conforman las tres líneas de autoclaves (ver el Plano 1.2). Siete autoclaves están destinadas para los envases tipo tall y conforman la Línea de Autoclaves Tall, tres autoclaves para los envases tipo austral pack conforman la Línea de Autoclaves Austral Pack, y tres autoclaves para los envases tipo oval conforman la Línea de Autoclaves Oval. Excepto por la cantidad de autoclaves, la configuración es idéntica en las tres líneas; contienen el transportador de distribución, los manifold de entrada y de salida, el tanque depósito, el canal de amortiguamiento y de enfriamiento, y el sistema hidráulico. Todas las autoclaves son idénticas, tienen conectadas tuberías y válvulas neumáticas de entrada y de salida. La figura 2.1 muestra con una sola autoclave el esquema de toda una línea de autoclaves. Los manifold son: el manifold de entrada de vapor, el manifold de entrada de aire, el manifold de entrada de agua de amortiguamiento, el manifold de entrada de agua de enfriamiento, y el manifold de salida de venteo/condensado. Un manifold es una tubería principal para distribución o recepción.

El transportador de distribución abastece de botes a toda una línea de autoclaves; y para cargar cada autoclave por la puerta superior se disponen, a lo largo del transportador, de compuertas (para desviación del bote) y de canalones (para caída del bote), los cuales son remotamente activados por pistones neumáticos. Las válvulas y los pistones tienen instalación independiente de aire comprimido.

El manifold de entrada de vapor es una tubería de 4" de diámetro, lo suficientemente grande para mantener la presión cuando se encuentren todas las autoclaves en uso y para conseguir un correcto funcionamiento durante la operación de la autoclave. Del manifold se deriva para cada autoclave una tubería de 2" de diámetro, y en el trayecto el vapor pasa por una válvula de apertura manual, luego por la válvula de control continuo, denominada Válvula de Vapor, dispuesta en paralelo a otra válvula

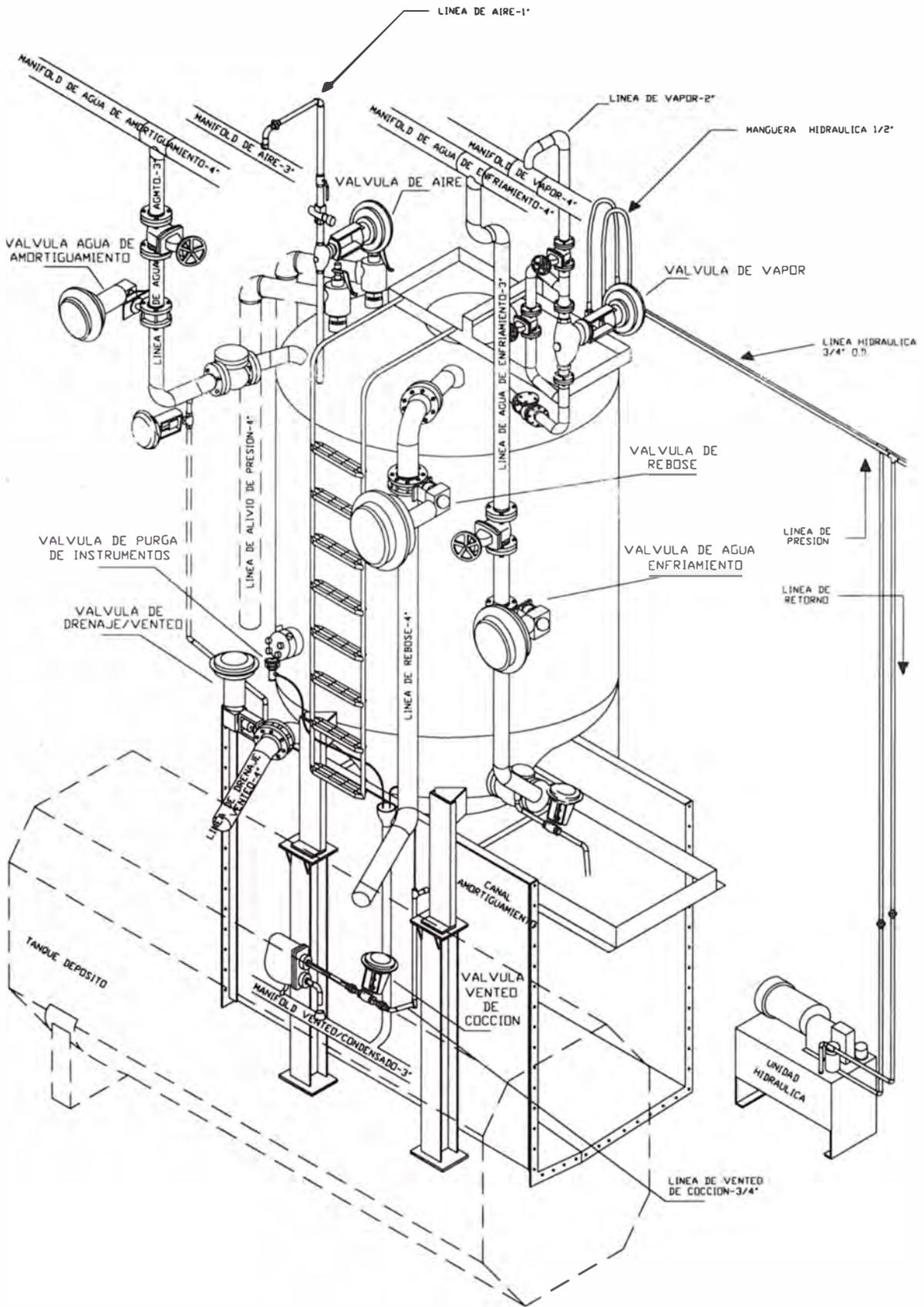


Figura 2.1: Esquema de configuración de una línea de autoclaves

de apertura manual que sirve como válvula de paso o by-pass, luego pasa por una válvula check que permite sólo el ingreso y no la salida, para finalmente llegar a la parte superior de la autoclave. La válvula de paso o by-pass es empleada para operar manualmente a la autoclave en caso de fallar el control automático. El vapor proviene de los calderos, ubicados al exterior de la planta, a una presión de 120psi.

El manifold de entrada de aire es una tubería de diámetro 3", del cual se deriva para cada autoclave una tubería de diámetro 1"; en el trayecto el aire pasa por una válvula de apertura manual, luego por el regulador de presión de aire fijada en 60psi, y finalmente por la válvula de control abierto/cerrado, denominada Válvula de Aire. La entrada del aire a cada autoclave es por la parte superior y por el lado opuesto a la de vapor. Las autoclaves requieren el aire en la etapa de enfriamiento para compensar la presión. El aire proviene del compresor de la planta, a una presión de 120psi.

El manifold de entrada de agua de amortiguamiento es una tubería de diámetro 4". Desde el manifold llega el agua de amortiguamiento a cada autoclave por la parte superior mediante una tubería de diámetro 3", una válvula de apertura manual, la válvula de control abierto/cerrado denominada Válvula de Agua de Amortiguamiento, y finalmente por una válvula check para que sólo ingrese y no salga el agua de la autoclave. El agua de amortiguamiento es enviada desde el tanque depósito por la denominada Bomba de Agua de Amortiguamiento.

El manifold de entrada de agua de enfriamiento es una tubería de 4" de diámetro. Una tubería de diámetro 3", que se deriva del manifold, suministra por la parte inferior de cada autoclave el agua de enfriamiento, cuyo ingreso es por una válvula de apertura manual, luego por la válvula de control abierto/cerrado denominada Válvula de Agua de Enfriamiento, y finalmente por una válvula check para que sólo ingrese el agua a la autoclave. El agua de enfriamiento es enviada desde el tanque depósito por la denominada Bomba de Agua de Enfriamiento. Cabe resaltar que, tanto el agua de amortiguamiento como el agua de enfriamiento son ambos el mismo agua contenido en el tanque depósito, y que utilizamos dos conceptos para diferenciar dos distintas aplicaciones durante el proceso completo de esterilización.

El manifold de salida de venteo/condensado es una tubería de diámetro 3" que para evitar el condensado en cada autoclave recibe: la salida de purga de instrumentos y la salida de venteo de cocción. La salida de purga de instrumentos de cada autoclave es por una tubería de diámetro ¼" y por la válvula de control abierto/cerrado

denominada Válvula de Purga de Instrumentos, la cual durante el proceso completo de esterilización purga el condensado y ventea el vapor desde el lóbulo de instrumentos, para evitar que se acumule condensado de vapor. La salida de venteo de cocción es mediante una tubería flexible de diámetro ¼" que se extiende a otra rígida de diámetro ¾", por la válvula de control abierto/cerrado denominada Válvula de Venteo de Cocción, y por una trampa de vapor, que purgan el condensado en el proceso completo y ventean el vapor en la etapa de esterilización (y cocción) desde el fondo de la autoclave, para evitar acumulación del condensado. Este manifold tiene escape libre a la atmósfera. Las válvulas de venteo de cocción y de purga de instrumentos están ubicadas en lugares donde el operador observa directamente el escape de vapor.

En el denominado lóbulo de instrumentos, ubicado en la parte inferior lateral de cada autoclave, se encuentran los instrumentos de medición: el termómetro de mercurio (75°C a 135°C), el manovacuómetro (-30"Hg a 30psi), el elemento primario de temperatura Pt - 100, y el transductor de presión - a - corriente; los dos últimos envían la señal a un indicador/registrador de temperatura y de presión. El lóbulo de instrumentos debe estar libre de condensado de vapor para evitar lecturas erróneas de los instrumentos. El termómetro de mercurio sirve como referencia principal; ante una diferencia con el valor transmitido por el Pt-100, se ajusta el registrador de temperatura para que coincida con el indicado por el termómetro de mercurio.

El tanque depósito, ubicado en el nivel inferior y al costado de cada línea, recibe de cada autoclave: la salida de rebose, y la salida de drenaje/venteo. La salida de rebose de cada autoclave es por la parte superior, por una tubería de diámetro 4" y una válvula de control continuo denominada Válvula de Rebose, la cual es usada principalmente en el control automático de la presión de la autoclave durante la etapa de enfriamiento. La salida de drenaje/venteo de cada autoclave es por la parte inferior, por una tubería de diámetro 4" y una válvula de control abierto/cerrado denominada Válvula de Drenaje/Venteo, la cual es usada para desalojar o drenar el agua de amortiguamiento y para ventear todo el aire de la autoclave en la etapa de venteo, ambos mientras el vapor ingresa por la parte superior. El tanque depósito contiene agua y continuamente recibe las descargas de agua que realiza cada autoclave durante su operación; se controla la temperatura del agua a 75°C, mediante válvulas solenoide y tuberías de ingreso de vapor y de agua fría. En uno de los extremos del tanque, está conectada una tubería elevada a la atmósfera para mantener

su presión interna al valor de la atmosférica, y en el otro extremo una tubería sirve de rebose para descargar el agua en exceso y mantener el nivel constante en el tanque.

El canal de amortiguamiento está ubicado debajo de la fila de autoclaves que conforman una línea, recibe los botes ya esterilizados descargados de cada autoclave, y contiene agua potable para amortiguar la caída de los botes (esto evita las abolladuras del envase). El canal de amortiguamiento desemboca en el canal de enfriamiento; ambos contienen agua potable clorinada y transportadores que desplazan muy lentamente a los botes esterilizados para lograr disminuir la temperatura en el interior del envase (debajo de 32°C) libre de contaminantes. En el canal de enfriamiento están ubicados: el detector de nivel de agua y el sensor de temperatura RTD de agua del canal, ambos envían su señal al tablero de control central. Mediante una tubería y una válvula solenoide ingresa el agua potable para mantener constante el nivel del agua en ambos canales. La temperatura del agua en los canales se mantiene entre 30 y 40°C mediante la recirculación del agua potable a través de un intercambiador de calor, donde el refrigerante es el agua de mar. La bomba que toma y regresa al mar el agua refrigerante, se denomina Bomba de Enfriamiento del Canal. La bomba que toma y regresa al canal el agua potable para ser refrigerado, se denomina Bomba de Recirculación del Canal.

El sistema hidráulico permite accionar los dispositivos hidráulicos de toda una línea de autoclaves. Tanto los correspondientes seguros de hermeticidad como las puertas superior e inferior de cada autoclave, son accionados con pistones hidráulicos. El sistema hidráulico está constituido por: una unidad hidráulica, tuberías de envío a presión y tuberías de retorno para toda la línea de autoclaves; y por: electroválvulas hidráulicas direccionales y pistones hidráulicos en cada autoclave. Las electroválvulas están ubicadas en el tablero electro-hidráulico, al costado de la autoclave.

En cada línea de autoclaves hay un tablero denominado Tablero de Control Central; en el interior del tablero se ubica el controlador lógico programable que controla el funcionamiento automático de toda la línea; en la parte frontal del tablero, se ubican: el terminal de interface de operador para ingresar los datos de operación, los registradores circulares de temperatura/presión para cada autoclave, y el contador electrónico de botes que ingresan a la autoclave.

En cada autoclave, el denominado Tablero de Control de la Autoclave permite el control individual. Para permitir el ingreso/salida de botes de la autoclave, el

tablero contiene interruptores neumáticos para activar/desactivar el canalón y la compuerta, y pulsadores para abrir/cerrar las puertas superior e inferior con sus respectivos seguros; contiene pulsadores para arranque del proceso completo y para activar la descarga de succión; contiene selectores para: habilitar los pulsadores de las puertas, determinar el modo de descarga de la autoclave (estándar/succión), y dar inicio/re-inicio al ciclo del proceso completo; y contiene un selector con llave para dar energía al tablero. El tablero contiene lámparas de indicación del estado actual del proceso completo; lámpara con luz de: color blanco para la condición de autoclave listo, color ambar para la etapa de venteo, color rojo para la etapa de esterilización /cocción, color azul para la etapa de enfriamiento, color verde para la condición de descarga, color amarillo para la condición de fin de ciclo, y color ambar intermitente para indicar presencia de condensado de vapor en el fondo de la autoclave. La figura 2.2 muestra un esquema de la parte frontal del tablero de control de la autoclave.

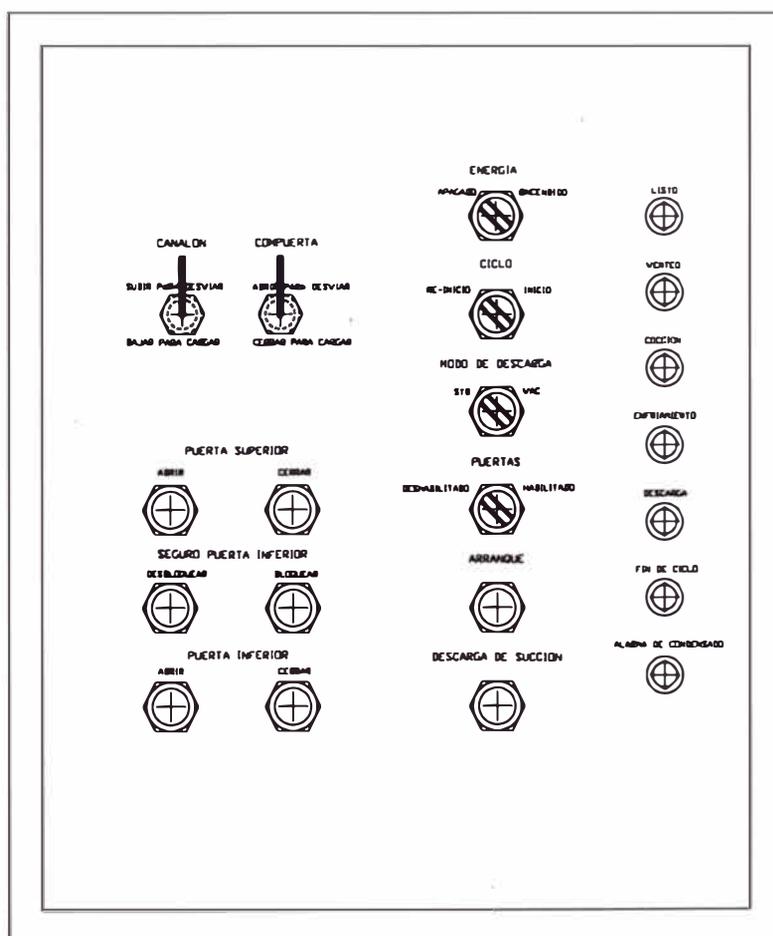


Figura 2.2: Esquema del tablero de control de la autoclave

En el fondo de cada autoclave un electrodo de nivel de agua, denominado detector de condensado, solamente en la etapa de esterilización (y cocción) indica la presencia de condensado de vapor mediante una lámpara intermitente, ubicada en el tablero de control de la autoclave. Esta indicación alerta al operador de un mal funcionamiento del venteo de cocción desde el fondo de la autoclave, y que por lo tanto habrá problemas para purgar el condensado de vapor. Esto es importante ya que el agua dentro de la autoclave origina problemas de transferencia de calor en las conservas enlatadas, al igual que el aire según se explicó en el capítulo I.

Dentro de cada autoclave están instalados otros dos electrodos de nivel de agua. El denominado detector de nivel alto, ubicado en la parte superior, indica el nivel máximo de agua en la autoclave; y el denominado detector de nivel bajo, ubicado en la tubería de salida de drenaje/venteo, indica la no presencia de agua en la autoclave.

Finalmente, en la parte superior de cada autoclave están instaladas dos válvulas de alivio de presión y un interruptor de presión. Las válvulas de alivio sirven, por seguridad, para descargar la presión interna de la autoclave en casos que, por mal funcionamiento de alguna válvula o mala operación de la autoclave, la presión aumente súbitamente. El interruptor de presión tiene unos contactos eléctricos que cambian de estado al aumentar la presión en la autoclave; esto sirve, por seguridad, para no permitir abrir las puertas de la autoclave.

2.2 Operación y Control Automático de la Autoclave

En la planta de crudos, las trece autoclaves verticales son idénticas en diseño, construcción, operación y funcionamiento; están agrupadas en tres líneas según la configuración explicada en la sección anterior. La operación y el control automático del funcionamiento de cada autoclave obedecen a su diseño mismo, y fue realizado por la firma americana Målo (ver referencia [15]).

El sistema de control en cada línea de autoclaves está centralizado en un Controlador Lógico Programable (PLC), de fabricación Allen-Bradley y de la serie PLC-5, con módulos de entrada/salida digitales y analógicos, para el control de todas las variables en cada una de las autoclaves. Toda la operación desde el inicio hasta el final, así como el control en lazo abierto y en lazo cerrado de las variables en el proceso completo de esterilización es realizado por el controlador lógico programable.

Desde el tablero de control de cada autoclave, le llegan a los módulos de entrada digital del PLC las siguientes señales: inicio/re-inicio del ciclo, modo de descarga

estándar/vacío (std/vac), arranque (del proceso completo), descarga de succión, y los detectores de nivel bajo y de nivel alto de agua en la autoclave. El PLC mediante los módulos de salida digital permite habilitar, en el tablero de control de cada autoclave, lo siguiente; las lámparas de: listo, venteo, cocción (esterilización), enfriamiento, descarga, fin de ciclo y arranque del proceso completo; las electroválvulas neumáticas direccionales para accionar las válvulas de: agua de amortiguamiento, drenaje/venteo, venteo de cocción, purga de instrumentos, aire, y agua de enfriamiento. Al módulo de entrada analógica del PLC ingresan las señales, en 4-20mA, de temperatura y de presión de cada autoclave. El PLC mediante los módulos de salida analógica arroja las señales en 4-20mA, para controlar la válvula de vapor y la válvula de rebose, en cada autoclave. El esquema de la figura 2.3 muestra el detalle de los módulos de entrada y de salida del PLC en la línea de autoclaves tall.

El operador para ingresar y modificar los datos de operación de cada autoclave dentro del PLC, utiliza el Terminal de Interface de Operador, que se comunica con el PLC mediante el protocolo de comunicaciones "DH plus" de Allen Bradley. El terminal de interface contiene un monitor a color (similar al de una computadora) y varias teclas-funciones que habilitan a los "pulsadores gráficos".

Además, el terminal de interface muestra en el monitor: los datos de las variables, los gráficos del proceso, y los pulsadores gráficos configurados en varias pantallas. Una pantalla muestra el estado general de las variables de las autoclaves de una línea, como: el punto de ajuste de la temperatura de esterilización y el valor actual de la temperatura, el punto de ajuste tanto de la presión de purga de fondo como de la presión de enfriamiento y el valor actual de la presión, el punto de ajuste y el valor transcurrido del tiempo de venteo, el punto de ajuste y el valor transcurrido del tiempo de esterilización, el punto de ajuste y el valor transcurrido del tiempo de enfriamiento, y el porcentaje de apertura tanto de la válvula de vapor como de la válvula de rebose. Otra pantalla muestra para una autoclave: el esquemático del tanque con indicación de funcionamiento de las válvulas de ingreso/salida (parpadeo del símbolo válvula en las del tipo abierto/cerrado, y porcentaje de apertura en las del tipo continuo), y el estado de las mismas variables con la opción de variar el valor de los puntos de ajuste. La tercera pantalla muestra para el tanque depósito: el valor actual de la temperatura del agua y su punto de ajuste con la opción de variar su valor, los pulsadores gráficos para controlar en manual ó en automático tanto el nivel como

la temperatura del agua. La cuarta pantalla muestra para el canal de enfriamiento: el valor actual de la temperatura del agua y su punto de ajuste con la opción de variar su valor, y los pulsadores gráficos para controlar en manual ó en automático tanto el nivel como la temperatura del agua.

Los valores de los puntos de ajuste pueden ser variados por el operador en el terminal de interface según el tipo de conserva que se va a esterilizar, y normalmente toman valores: para la presión de purga de fondo en 90KPa, para el tiempo de venteo en 5 minutos, para la temperatura de esterilización entre 116 y 117°C, para el tiempo de esterilización entre 40 y 90 minutos, para la presión de enfriamiento en 90KPa, y para el tiempo de enfriamiento entre 2 y 10 minutos.

Ubicados en la parte frontal del tablero de control central, un Registrador/Indicador de Temperatura y Presión para cada autoclave, indica en una pantalla digital los valores actuales de la temperatura y de la presión, y registra en una carta circular con pluma de color rojo la curva de temperatura y con pluma de color azul la curva de presión. Para la temperatura, el registrador recibe la señal desde el Pt-100, y luego la retransmite en señal de 4-20mA hacia el PLC. Para la presión, el registrador está en serie con el módulo de entrada analógica del PLC, y ambos reciben la señal en 4-20mA que envía el transductor de presión - a - corriente. La carta circular es identificada con el número de autoclave correspondiente, con la fecha actual del proceso, y con el tipo de envase. Las curvas son trazadas en la carta circular una para cada proceso completo de esterilización, y luego son identificadas con el número de "batch" correspondiente, con el código del tipo de conserva procesada, con la fecha actual de esterilización y la de vencimiento, y con la cantidad de botes (latas) que ingresaron al proceso completo en la autoclave.

El contador electrónico es un equipo ubicado en la parte frontal del tablero de control central que cuenta la cantidad de botes que ingresan a la línea de autoclaves. Este contador recibe la señal de un sensor de proximidad inductivo ubicado en la entrada del transportador de distribución, que detecta cada bote (lata) que pasa por el transportador. El operador puede re-iniciar el contador cada vez que desee llenar con botes una autoclave.

Antes de empezar a operar el sistema en cada línea de autoclaves, el operador cumple con las siguientes revisiones:

1. Bomba de agua de amortiguamiento y bomba de agua de enfriamiento, probadas y funcionando adecuadamente.
2. Transportador de distribución de botes, funcionando adecuadamente.
3. Transportadores en los canales de amortiguamiento y de enfriamiento, funcionando adecuadamente.
4. Sistema hidráulico probado y funcionando adecuadamente.
5. Nivel y temperatura del agua en el canal de enfriamiento, con valores apropiados.
6. Bomba de recirculación del canal y bomba de enfriamiento del canal, probadas y funcionando correctamente.
7. Tanque depósito con la cantidad adecuada de agua y a la temperatura apropiada.
8. Interruptor activado para dar energía eléctrica al tablero de control central y al tablero de control de la autoclave.
9. Puertas superior e inferior de cada autoclave, probadas y funcionando adecuadamente.
10. Disponibilidad de presión de aire (60 a 70 psi), en cada autoclave.
11. Todas las válvulas manuales de ingreso a las autoclaves abiertas, con excepción de la válvula de alivio de presión.
12. Contador electrónico de botes fijado en cero.
13. Terminal de interface de operador con datos de operación adecuados.

Luego de efectuar las correspondientes revisiones del sistema, el operador puede dar inicio al ciclo de operación/funcionamiento de cualquier autoclave. Según el modo de descarga, la autoclave funciona en modo de descarga estándar y en modo de descarga en vacío.

Los eventos del ciclo se agrupan en cinco: control a lazo abierto en carga de autoclave, control en la etapa de venteo (y pre-venteo), control en la etapa de esterilización (ó cocción), control en la etapa de enfriamiento, y control a lazo abierto en descarga de autoclave.

En la planta de crudos frecuentemente se usa el modo de descarga en vacío. A continuación se explica el ciclo correspondiente, según muestra el Diagrama 2.1, adjuntado en el Anexo B.

Control a lazo abierto en carga de autoclave

El operador interviene para manipular en el tablero de control de la autoclave. El operador ubica en la posición "inicio" el selector de ciclo, dando así inicio al ciclo de operación/funcionamiento de la autoclave; esta señal llega al módulo de entrada digital del PLC que, mediante el módulo de salida analógica abre completamente la válvula de rebose, y mediante el módulo de salida digital activa la electroválvula direccional (60psi) que abre la válvula de agua de amortiguamiento.

La autoclave empieza a llenarse con agua de amortiguamiento, y cuando el nivel del agua alcanza el borde superior, se activa el detector de nivel alto, el cual envía la señal al módulo de entrada digital del PLC que, mediante los módulos de salida digital, permite encender la lámpara "listo", y activar la electroválvula direccional (60psi) que cierra la válvula de agua de amortiguamiento. Luego, el operador ubica el interruptor neumático del canalón en la posición "bajar para cargar" permitiendo que el pistón neumático se active para bajar al canalón hacia la autoclave, y ubica el interruptor neumático de la compuerta en la posición "cerrar para cargar" permitiendo que el pistón neumático se active para orientar la compuerta, tal que los botes ingresen hacia la autoclave.

Durante el ingreso de botes a la autoclave, la válvula de rebose permanece completamente abierta para permitir escapar, hacia el tanque depósito, el agua desplazada por los botes. Cuando la cantidad apropiada de botes ha ingresado dentro de la autoclave, el operador ubica el interruptor neumático de la compuerta en la posición "abrir para desviar" permitiendo orientar la compuerta tal que los botes se desvíen, y ubica el interruptor neumático del canalón en la posición "subir para desviar" permitiendo subir el canalón. Finalmente, el operador presiona el pulsador para "cerrar" la puerta superior de la autoclave, y luego presiona el pulsador "arranque" para empezar el proceso completo de esterilización. Esta última señal llega al PLC que, luego asume el control automático de la autoclave.

Control en la etapa de venteo

Una etapa anterior, denominada etapa de pre - venteo consiste en desalojar el agua de la autoclave antes de empezar la etapa de venteo, cuyo control automático se describe a continuación. Luego que el operador presiona el pulsador "arranque", el PLC mediante el módulo de salida analógica abre la válvula de vapor, y la controla para limitar la presión en la autoclave al valor del punto de ajuste de la presión de purga de fondo (ingresado en el terminal de interface). Simultáneamente, el PLC abre la válvula de drenaje/venteo, la válvula de venteo de cocción, la válvula de purga de instrumentos, y permite encender la lámpara blanca del pulsador "arranque" para indicar que el proceso completo de esterilización ha empezado. Asimismo, se inicia el temporizador de purga de fondo (interno del PLC) que durante su valor fijado (el cual el operador no tiene acceso) mantiene abierta la válvula de rebose, para permitir que el agua drene por debajo del anillo de vapor en la autoclave, luego del cual el PLC ordena cerrarla. Además, al subir la presión en la autoclave, cambian de estado los contactos eléctricos del interruptor de presión, permitiendo bloquear los pulsadores de ambas puertas. El vapor que ingresa a la autoclave permite desalojar el agua de amortiguamiento por la tubería de drenaje/venteo hacia el tanque depósito, el nivel del agua disminuye, el detector de nivel alto se desactiva y envía la señal al PLC, que permite apagar la lámpara "listo". En esta etapa previa, la autoclave está sometida al denominado control automático de purga de fondo.

La etapa de venteo empieza luego que el agua de amortiguamiento ha sido completamente desalojada de la autoclave, y el detector de nivel bajo haya detectado la no presencia de agua en la tubería de drenaje/venteo. Este detector envía la señal al PLC que, permite encender la lámpara "venteo". Simultáneamente, se inicia el temporizador de venteo (interno del PLC, cuyo punto de ajuste es fijado en el terminal de interface), y el PLC controla la válvula de vapor para subir la temperatura en la autoclave y luego mantenerla al valor del punto de ajuste de la temperatura de venteo (ingresado internamente en el PLC y el cual el operador no tiene acceso). Si el temporizador de venteo alcanza el valor del punto de ajuste y la temperatura en la autoclave ha alcanzado por lo menos el valor del punto de ajuste de la temperatura de venteo, el PLC permite apagar la lámpara "venteo", y cerrar la válvula de drenaje/venteo. Si la temperatura de venteo no ha sido alcanzada al finalizar el temporizador de venteo, la etapa de venteo continua hasta que se logre dicha

temperatura. Al finalizar la etapa de venteo, la temperatura en la autoclave continúa subiendo hasta llegar a la etapa de esterilización.

Control en la etapa de esterilización

El PLC sigue controlando la válvula de vapor y, al estar cerrada la válvula de drenaje/venteo, la temperatura en la autoclave sigue subiendo hasta alcanzar el valor del punto de ajuste de la temperatura de esterilización (ingresado en el terminal de interface); luego empieza la etapa de esterilización, y el PLC permite encender la lámpara "cocción", y se inicia el temporizador de esterilización (interno del PLC, cuyo punto de ajuste es fijado en el terminal de interface). Al empezar la etapa de esterilización, se habilita el circuito de detección de condensado en el fondo de la autoclave. Durante toda la etapa de esterilización (o cocción), el PLC logra mantener la temperatura en la autoclave al valor del punto de ajuste.

Al llegar el temporizador de cocción (ó esterilización) al valor del punto de ajuste, el PLC ejecuta simultáneamente lo siguiente: cierra la válvula de vapor, abre rápidamente la válvula de aire para compensar la presión en la autoclave, habilita el controlador interno de presión que controla la válvula de rebose, cierra la válvula de venteo de cocción, cierra la válvula de purga de instrumentos, y apaga la lámpara "cocción". Asimismo, el PLC ordena abrir lentamente la válvula de agua de enfriamiento para que reducir el efecto de choque del vapor con el agua que ingresa suavemente a la autoclave. Inmediatamente empieza el control en la etapa de enfriamiento.

Para abrir rápida (o lentamente) la válvula de aire y lentamente la válvula de agua de enfriamiento, en el interior del tablero de control de la autoclave, se disponen de unos dispositivos neumáticos que regulan el caudal de aire que manipula la velocidad de movimiento de los actuadores de cada válvula.

Control en la etapa de enfriamiento

Durante la etapa de enfriamiento, el agua entra a la autoclave a través de la válvula de agua de enfriamiento activando al detector de nivel bajo, y el controlador interno de presión manipula la válvula de rebose para controlar la presión en la autoclave al valor del punto de ajuste de la presión de enfriamiento (ingresado en el terminal de interface). El agua de enfriamiento llega al borde superior de la autoclave y se activa el detector de nivel alto. Esta última señal llega al PLC, e inmediatamente ejecuta lo siguiente: el PLC enciende la lámpara "enfriamiento"; se inicia el temporizador de cierre de aire (interno del PLC) que luego de llegar al valor del punto de

ajuste (el cual no tiene acceso el operador), el PLC ordena que la válvula de aire se cierre lentamente, para permitir que el agua alcance la parte superior de la autoclave sin que baje la presión; se inicia el temporizador de enfriamiento (interno del PLC).

Al llegar el temporizador de enfriamiento al valor del punto de ajuste (ingresado en el terminal de interface), el PLC ejecuta simultáneamente lo siguiente: cierra la válvula de agua de enfriamiento; abre completamente la válvula de rebose, para que toda la presión salga de la autoclave; apaga la lámpara "enfriamiento"; y enciende la lámpara "descarga" para indicar que el proceso completo ha terminado.

Además, al disminuir la presión en la autoclave, los contactos eléctricos del interruptor de presión cambian de estado habilitando los pulsadores para abrir la puerta inferior de la autoclave.

Control a lazo abierto en descarga de autoclave

La participación del operador se reanuda. El operador presiona el pulsador de descarga de succión en el tablero de control de la autoclave. Esta señal llega al PLC que simultáneamente ejecuta lo siguiente: cierra completamente la válvula de rebose, sellando la autoclave; apaga la lámpara "descarga", e inicia el temporizador de fin de ciclo (interno del PLC) que luego de llegar al valor del punto de ajuste (el cual no tiene acceso el operador), enciende la lámpara "fin de ciclo". Luego, el operador presiona el pulsador "desbloqueo" para desactivar el seguro de la puerta inferior, y después presiona el pulsador para "abrir" la puerta inferior. En ese momento los botes empiezan a caer al canal de amortiguamiento.

Después que todos los botes han dejado la autoclave, el operador presiona el pulsador para "cerrar" la puerta inferior, luego presiona el pulsador "bloqueo" para activar el seguro de la puerta inferior, y después presiona el pulsador para "abrir" la puerta superior. Finalmente, el operador fija el modo "vac" (vacío) con el selector del modo de descarga, y fija el selector de ciclo en la posición "re-inicio"; esta última señal llega al PLC que ejecuta: el reajuste a cero de todos los temporizadores internos sin afectar los valores de punto de ajuste, y apaga la lámpara "arranque" y la lámpara "fin de ciclo". Con esto termina el ciclo de operación/funcionamiento de la autoclave.

El enfriamiento final de los botes será completado en los canales de amortiguamiento y de enfriamiento.

CAPÍTULO III

MODELO DINÁMICO DEL PROCESO

El proceso de esterilización de la autoclave comprende el proceso desarrollado en la etapa de esterilización, que empieza luego del cierre de la válvula de drenaje/venteo al término de la etapa de venteo. Al estar cerrada la válvula de drenaje/venteo, la temperatura en el interior de la autoclave empieza a subir. Este aumento en la temperatura es regulado por el controlador de temperatura de esterilización (interno del PLC), que comienza a operar para llevar la temperatura hasta el valor del punto de ajuste de esterilización, y para mantenerla en ese valor durante todo el tiempo de esterilización establecido.

3.1. El Método Experimental

El modelo dinámico del proceso de esterilización encontrado, se basa en la experimentación in-situ. Puesto que en las autoclaves la esterilización es un proceso real, entonces es posible realizar una serie de experimentos para determinar curvas experimentales de respuesta a un escalón. A partir de estas curvas experimentales es posible encontrar funciones de transferencia que reproduzcan en forma aproximada las mismas curvas.

Se realizaron dos experimentos en la autoclave No. 12, de la línea austral pack de la planta de conservas, en fechas distintas. El primer experimento fue realizado el día 17 de julio del 2002, y el segundo al día siguiente. Las conservas procesadas en ambos días fue con la especie anchoveta, y el envase de lata utilizado fue del tipo austral pack. La autoclave (de capacidad 17500 latas del tipo austral pack) se cargó para el primer experimento con 12915 latas, es decir prácticamente el 74 % de carga, y para el segundo experimento con 4390 latas o prácticamente el 25 % de carga.

Normalmente no se tiene acceso para fijar en control manual al controlador de temperatura (interno del PLC) que permita aplicar un escalón a la entrada del proceso. Se tuvo que insertar en paralelo un equipo controlador de temperatura

El controlador de temperatura, que opera en modo manual/automático, según muestra la figura 3.1. Para aplicar el control automático, se activa el interruptor de conmutación. El controlador de temperatura, que opera en modo manual/automático, estaba previamente fijado en control manual y con una salida incrementada en el 10% respecto a la del PLC para ambos experimentos.

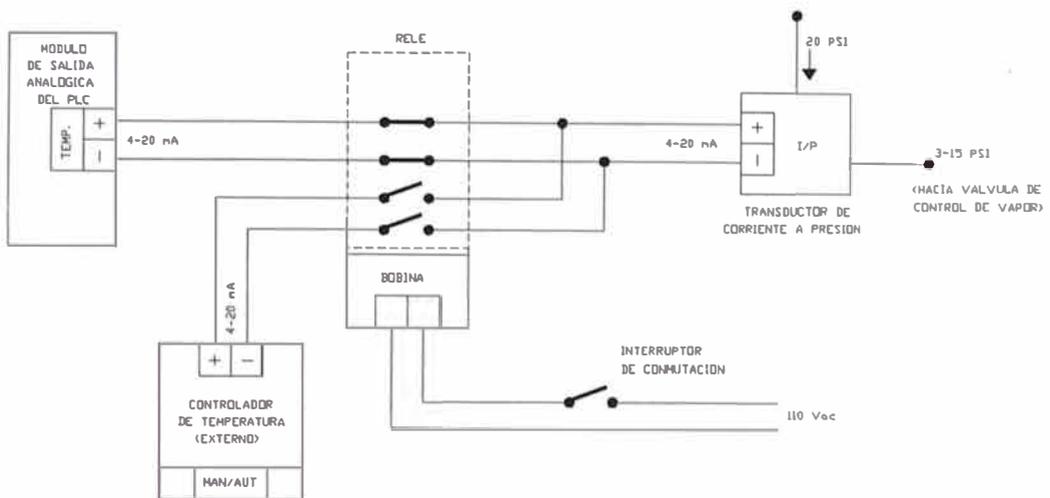


Figura 3.1: Esquema de conexiones para configurar el modo dinámico experimental del proceso.

A continuación detallamos el primer experimento realizado. El proceso completo de esterilización empieza sin mayores inconvenientes bajo el control automático centralizado en el PLC. Al manipular la tapa de esterilización, el controlador de temperatura correspondiente (interno del PLC), regula la válvula de vapor llevando a la temperatura $i(t)$ al valor de esterilización fijada en $i_0 = 117^\circ$ a las 5:12 p.m. aproximadamente. Luego de 37 minutos (a las 5:49 p.m. aproximadamente) de transcurrir la esterilización, activamos el interruptor de conmutación y el vástago de la válvula de vapor se desplaza desde $u_0 = 9.3$ mm (el terminal de interfaz del operador indicaba un 31% de apertura) hasta 12.3 mm; así, generamos un escalón de magnitud $u(\infty) = 3$ mm (10% de escalón). La longitud del vástago de la válvula de vapor es 30 mm. Se registró la evolución de la temperatura hasta que ésta se estabilizó en un valor: $i_0 + i(\infty)$, siendo $i(\infty) = 4^\circ\text{C}$.

A horas 6:11p.m. terminamos con el experimento, y dimos pase al controlador del PLC.

3.2. Análisis de la Respuesta al Escalón

De la curva obtenida en el primer experimento tomamos varios puntos representativos, y anotamos los valores de temperatura y de tiempo. Con estos datos podemos realizar un pequeño programa en código MATLAB [1] que permita graficar la curva de temperatura $i(t)$ del experimento realizado con el 74 % de carga. La figura 3.2 muestra la curva de temperatura $i(t)$ obtenida con el Matlab; esta curva es una réplica de la obtenida en el experimento con el 74 % de carga y un escalón de 3 mm de apertura de válvula.

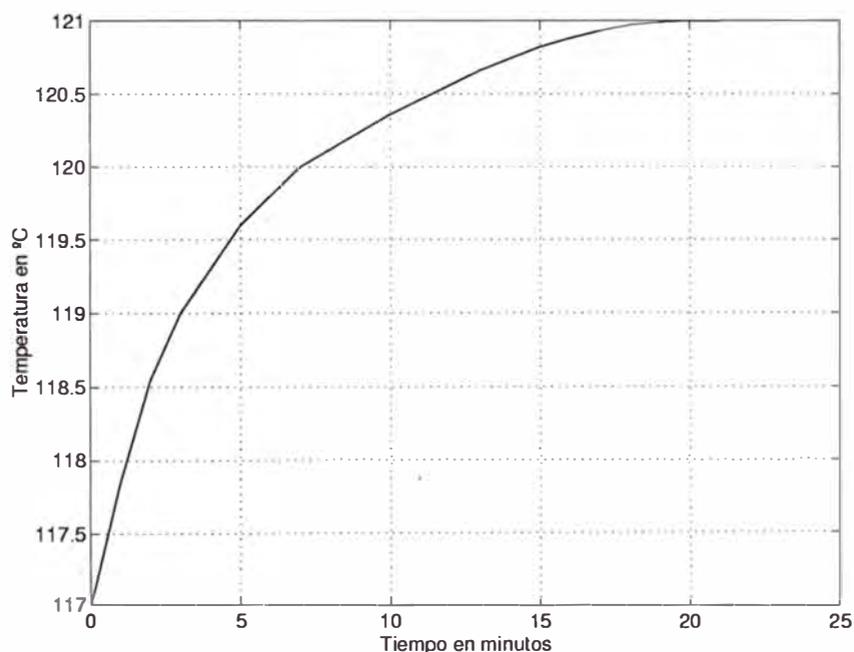


Figura 3.2: Temperatura $i(t)$ en °C graficada con Matlab, correspondiente al primer experimento con el 74 % de carga.

A partir de la figura 3.2 podemos asumir para el proceso con el 74 % de carga una función de transferencia de primer orden, con valores aproximados de $\tau = 4.95$ y $K_p = 1.333$ °C/mm, es decir:

$$\frac{i(s)}{u(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad K_p = \frac{i(\infty)}{u(\infty)} \quad (3.1)$$

donde s es la variable de Laplace. La solución de (3.1) es conocida:

$$i(t) = K_p(1 - e^{-t/\tau})u(t)$$

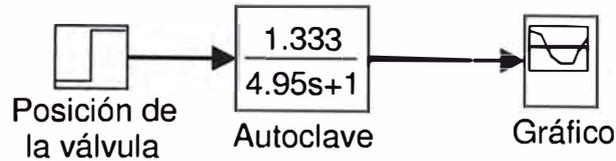


Figura 3.3: Esquema del simulink de Matlab usando (3.1), correspondiente al primer experimento con el 74% de carga.

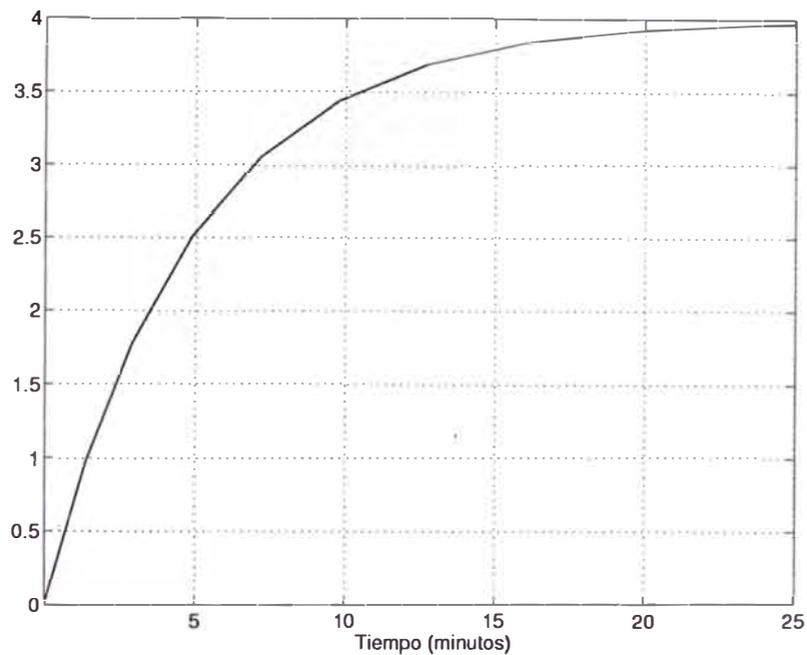


Figura 3.4: Temperatura $i(t)$ en $^{\circ}\text{C}$ obtenida con el simulink de la figura 3.3, correspondiente al primer experimento con el 74% de carga.

Para comprobar la función de transferencia de (3.1) empleamos el simulink de Matlab. La figura 3.3 muestra el esquema del simulink empleado, donde usamos la función de transferencia dada en (3.1) y un escalón de 3 mm de posición de la válvula. El simulink grafica la curva de temperatura mostrada en la figura 3.4, donde el eje vertical de temperatura está dado en $^{\circ}\text{C}$ y el valor cero corresponde a 117°C .

Si comparamos la curva de temperatura ilustrada en la figura 3.2 con la curva graficada con el simulink, ilustrada en la figura 3.4, vemos en esta última que, la curva de temperatura está ligeramente hacia abajo para valores mayores a 15 minutos. Esto se debe a la aproximación para considerar la función de transferencia de primer orden, que es la que mejor se aproxima, o se debe a las pequeñas desviaciones en la toma de datos de la curva experimental.

Para el segundo experimento que considera el 25 % de carga en la autoclave, de forma similar que en el primero, utilizamos el simulink de Matlab para graficar una curva similar a la obtenida en el experimento. La figura 3.5 muestra el esquema del simulink empleado, en el cual consideramos los valores de $i(\infty) = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ (valor final de la variación de temperatura en el segundo experimento) y $u(\infty) = 3 \text{ mm}$ (el escalón que produce el $i(\infty)$), y asumimos una función de transferencia de segundo orden, tomando como punto de partida la información de la función de transferencia del primer experimento. Luego de varias pruebas logramos encontrar los valores aproximados de los parámetros de la función de transferencia, tal que el simulink grafique una curva de respuesta al escalón, similar a la del segundo experimento, según muestra la figura 3.6.

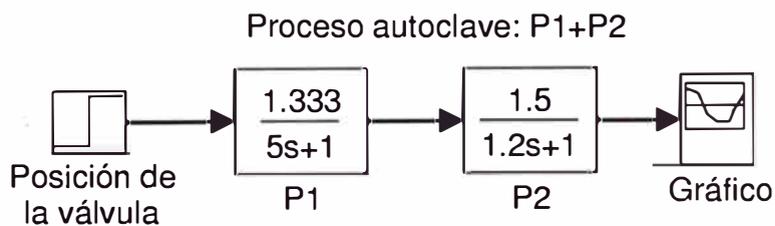


Figura 3.5: Esquema del simulink de Matlab, que grafica la curva mostrada en la figura 3.6, correspondiente al segundo experimento con el 25 % de carga.

Luego podemos afirmar que la función de transferencia del proceso de esterilización para bajas cargas (25 %) toma la forma siguiente, con $K_p = 2 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ y $\tau_1 = 5$ y $\tau_2 = 1.2$:

$$\frac{i(s)}{u(s)} = \frac{K_p}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad K_p = \frac{i(\infty)}{u(\infty)} \quad (3.2)$$

La figura 3.6 muestra la respuesta al escalón correspondiente a la función de transferencia encontrada y dada en (3.2) para el proceso con el 25 % de carga. En la figura 3.6 el eje vertical de temperatura está dado en °C y el valor cero corresponde a 117°C.

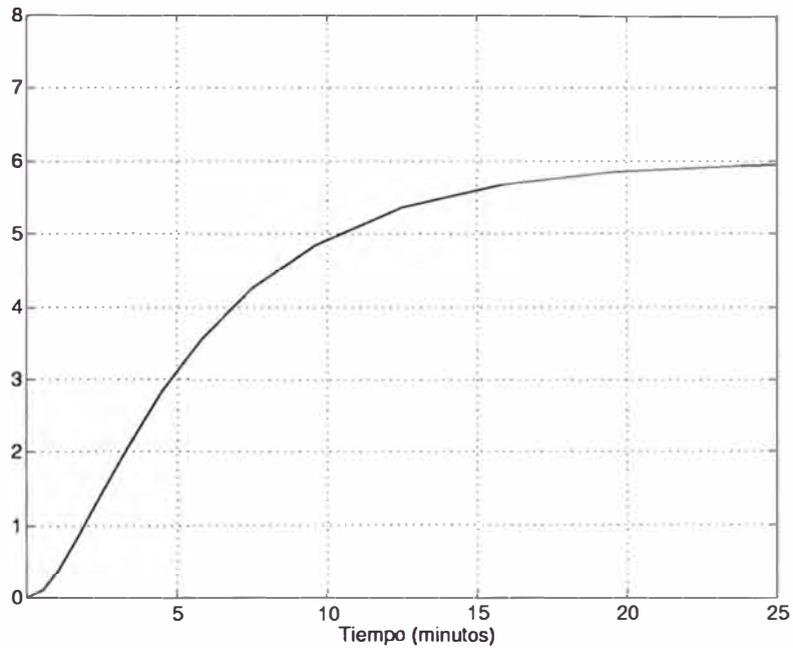


Figura 3.6: Temperatura $i(t)$ en °C graficada con el simulink de la figura 3.5, correspondiente al segundo experimento con el 25 % de carga.

CAPÍTULO IV

CONTROL CLÁSICO DEL PROCESO

4.1. Control Actual del Proceso de Esterilización

En el proceso de esterilización de la autoclave, el sistema de control comprende el lazo cerrado de control de la temperatura y el lazo abierto de control de la presión en la autoclave. Solamente está habilitado el controlador de temperatura de esterilización (interno del PLC); puesto que el vapor utilizado para la esterilización es del tipo saturado, a cada valor de presión le corresponde un valor de temperatura, por lo tanto no es necesario controlar la presión. El controlador de presión se habilita en la etapa de enfriamiento, en el cual el sistema de control funciona sin mayores inconvenientes.

En el lazo de control de la temperatura, el elemento primario Pt-100 envía su señal al registrador de temperatura/presión; éste internamente la convierte a una señal de 4-20mA, y la retransmite (ver figura 4.1) al correspondiente módulo de entrada analógica del PLC (tipo modular). El controlador de temperatura de esterilización (interno del PLC) regula según el valor del punto de ajuste fijado (normalmente a 117 °C) y mediante el módulo de salida analógica del PLC arroja la señal de control de 4-20mA. Esta señal llega al transductor de corriente a presión (I/P), ubicado en el interior del tablero de control de la autoclave; y la convierte en una señal neumática de 3-15psi (ver figura 4.1). La señal neumática llega al actuador de la válvula de vapor, que desplaza el vástago para permitir el ingreso de una cantidad de vapor tal que logre mantener la temperatura de esterilización en el valor del punto de ajuste. El valor actual de la temperatura de esterilización se muestra tanto en el registrador como en la pantalla del terminal de interface del operador, y el valor histórico se registra en la carta circular del registrador de temperatura/presión.

En el lazo de control de la presión, el transductor de presión sensa directamente la presión en el interior de la autoclave y la convierte en una señal de

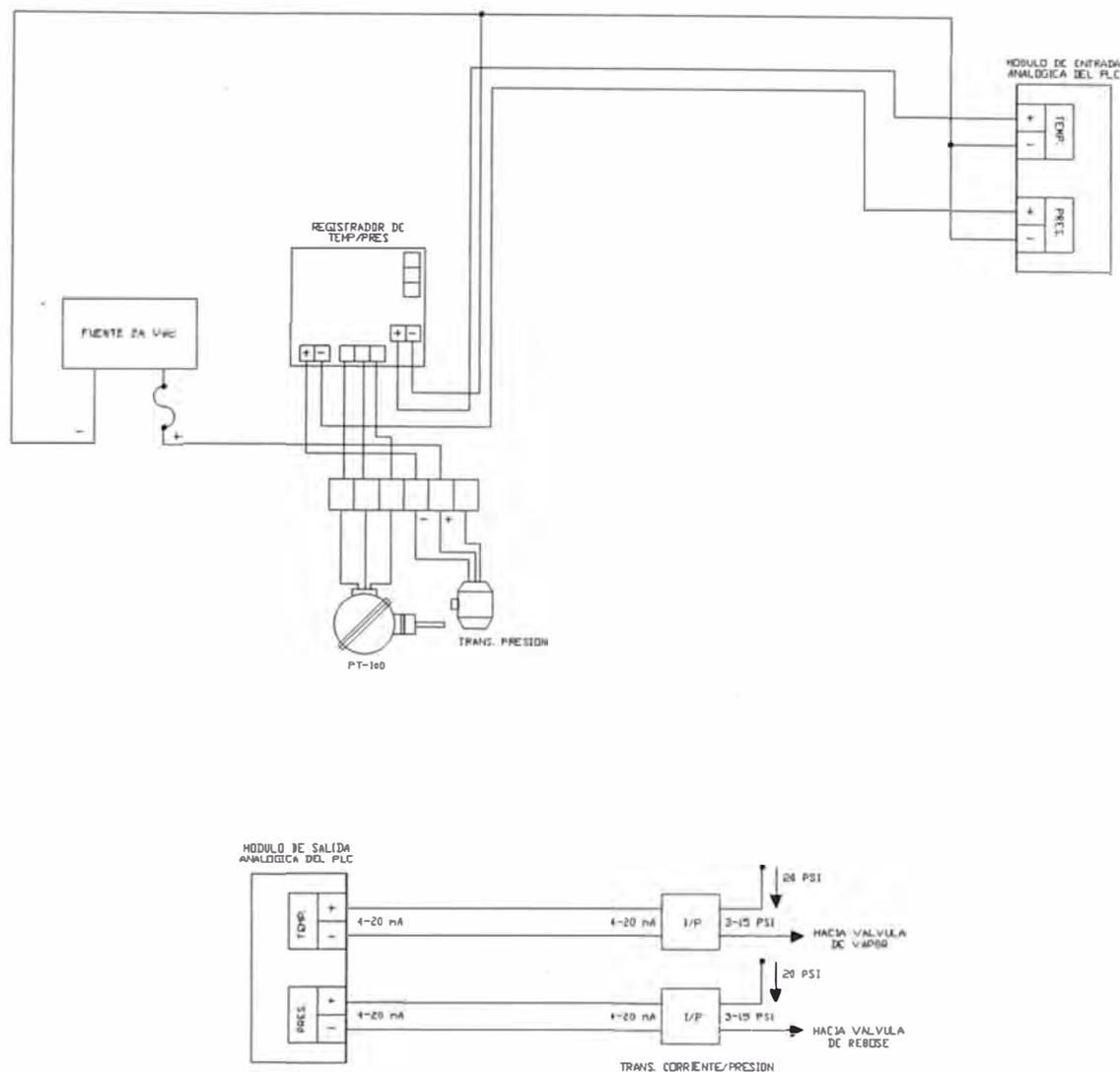


Figura 4.1: Esquema de los lazos de control de temperatura y de presión en la autoclave.

4-20mA. Esta señal llega al módulo de entrada del PLC y al registrador de temperatura/presión realizando un circuito en serie (ver figura 4.1). El transductor de presión funciona con una fuente de voltaje de 24Vdc. Este lazo está abierto porque el controlador de presión (interno del PLC) correspondiente está deshabilitado. El valor actual de la presión se registra y se muestra en el registrador, y también se muestra en la pantalla del terminal de interface de operador. El control de la presión durante el proceso de esterilización es indirecto.

Los controladores de temperatura de esterilización (internos del PLC) se habilitan solamente en las etapas de esterilización. Hay un controlador de tem-

peratura de esterilización (interno del PLC) para cada autoclave. Estos tienen incorporado el algoritmo de control PID. Los valores de los parámetros PID no varían mucho de una autoclave a otra.

En la autoclave No. 12, donde se realizaron los experimentos para determinar el modelo dinámico del proceso (ver ecuaciones (3.1) y (3.2)), los parámetros PID del controlador de temperatura de esterilización están fijados en: $P = 2.8$, $I = 1.0$ y $D = 0$.

Los valores de estos parámetros PID fueron determinados aproximadamente por personal de la firma americana Målo y fueron afinados durante el funcionamiento de la autoclave en tiempo real. Los parámetros corresponden a un proceso con la autoclave a plena carga o completamente lleno con botes (latas). Según el tipo de envase, las autoclaves Tall tienen capacidad hasta 8300 latas, las autoclaves Austral Pack hasta 17500 latas, y las autoclaves Oval hasta 8300 latas.

Limitaciones del Actual Controlador PID

Cuando la autoclave está cargada con latas en cantidades distintas y menores a su capacidad, en el control de la temperatura de esterilización se origina un problema: la curva de temperatura presenta sobreimpulsos y oscilaciones amortiguadas, dependiendo de la cantidad de carga en la autoclave. Esto se debe a que los parámetros PID se mantienen constantes, no se tiene otros valores de los parámetros para distintas cargas, y normalmente el operador no está permitido a realizar alguna variación.

Una alternativa de solución al problema es sintonizar los parámetros PID in-situ durante el proceso de esterilización con distintas cantidades de carga en la autoclave. Esta modalidad necesita de personal capacitado, puede demandar un tiempo mayor al del proceso (hay procesos de esterilización de sólo 40 minutos), y sobretodo poner en riesgo el normal desarrollo del proceso en la autoclave. El control del desarrollo del proceso está a cargo de un inspector de calidad y es estricto en función a cumplir las normas de esterilización comercial nacionales e internacionales.

Po consiguiente, previo al inicio del proceso completo de esterilización es necesario tener los parámetros PID para distintas cargas en la autoclave. Luego, estos parámetros podrán ser ingresados en el controlador de la temperatura de

esterilización del PLC en forma oportuna.

En el capítulo anterior encontramos el modelo dinámico del proceso de esterilización, el mismo que presenta una función de transferencia para una carga del 74 % y otra ligeramente distinta para una carga del 25 %. A continuación veremos la forma cómo actualmente responde el sistema de control de la temperatura de esterilización al aplicar el actual controlador PID al proceso de esterilización con estas dos cargas.

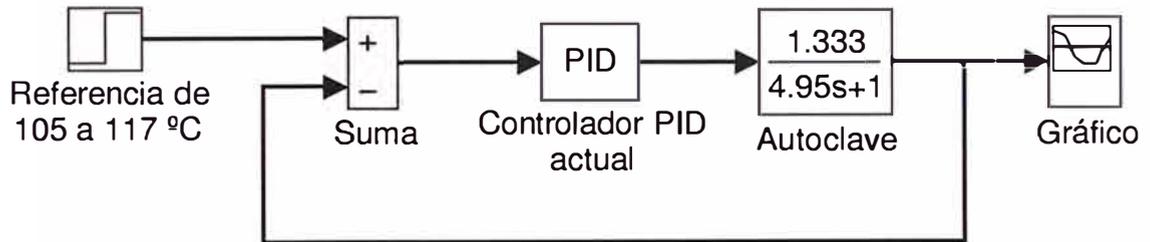


Figura 4.2: Esquema del simulink de Matlab usando el actual controlador PID, proceso con el 74 % de carga.

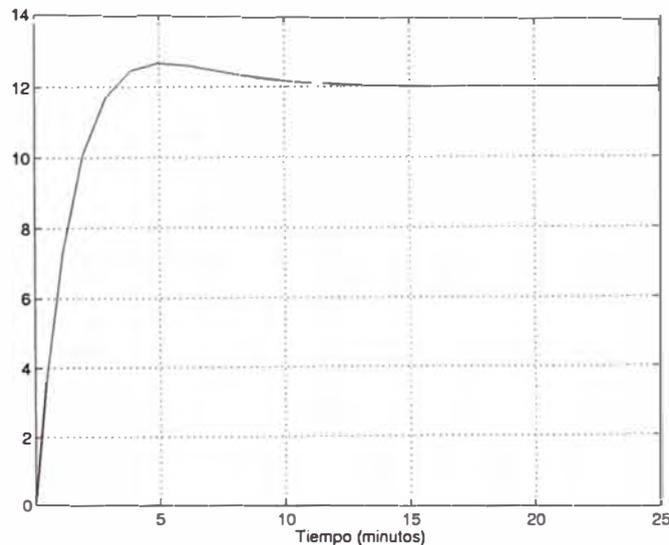


Figura 4.3: Control de la temperatura de esterilización con el actual controlador PID, proceso con el 74 % de carga.

La figura 4.2 muestra el esquema del simulink de Matlab, que empleamos para efectuar la simulación del sistema de control de la temperatura con el actual controlador PID y una carga del 74 % en la autoclave. El simulink grafica la cur-

va de temperatura para un escalón de 12 °C, diferencia de 117 °C (temperatura de esterilización) y 105 °C (temperatura de venteo). La curva de la temperatura controlada se muestra en la figura 4.3, donde el eje vertical de temperatura está dado en °C y el valor cero corresponde a 105 °C; en esta figura se observa que la curva de temperatura presenta un sobreimpulso cercano a 118 °C y un tiempo de establecimiento de diez minutos. El tiempo de establecimiento es, el tiempo requerido por la curva para alcanzar y mantenerse dentro del +/- 2% del escalón de temperatura igual a 12 °C.

El esquema del simulink de Matlab empleado para la simulación del sistema de control de la temperatura, con el actual controlador PID y una carga del 25 %, se muestra en la figura 4.4. La curva de la temperatura controlada que grafica el simulink para un escalón de 12 °C es mostrada en la figura 4.5, donde el eje vertical está dado en °C y el valor cero corresponde a 105 °C.

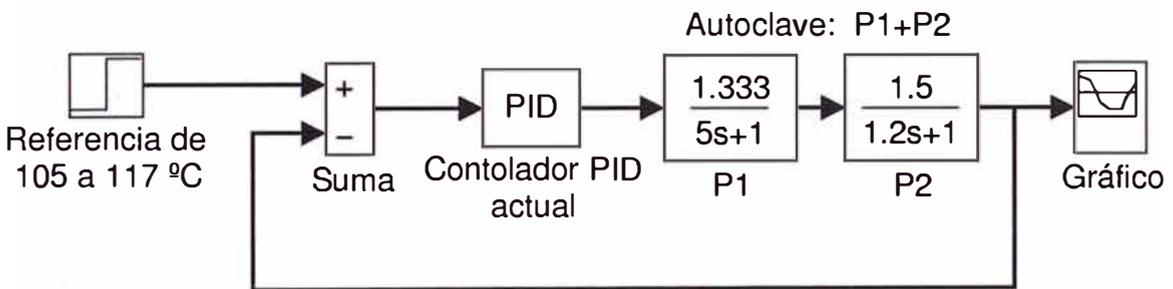


Figura 4.4: Esquema del simulink de Matlab usando el actual controlador PID, proceso con el 25 % de carga.

La curva de temperatura de la figura 4.5 es bastante problemática y es la que actualmente se obtiene en las autoclaves de la planta de crudos cuando éstas contienen cargas bajas (debajo del 30 %); como se observa en la figura, la curva de temperatura presenta una oscilación amortiguada, un máximo sobreimpulso de 121.5 °C y un tiempo de establecimiento de doce minutos; la curva, durante algunos minutos, toma valores por debajo del punto de ajuste de esterilización (117 °C).

En algunos casos reales de la planta el tiempo total (cuando hay más de una

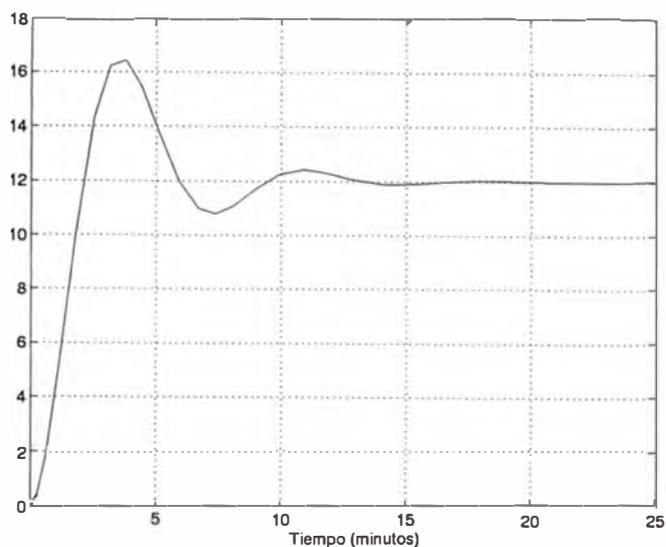


Figura 4.5: Control de la temperatura de esterilización con el actual controlador PID, proceso con el 25 % de carga.

onda de oscilación amortiguada), por debajo del punto de ajuste esterilización, sobrepasa los cinco minutos. En estos casos el operador adiciona más tiempo de esterilización para cumplir con las estrictas normas de esterilización comercial.

4.2. Diseño y Simulación del Controlador PID

Diseñaremos un controlador PID para el proceso con las dos distintas cargas (74 % y 25 %) utilizando el simulink de Matlab. Empezamos con el diseño del controlador para el proceso con el 74 % de carga. En el simulink consideramos la correspondiente función de transferencia de primer orden y tomando como referencia los valores de los parámetros del actual controlador, asignamos otros valores a los parámetros PID y observamos el comportamiento del sistema de control de temperatura para cada juego de valores. De este modo, asignando inicialmente los valores de $P = 2.8$ (el mismo valor del actual controlador) e $I = 0$, el simulink grafica una curva de la temperatura controlada con un tiempo de establecimiento de cinco minutos y un error estacionario de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto al punto de ajuste. Para corregir primero aumentamos gradualmente el valor del parámetro proporcional P (con $I = 0$); con valores de P mayores o iguales a sesenta, el error estacionario es insignificante pero la señal de control (salida del controlador PID) sobrepasa los 30 mm (longitud máxima del vástago de la válvula).

la). Luego añadimos un valor de $I = 0.5$ (con $P = 2.8$); el error estacionario se anula pero el tiempo de establecimiento es diecisiete minutos. Finalmente encontramos los valores adecuados, que definen a un controlador proporcional-integral con $P = 2.6$, $I = 0.6$ y $D = 0$ (controlador PID con $D = 0$).

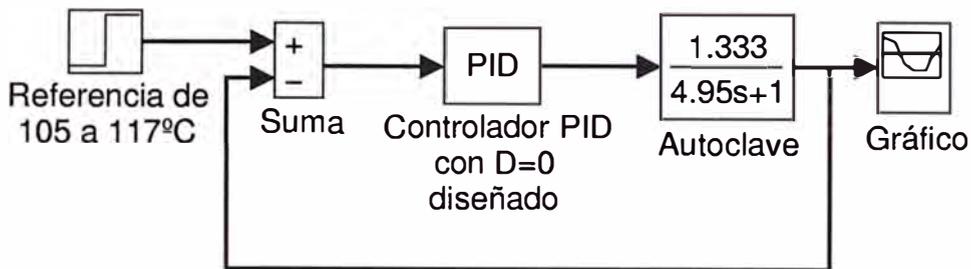


Figura 4.6: Esquema del simulink de Matlab para diseñar el controlador PID, proceso con el 74 % de carga.

La figura 4.6 muestra el esquema Simulink de Matlab empleado para determinar los parámetros del controlador PID diseñado y para efectuar la simulación del sistema de control de la temperatura con el 74 % de carga. La curva de la temperatura controlada se muestra en la figura 4.7, donde el eje vertical de temperatura está dado en $^{\circ}\text{C}$ y el valor cero corresponde a 105°C . En la figura 4.7 la curva de temperatura no presenta sobreimpulsos y el tiempo de establecimiento es cinco minutos (comparar con la curva de la figura 4.3).

La figura 4.8 muestra la señal de control (salida del controlador PID), donde el eje vertical está dado en milímetros y representa la posición de la válvula de control. La figura 4.8 completa la validación del diseño del controlador PID para el proceso con el 74 % de carga; en esta figura observamos que el valor máximo no sobrepasa los 30 mm.

A continuación procedemos con el diseño del controlador PID para el proceso con el 25 % de carga. De forma similar al diseño anterior, empleamos en el simulink la correspondiente función de transferencia de segundo orden y, asignando otros valores a los parámetros PID, observamos el comportamiento del sistema de control de temperatura. Empezamos con los mismos valores del anterior controlador PID diseñado y un pequeño aporte derivativo, es decir con $P =$

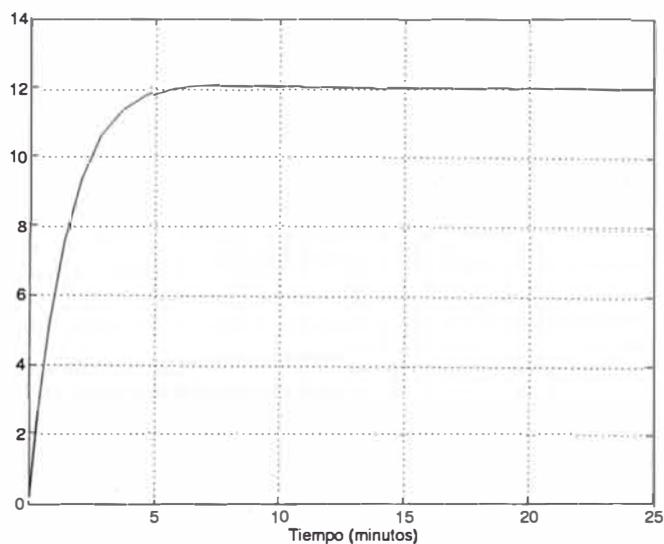


Figura 4.7: Control de la temperatura de esterilización con el controlador PID diseñado, proceso con el 74 % de carga.

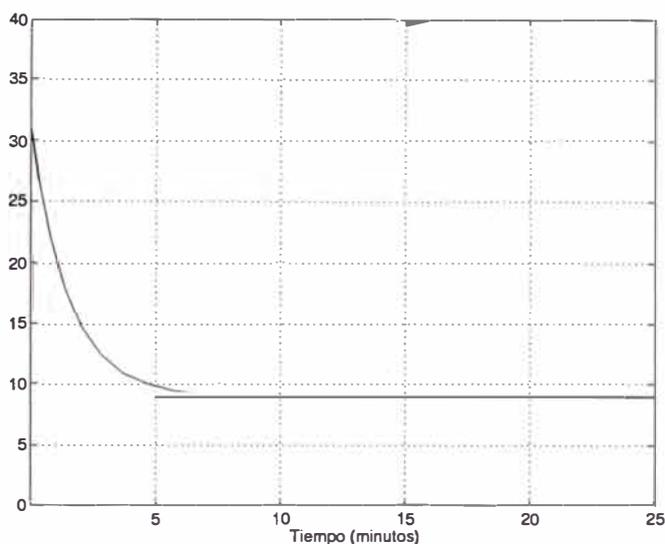


Figura 4.8: Señal de control, posición de la válvula, del controlador PID diseñado, proceso con el 74 % de carga.

2.6, $I = 0.6$ y $D = 0.1$; el simulink grafica una curva de la temperatura controlada que todavía presenta una oscilación amortiguada con un máximo sobreimpulso cercano a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Luego aumentamos el aporte derivativo a un valor de $D = 1$, la oscilación amortiguada de la curva disminuye pero todavía se presenta un sobreimpulso de temperatura de $119\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entonces decidimos disminuir un poco los aportes proporcional e integral. Finalmente, luego de conjugar varios valores, encontramos los adecuados: $P = 2.5$, $I = 0.3$ y $D = 0.9$, que definen a un controlador PID.

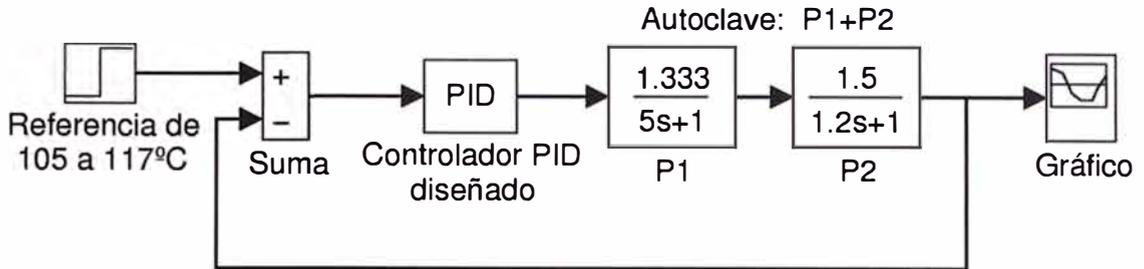


Figura 4.9: Esquema del simulink de Matlab para diseñar el controlador PID, proceso con el 25 % de carga.

El esquema del simulink de Matlab que permite diseñar el controlador PID y efectuar la simulación del sistema de control de la temperatura para el proceso con el 25 % de carga es mostrado en la figura 4.9. En esta figura se muestra claramente el uso de la función de transferencia de segundo orden (ecuación (3.2)) encontrada en el capítulo anterior. El simulink con el controlador PID diseñado grafica la curva de la temperatura controlada mostrada en la figura 4.10, donde el eje vertical de temperatura está dado en °C, y el valor cero corresponde a 105 °C.

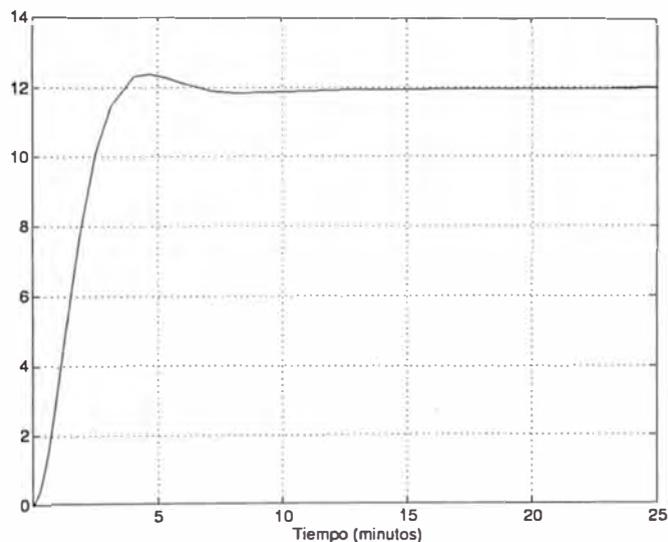


Figura 4.10: Control de la temperatura de esterilización con el controlador PID diseñado, proceso con el 25 % de carga.

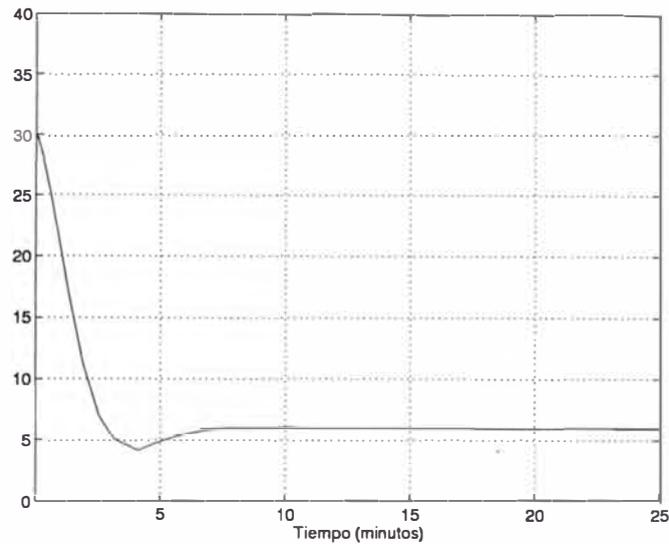


Figura 4.11: Señal de control, posición de la válvula, del controlador PID diseñado, proceso con el 25% de carga.

Si comparamos la curva de temperatura de la figura 4.5 con la correspondiente curva de la figura 4.10 observamos en ésta última que, la curva de la temperatura controlada no presenta una oscilación amortiguada; presenta un ligero sobreimpulso de $117.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un tiempo de establecimiento de seis minutos. El sobreimpulso puede considerarse despreciable para propósitos prácticos.

La curva de la señal de control (salida del controlador PID) mostrada en la figura 4.11, donde el eje vertical está dado en milímetros, da su aporte de validación al diseño del controlador PID para el proceso con el 25% de carga, pues representa la posición de la válvula de control que tampoco supera los 30 mm (longitud máxima del vástago).

CAPÍTULO V

CONTROL ÓPTIMO DEL PROCESO

5.1. El Control Óptimo Cuadrático Estacionario

Este capítulo emplea los procedimientos descritos en el libro de la referencia [3], para diseñar sistemas de control avanzado en el campo discreto. Antes de empezar con el diseño del controlador óptimo cuadrático presentamos un resumen de la teoría de control óptimo cuadrático estacionario, del controlador óptimo cuadrático proporcional-integral, y del observador óptimo de estados.

En esta sección se aborda el problema del control óptimo cuadrático estacionario, que implica determinar una adecuada ley de control óptima $\mathbf{u}(k)$ que sea capaz de trasladar la dinámica del proceso desde un estado inicial $\mathbf{x}(0)$ hacia un estado final deseado $\mathbf{x}(N)$. La fuerza de control óptima $\mathbf{u}(k)$ es el resultado de la minimización de una función de costo cuadrática discreta, que posee la forma siguiente:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{x}^T(k)Q\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}^T(k)R\mathbf{u}(k)] \quad (5.1)$$

donde $\mathbf{x}(k)$ es el vector de estado de dimensión n y $\mathbf{u}(k)$ es el vector de control de dimensión r . La matriz simétrica semidefinida positiva Q (de dimensión $n \times n$) pondera la importancia del vector de estado $\mathbf{x}(k)$, y la matriz simétrica definida positiva R (de dimensión $r \times r$) pondera la importancia de la señal de control $\mathbf{u}(k)$. Una matriz es definida positiva cuando todos sus eigenvalores son positivos, mientras que una matriz es semidefinida positiva cuando sus eigenvalores pueden ser positivos o nulos.

La ley del control óptima empleada se formula como sigue:

$$\mathbf{u}(k) = -K\mathbf{x}(k) \quad (5.2)$$

donde K (de dimensión $r \times n$) es la matriz de ganancia del controlador, denominada también matriz de realimentación de estados. Una condición necesaria para

poder aplicar el control por realimentación de estados es que el proceso sea completamente controlable. Por consiguiente, será necesario verificar dicha condición en el proceso antes de iniciar el procedimiento de diseño.

Observar en la relación (5.2) que la realimentación de estados requiere que todos los estados sean disponibles para procesamiento, ya sea mediante medición o mediante estimación de estados. Esta estimación puede ser realizada empleando un observador óptimo de estados como se verá más adelante. El requerimiento del observador es que el sistema a controlar sea completamente observable.

Sabemos que el sistema a controlar puede ser modelado mediante la siguiente ecuación de estado discreta:

$$\mathbf{x}(k+1) = G\mathbf{x}(k) + H\mathbf{u}(k)$$

donde G es la matriz de estado de dimensión $n \times n$ y H es la matriz de control de dimensión $n \times r$. El sistema debe ser completamente controlable; es decir, que la matriz de controlabilidad M del sistema:

$$M = \begin{bmatrix} H & GH & \dots & G^{n-1}H \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

posea rango completo; es decir, el rango de M debe ser igual al orden n del sistema. Por otro lado, un proceso es completamente observable, cuando sus estados se pueden reconstruir completamente usando las mediciones del sistema. Esto matemáticamente implica que la siguiente matriz N de observabilidad:

$$N = \begin{bmatrix} C & CG & \dots & CG^{n-1} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

posea rango completo n . La expresión de la matriz de ganancia del controlador que es solución al problema del control óptimo cuadrático estacionario, es:

$$K = [R + H^T P H]^{-1} H^T P G \quad (5.5)$$

donde P es una matriz simétrica definida positiva de dimensión $n \times n$, la cual es solución de la siguiente ecuación matricial de Riccati:

$$P = Q + G^T P G - G^T P H [R + H^T P H]^{-1} H^T P G \quad (5.6)$$

La matriz P de (5.6) se halla recursivamente empleando:

$$P(k+1) = Q + G^T P(k) G - G^T P(k) H [R + H^T P(k) H]^{-1} H^T P(k) G \quad (5.7)$$

El controlador óptimo proporcional–integral

La figura 5.1 muestra la configuración del regulador óptimo proporcional–integral [2], [3] que emplearemos en este estudio, en donde se ha añadido acción integral en el sistema de control vía un integrador con señal de salida $v(k)$ y una ganancia integral K_I asociada. Con relación a la figura 5.1, podemos formular:

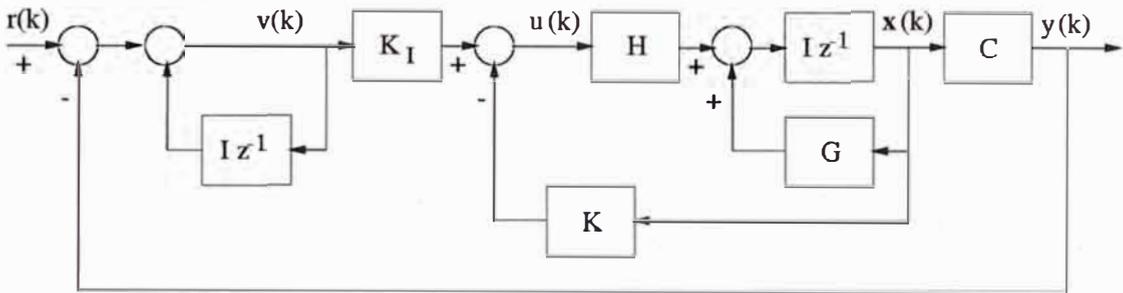


Figura 5.1: El controlador óptimo proporcional integral.

$$\mathbf{x}(k+1) = G\mathbf{x}(k) + H\mathbf{u}(k) \quad y(k) = C\mathbf{x}(k) \quad (5.8)$$

donde la señal de control $\mathbf{u}(k)$ es de la forma:

$$\mathbf{u}(k) = -K\mathbf{x}(k) + K_I v(k) \quad (5.9)$$

y la matriz de ganancia del controlador se expresa como:

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad \dots \quad K_n] \quad (5.10)$$

La ecuación del integrador es:

$$v(k) = v(k-1) + r(k) - y(k) \quad (5.11)$$

Para el tiempo $v(k+1)$ podemos deducir:

$$\begin{aligned} v(k+1) &= v(k) + r(k+1) - y(k+1) \\ &= v(k) + r(k+1) - C[G\mathbf{x}(k) + H\mathbf{u}(k)] \\ &= (1 - CHK_I)v(k) + (-CG + CHK)\mathbf{x}(k) + r(k+1) \end{aligned} \quad (5.12)$$

De las ecuaciones (5.8) y (5.9) podemos obtener:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= G\mathbf{x}(k) + H[-K\mathbf{x}(k) + K_I v(k)] \\ &= (G - HK)\mathbf{x}(k) + H K_I v(k) \end{aligned} \quad (5.13)$$

De las ecuaciones (5.12) y (5.13) se determina:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G - HK & HK_I \\ -CG + CHK & 1 - CHK_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ v(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(k+1) \quad (5.14)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ v(k) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

En el estado de equilibrio (cuando $k \rightarrow \infty$), las variables $\mathbf{x}(k)$, $u(k)$ y $v(k)$ toman los valores estacionarios $\mathbf{x}(\infty)$, $u(\infty)$ y $v(\infty)$, respectivamente. Luego, la ecuación (5.14) se convierte en:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G - HK & HK_I \\ -CG + CHK & 1 - CHK_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Podemos definir las siguientes variables incrementales:

$$\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(\infty) = \mathbf{x}_e(k) \quad (5.17)$$

$$v(k) - v(\infty) = v_e(k) \quad (5.18)$$

Si restamos la ecuación (5.16) de (5.14), y luego empleamos las ecuaciones (5.17) y (5.18) obtenemos:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e(k+1) \\ v_e(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G - HK & HK_I \\ -CG + CHK & 1 - CHK_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} G & 0 \\ -CG & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H \\ -CH \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -K & K_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.19)$$

La ecuación (5.19) puede re-escribirse como:

$$\xi(k+1) = \tilde{G}\xi(k) + \tilde{H}w(k) \quad w(k) = -\tilde{K}\xi(k) \quad (5.20)$$

donde:

$$\xi(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \quad \tilde{G}(k) = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -CG & I \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$\tilde{H}(k) = \begin{bmatrix} H \\ -CH \end{bmatrix} \quad \tilde{K}(k) = \begin{bmatrix} K & -K_I \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

La inclusión de un integrador en el sistema de control aumenta en uno el orden del sistema; es decir, mientras que el vector de estado $x(k)$ del sistema original posee dimensión n , el vector de estado $\xi(k)$ del sistema de control proporcional integral posee dimensión $(n + 1)$. Como consecuencia de este hecho, la función de costo para el sistema de control proporcional integral toma la forma:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\xi(k)^T \tilde{Q} \xi(k) + w^2(k) \tilde{R}] \quad (5.23)$$

En lugar de calcular K , ahora debemos de calcular una matriz \tilde{K} que minimice la función de costo dada en (5.23). La ecuación de Riccati y la ecuación de ganancia del controlador \tilde{K} resultan:

$$\tilde{P} = \tilde{Q} + \tilde{G}^T \tilde{P} \tilde{G} - \tilde{G}^T \tilde{P} \tilde{H} [\tilde{R} + \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{H}]^{-1} \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{G} \quad (5.24)$$

$$\tilde{K} = [\tilde{R} + \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{H}]^{-1} \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{G} \quad (5.25)$$

El observador óptimo de estados

Un observador que posee la siguiente ecuación de observación [2], [3]:

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \hat{G}\hat{\mathbf{x}}(k) + \hat{H}u(k) + K_o^T(k)[y(k) - \hat{C}\hat{\mathbf{x}}(k)] \quad (5.26)$$

puede ser empleado para calcular el vector de estado estimado $\hat{\mathbf{x}}(k)$. En la ecuación (5.26), la matriz de ganancia $K_o(k)$ se calcula de:

$$K_o(k) = [R_o + \hat{C}P_o(k)\hat{C}^T]^{-1} \hat{C}P_o(k)\hat{G}^T \quad (5.27)$$

donde $P_o(k)$ es una matriz simétrica definida positiva, solución única de la siguiente ecuación matricial discreta de Riccati:

$$P_o(k+1) = Q_o + \hat{G}P_o(k)\hat{G}^T - \hat{G}P_o(k)\hat{C}^T [R_o + \hat{C}P_o(k)\hat{C}^T]^{-1} \hat{C}P_o(k)\hat{G}^T \quad (5.28)$$

donde Q_o y R_o son matrices de covarianza definidas positivas y asociada a disturbios estocásticos que pueden afectar los estados y la salida del sistema.

5.2. Diseño y Simulación del Controlador Óptimo Cuadrático

Primero diseñaremos el controlador óptimo cuadrático proporcional-integral para el proceso con el 74 % de carga.

El programa `mora6.m` escrito en código Matlab [1], cuyo listado se muestra en el Anexo A, resuelve el problema del control óptimo de la temperatura de esterilización con el 74 % de carga en la autoclave. Este programa emplea la ley de control descrito en la sección anterior. No se emplea el observador de estados por tener el proceso una función de transferencia de primer orden, en el cual la salida de temperatura es medible. La señal de referencia se ha fijado en 12 °C, que es el salto de temperatura luego que termina la etapa de venteo (105 °C) y empieza la etapa de esterilización (117 °C). Al final del programa, se usan los correspondientes comandos de Matlab para graficar la curva de la temperatura controlada y la señal de control (posición de la válvula), mostradas en la figura 5.2, para el proceso con el 74 % de carga.

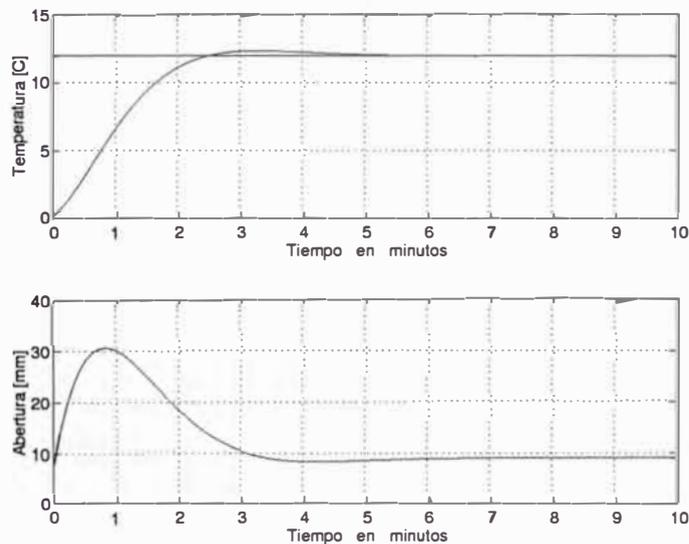


Figura 5.2: Control óptimo de la temperatura de esterilización, al 74 % de carga.

Al comparar la figura 4.7 con la figura 5.2 observamos en ésta última que la curva de la temperatura controlada presenta un ligero sobreimpulso de 117.4 °C a cambio de ganar un tiempo de establecimiento menor a cuatro minutos. En la práctica, este sobreimpulso se considera despreciable.

El programa `mora6.m` es auto-explicativo. Las matrices (parámetros en

este caso) de estado continuo A , B , C y DD son obtenidos facilmente a partir de la ecuación (3.1), con los correspondientes valores de K_p y τ . Luego se usa el respectivo comando de Matlab para obtener las matrices (parámetros en este caso) de estado discreto G , H , C y DD . El controlador a diseñar tiene el aporte integral, entonces hay que considerar en el sistema de control PI las matrices de estado $G1$ y $H1$ a partir de G , H y C , según las ecuaciones (5.21) y (5.22). Las matrices de ponderación del controlador PI (de segundo orden) son Q (de segundo orden) y R (de primer orden). Se plantea la solución de la ecuación de Riccati según (5.24), con cuarenta iteraciones. Esto sirve para calcular la ganancia proporcional K y la ganancia integral KI del controlador PI, según las ecuaciones (5.22) y (5.25). Luego se plantea el lazo de control según las ecuaciones (5.8) y (5.9) considerando las matrices (parámetros) G y H , y resolviendo primero la ecuación del integrador (5.11) con cien iteraciones.

A continuación diseñaremos el controlador óptimo cuadrático proporcional-integral para el proceso con el 25 % de carga.

El programa `mora7.m` escrito en código Matlab [1] y listado en el Anexo A, resuelve el problema del control óptimo de la temperatura de esterilización con el 25 % de carga en la autoclave. El programa emplea la ley de control y el observador de estados descritos en la sección anterior. En este caso se emplea el observador de estados, por tener el proceso una función de transferencia de segundo orden, y al no ser posible la medición directa de la segunda variable de estado (derivada de la variable temperatura) tiene que ser estimado. Al final del programa, se usan los correspondientes comandos de Matlab para graficar la curva de la temperatura controlada y la señal de control (posición de válvula) mostradas en la figura 5.3, para el proceso con el 25 % de carga.

Si comparamos la figura 4.10 con la figura 5.3 observamos en la última que, la curva de temperatura controlada presenta un ligero aumento del sobreimpulso (117.8 °C) a cambio de tener un tiempo de establecimiento menor (cinco minutos).

El programa `mora7.m` es también auto-explicativo. Ahora el proceso es de segundo orden, entonces A , B , C y DD son las matrices de estado continuo obtenidos con el correspondiente comando de Matlab, a partir de la ecuación (3.2) planteada en el capítulo III, y con los valores de $K_p = 2$ °C/mm, $\tau_1 = 5$ y $\tau_2 = 1.2$. Usando los respectivos comandos de Matlab se encuentra que el proceso

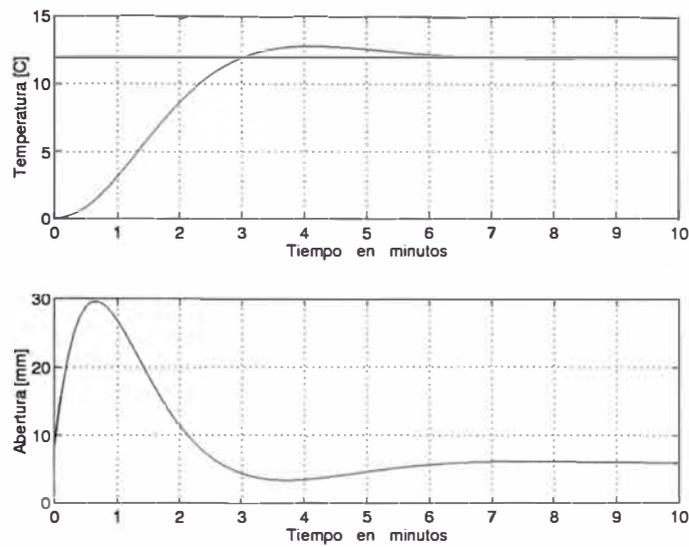


Figura 5.3: Control óptimo de la temperatura de esterilización, al 25 % de carga. es completamente controlable y completamente observable, condiciones necesarias para aplicar el control por realimentación de estados y para emplear el observador óptimo de estados. Ahora G , H , C y DD del proceso, así como G_1 y H_1 del sistema de control PI son matrices. Las matrices de ponderación del controlador PI (ahora de tercer orden) son Q (de tercer orden) y R (de primer orden), y las matrices de ponderación del observador de estados (de segundo orden) son Q_o (de segundo orden) y R_o (de primer orden). Se plantea la solución de la ecuación de Riccati para el controlador PI según (5.24), y la solución de la ecuación de Riccati para el observador según (5.28), ambos con cuarenta iteraciones. Esto sirve para calcular la ganancia proporcional K y la ganancia integral KI del controlador PI, así como la ganancia K_o del observador óptimo según la ecuación (5.27). Luego se plantea el lazo de control según las ecuaciones (5.8) y (5.9) considerando las matrices G y H , y resolviendo primero la ecuación del integrador (5.11) y la ecuación del observador óptimo (5.26), con cien iteraciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio ha desarrollado dos distintos procedimientos de diseño adecuados para controlar el proceso de esterilización en una autoclave de la planta de conservas de la empresa Austral Group S.A.A.

El primer procedimiento presentado en este estudio, diseña un sistema de control PID (proporcional-integral-derivativo), distinto y mejorado respecto al también sistema de control PID actual incorporado y centralizado en el controlador lógico programable (PLC) de las líneas de autoclaves.

El segundo procedimiento presentado en este estudio, diseña un sistema de control óptimo, el cual comprende un modelo lineal del proceso, una ley de control óptima cuadrática discreta y un observador de estados óptimo también discreto.

El proceso controlado es la autoclave durante la etapa de esterilización, que tiene el propósito de efectuar en el producto enlatado la esterilización comercial cumpliendo las estrictas normas nacionales e internacionales, para obtener una conserva enlatada bien esterilizada. La entrada del proceso es la posición de la válvula de control que regula el flujo de vapor que ingresa a la autoclave para llevar a cabo la esterilización. La señal de salida controlada es la temperatura de esterilización dentro de la autoclave. El modelo dinámico de este proceso fue encontrado en forma experimental, y presenta dos funciones de transferencia ligeramente distintos para cargas del 74 % y 25 %.

Los estudios de simulación desarrollados en los capítulos IV y V, han demostrado que las especificaciones de diseño se cumplen para ambos sistemas de control diseñados. En el sistema de control clásico (PID), se puede observar en las figuras 4.7 y 4.10 que, la curva de temperatura controlada presenta un tiempo de establecimiento menor a seis minutos, un mínimo sobreimpulso (aún en el caso crítico del 25 % de carga), y un error estacionario nulo; puede observarse también que la señal de control posee valores apropiados. El controlador PID diseñado muestra una evidente mejora respecto al actual controlador PID del proceso; esto

puede deducirse al comparar respectivamente las figuras 4.7 y 4.10 con las figuras 4.3 y 4.5, en éstas últimas las curvas de temperatura controlada presentan un tiempo de establecimiento mayor a diez minutos (y en el caso del 25 % de carga, la curva presenta una oscilación amortiguada preocupante).

En el sistema de control óptimo, se puede observar en las figuras 5.2 y 5.3 que, la curvas de temperatura controlada presentan un tiempo de establecimiento menor a cinco minutos, un mínimo sobreimpulso y un error estacionario nulo. En el caso crítico del proceso con el 25 % de carga, si comparamos la figura 4.10 con la figura 5.3; éste último presenta un pequeño sobreimpulso a cambio de ganar menos tiempo de establecimiento. En ambas figuras, también podemos observar que la señal de control posee un valor apropiado. En este diseño no fue necesario imponer restricciones a la señal de control.

El diseño del sistema de control clásico PID toma importancia en el más corto plazo, pues es posible implementarlo en tiempo real. Basta ingresar convenientemente los parámetros del controlador PID diseñado en el controlador de temperatura del proceso de esterilización (interno al controlador lógico programable). Para procesos con cargas de hasta el 50 % puede usarse los parámetros correspondientes al caso diseñado con el 25 % de carga, y para procesos con cargas de 50 a 100 % puede usarse los parámetros correspondientes al caso diseñado con el 74 % de carga.

El tiempo de muestreo empleado para el diseño del sistema de control óptimo es de 0.1 minuto. Este tiempo es suficientemente grande para poder implementar en tiempo real el sistema de control diseñado. En otras palabras, es suficientemente grande como para poder realizar todos los cálculos requeridos para calcular la ley de control, el observador de estados, y los parámetros del sistema. Por consiguiente, es posible implementar la configuración del sistema de control óptimo para controlar el proceso de esterilización en tiempo real.

El modelo del proceso desarrollado en el capítulo **III**, puede ser también usado en trabajos futuros para probar otras técnicas de control, tales como control predictivo, control robusto, control adaptivo, entre otras.

ANEXO A
LISTADO DE PROGRAMAS

LISTADO DE PROGRAMAS

Listado de los Programas en Matlab

Programa mora6.m

```
% mora6.m CONTROL ÓPTIMO PI DE LA AUTOCLAVE AL 74% DE CARGA
clear all

% PARÁMETROS Y MODELO DEL PROCESO DE ESTERILIZACIÓN
Kp = 1.33; tau = 4.95; n = 1;
A = [-1/tau]; B = [Kp/tau]; C = [1]; DD = [0];

% PROCESO DISCRETO
T = 0.1; % TIEMPO DE MUESTREO EN MINUTOS
[G,H,C,DD] = c2dm(A,B,C,DD,T,'zoh');

% ADICIONANDO ACCIÓN INTEGRAL
G1 = [G zeros(n,1); -C*G 1];
H1 = [H; -C*H];

% MATRICES DE PONDERACIÓN DEL CONTROLADOR KK (CONTROLADOR PI)
Q = 1*[1 0
      0 0.1];
R = 0.2*[1];

% ECUACIÓN DE RICATTI PARA EL CONTROLADOR PI
P = zeros(n+1,n+1);
for i = 1:40
    P = Q + G1' *P*G1 - G1' *P*H1*inv(R+H1' *P*H1)*H1' *P*G1;
end

% CÁLCULO DE LAS GANANCIAS K Y KI DEL CONTROLADOR PI
KK = inv(R+H1' *P*H1)*H1' *P*G1;
K = [KK(1)];
KI = -KK(n+1);
```

```

% LAZO DE CONTROL
x=0; % CONDICIÓN INICIAL
v=0; Y=0; U=0;
N = 100;
for k=1:N
    r(k)=12; % REFERENCIA
    v = v + r(k) - Y; % INTEGRADOR
    U = - K*x + KI*v; % LEY DE CONTROL
    x = G*x + H*U; % PROCESO
    Y = C*x; % SALIDA
    y(k) = Y; u(k) = U;
end

% GRÁFICOS
t = linspace(0,N*T,N);
subplot(2,1,1)
plot(t,y(1:N),t,r), grid
ylabel('Temperatura [C]')
xlabel('Tiempo en minutos')
subplot(2,1,2)
plot(t,u(1:N)), grid
xlabel('Tiempo en minutos')
ylabel('Abertura [mm]')
print -deps -f mora6c

```

Programa mora7.m

```

% mora7.m CONTROL ÓPTIMO PI DE LA AUTOCLAVE AL 25% DE CARGA
clear all

% PARÁMETROS Y MODELO DEL PROCESO DE ESTERILIZACIÓN
Kp=2; tau1=5; tau2=1.2; n=2;
num=[0 0 Kp];
den = [6 6.2 1];
[A,B,C,DD]=tf2ss(num,den);

% CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD DEL PROCESO
rmc = rank(ctrb(A,B)); % rmc = 2 => COMPLETAMENTE CONTROLABLE
rmo = rank(observ(A,C)); % rmo = 2 => COMPLETAMENTE OBSERVABLE

% PROCESO DISCRETO
T = 0.1; % TIEMPO DE MUESTREO EN MINUTOS
[G,H,C,DD] = c2dm(A,B,C,DD,T,'zoh');

```

```

% ADICIONANDO ACCIÓN INTEGRAL
G1 = [G zeros(n,1); -C*G 1];
H1 = [H; -C*H];

% MATRICES DE PONDERACIÓN DEL CONTROLADOR KK (CONTROLADOR PI)
Q = [1 0 0
     0 1 0
     0 0 1];
R = [1.5];

% MATRICES DE PONDERACIÓN DEL OBSERVADOR Ko
Qo = 0.3*[1 0
          0 1];
Ro = [1];

% ECUACIÓN DE RICATTI PARA EL CONTROLADOR PI
P = zeros(n+1,n+1);
for i = 1:40
    P = Q + G1' *P*G1 - G1' *P*H1*inv(R+H1' *P*H1)*H1' *P*G1;
end

% CÁLCULO DE LAS GANANCIAS K Y KI DEL CONTROLADOR PI
KK = inv(R+H1' *P*H1)*H1' *P*G1;
K = [KK(1) KK(2)];
KI = -KK(n+1);

% ECUACIÓN DE RICATTI PARA EL OBSERVADOR Ko
Po = zeros(n,n);
for i = 1:40
    Po = Qo + G*Po*G' - G*Po*C' *inv(Ro+C*Po*C' )*C*Po*G' ;
end

% CÁLCULO DE LA GANANCIA Ko DEL OBSERVADOR ÓPTIMO
Ko = inv(Ro+C*Po*C' )*C*Po*G' ;

% LAZO DE CONTROL
x=[0;0]; xe=[0;0]; % CONDICIONES INICIALES
v=0; Y=0; U=0;
N = 100;
for k=1:N
    r(k)=12; % REFERENCIA
    v = v + r(k) - Y; % INTEGRADOR
    xe = G*xe + H*U + Ko' *(Y-C*xe); % OBSERVADOR ÓPTIMO
    U = - K*xe + KI*v; % LEY DE CONTROL
    x = G*x + H*U; % PROCESO
    Y = C*x; % SALIDA
    y(k) = Y; u(k) = U;
end

```

```
% GRÁFICOS
t = linspace(0,N*T,N);
subplot(2,1,1)
plot(t,y(1:N),t,r), grid
ylabel('Temperatura [C]')
xlabel('Tiempo en minutos')
subplot(2,1,2)
plot(t,u(1:N)), grid
xlabel('Tiempo en minutos')
ylabel('Abertura [mm]')
print -deps -f mora7c
```

ANEXO B
PLANOS Y DIAGRAMAS

MARINA DE GUERRA DEL PERU

INGRESO

A PAITA

TANQUE APOYADO

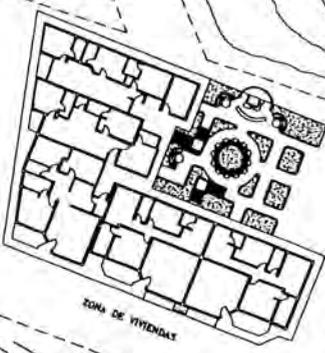
ZONA DE CISTERNAS



CASETA DE VIGILANCIA

LAVANDERIA Y VESTUARIOS

ZONA DE VESTIARIOS



OFICINAS ADMINISTRATIVAS

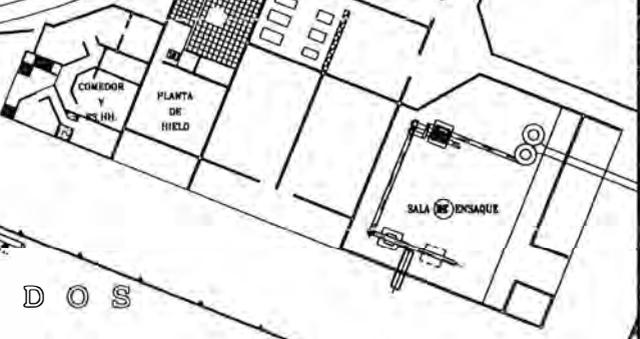
TDF

ZONA DE PRODUCTOS TERMINADOS

ZONA DE RESERVAS

PLANTA DE COCIDOS

DEL MAR S.A



PLANTA DE CRUDOS

PLANTA DE AGUA FRIA

BALANZA

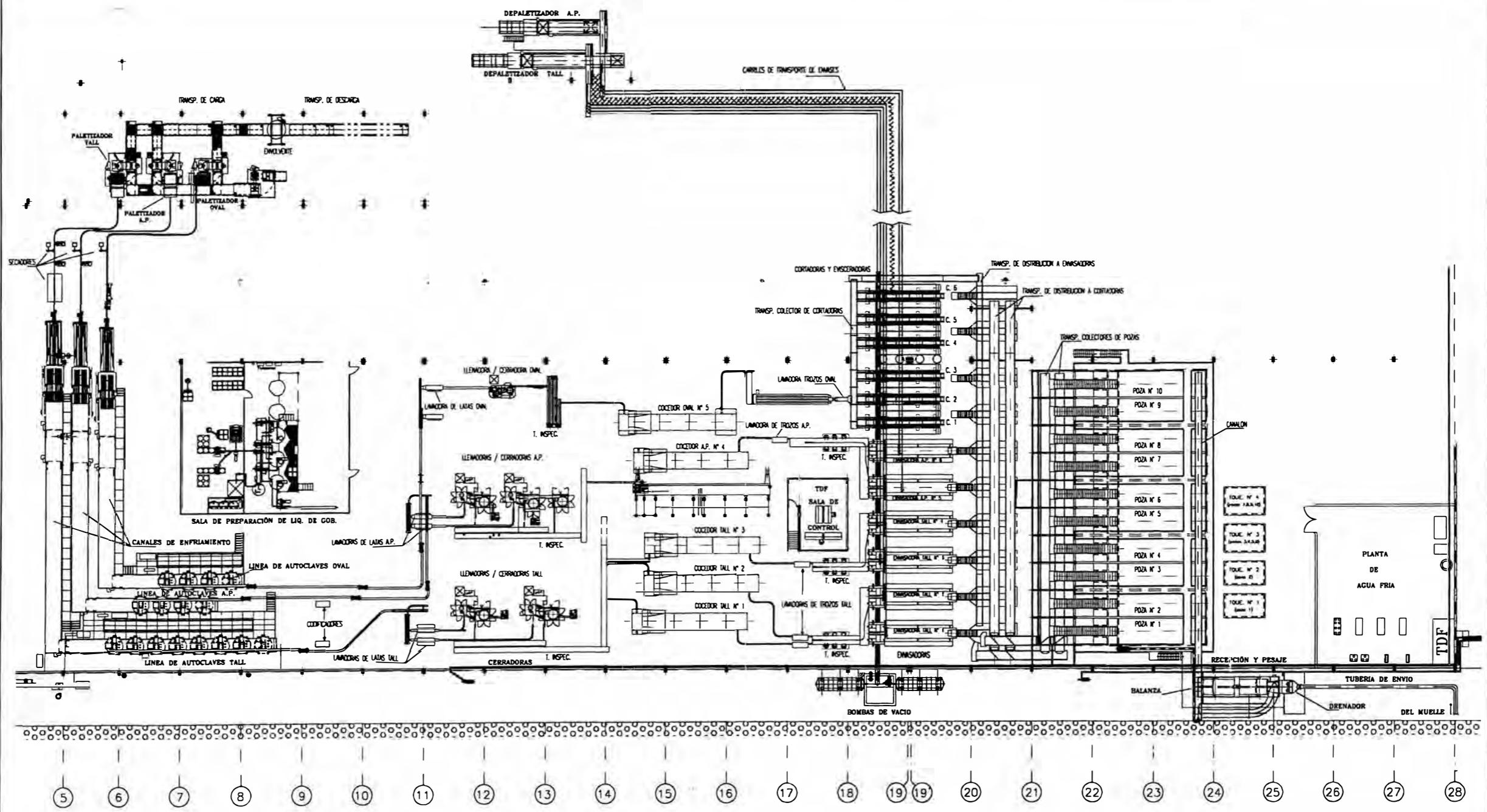
MUELLE

TRANSVAC

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

O C E A N O P A C I F I C O

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica		FECHA:
AUSTRAL GROUP S.A.A.		ESCALA:
UBICACION:	TITULO:	DISEÑO:
PAITA	DISTRIBUCION GENERAL DE LAS PLANTAS NAVE DE CONSERVAS	REVISADO:
CODIGO: Nav_Cons.dwg	PROYECTISTA:	APROBADO:
		PLANO N.º: 1.1



O C E A N O P A C I F I C O

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica		AUSTRAL GROUP S.A.A.		FECHA :
		UBICACION :	TITULO :	ESCALA :
PAITA		DISTRIBUCION GENERAL DE PLANTA DE CRUDOS		DIBUJO :
				REVISADO :
				APROBADO :
CODIGO Pta_Crud.dwg	PROVISION :	PLANO No. 1.2		

INGRESO

OCEANO PACIFICO

OFICINA DE ALMACEN

TALLER DE MANTENIMIENTO

OFICINAS ADMINISTRATIVAS

ZONA ETIQUETADO MANUAL

PLANTA

LIMPIEZA DE LATAS

ALMACEN "A"

ALMACEN "B"

ALMACEN "C"



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

AUSTRAL GROUP S.A.A.

FECHA :

UBICACION :

TITULO :

ESCALA :

PAITA

DISTRIBUCION GENERAL
DE PLANTA Y ALMACEN
NAVE ETIQUETADO

DIBUJO :

REVISADO :

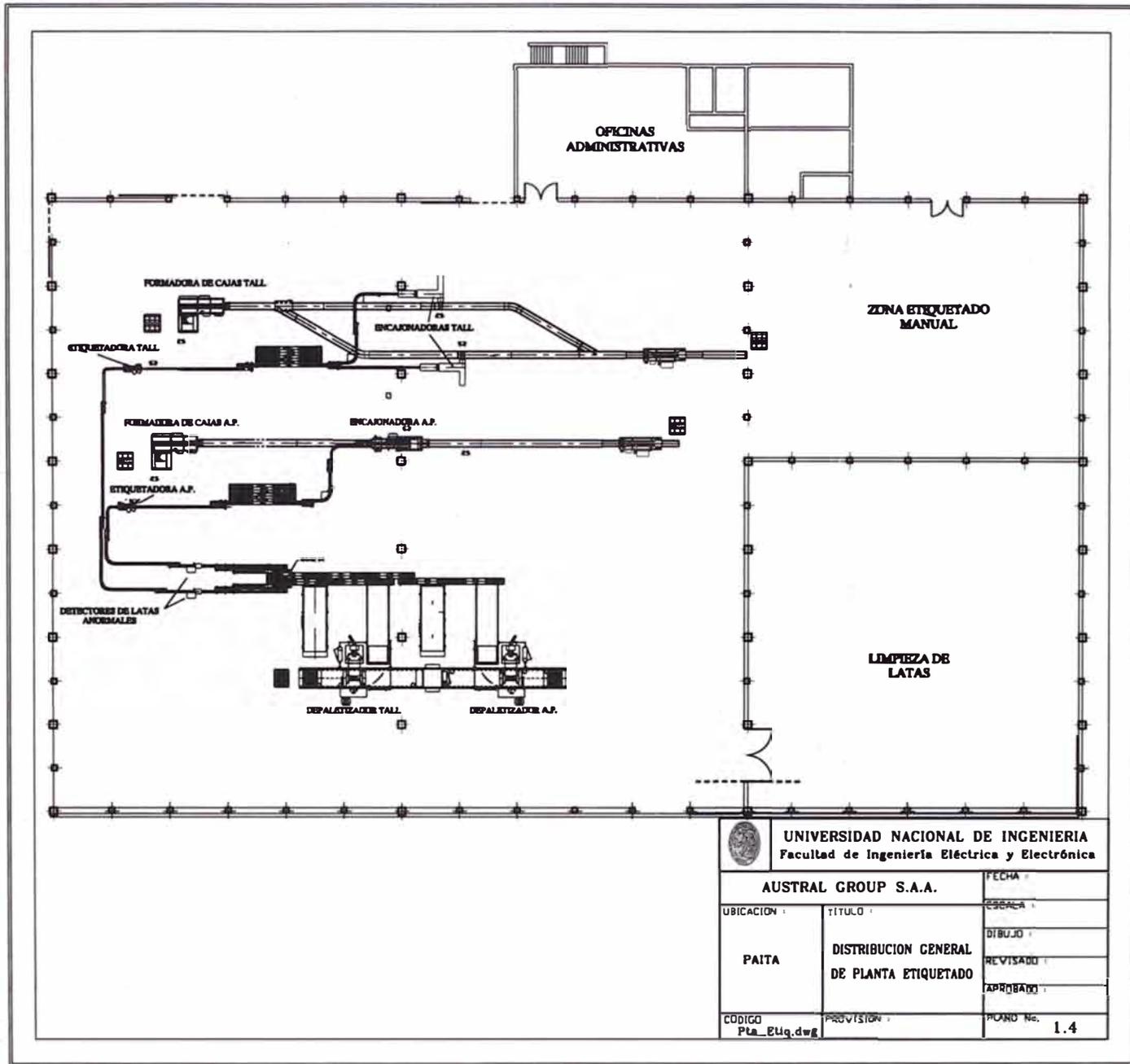
APROBADO :

CODIGO
Nav_Etiq.dwg

PROVISION :

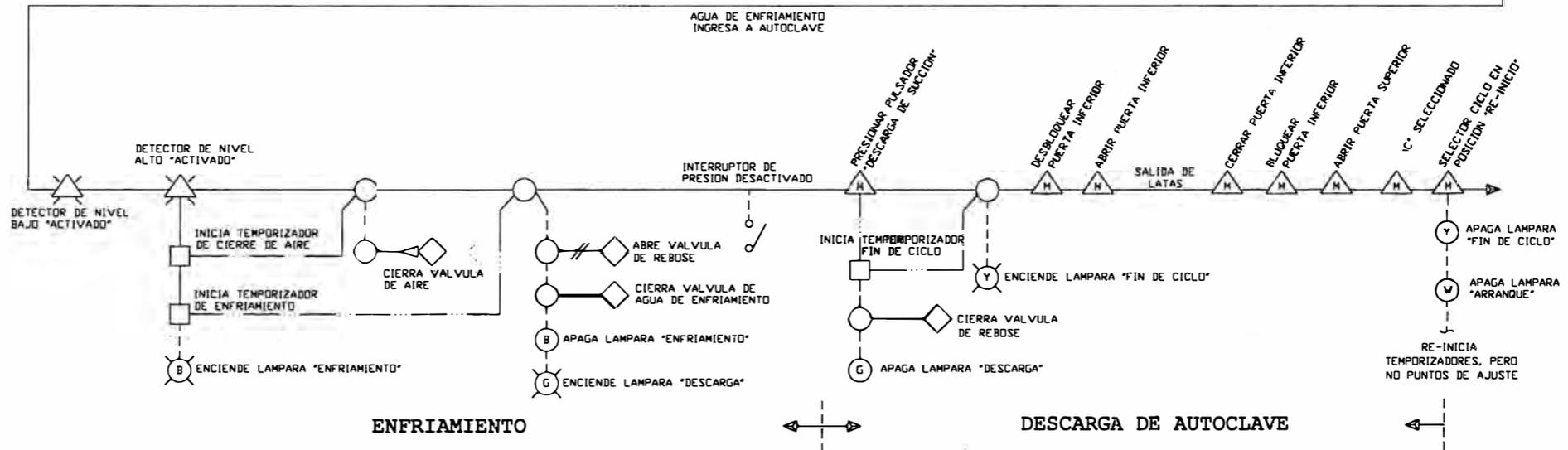
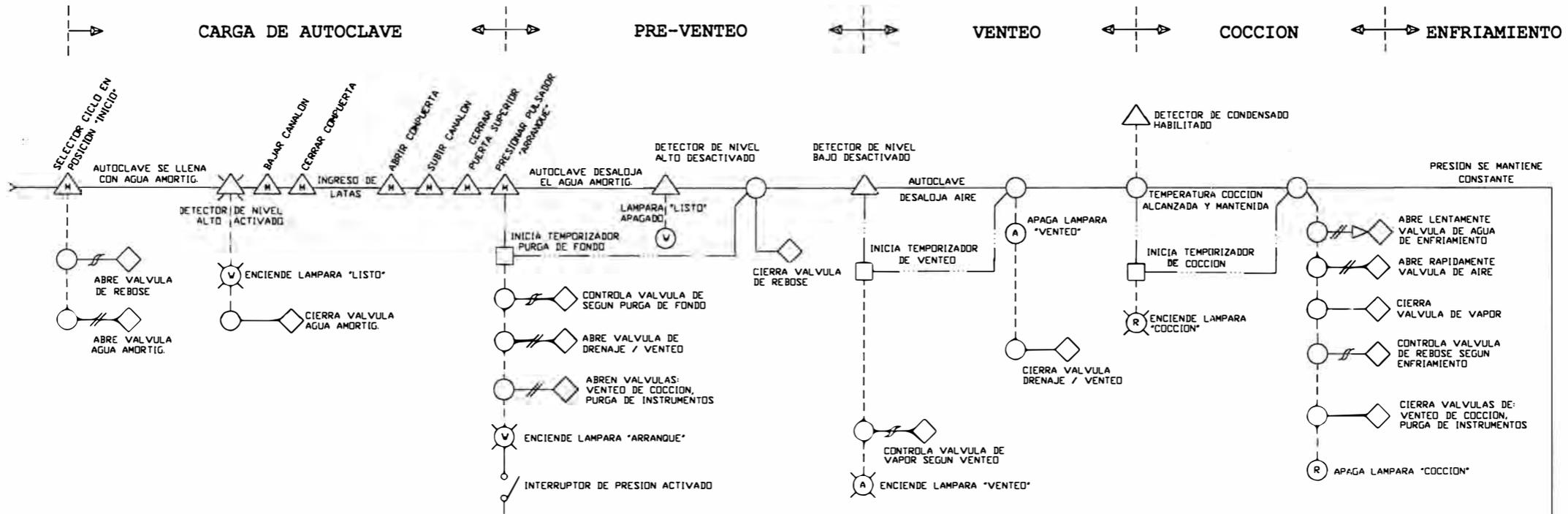
PLANO No.

1.3



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

AUSTRAL GROUP S.A.A.		FECHA :
UBICACION :	TITULO :	ESCALA :
PAITA	DISTRIBUCION GENERAL DE PLANTA ETIQUETADO	DIBUJO :
		REVISADO :
		APROBADO :
CODIGO Pta_Etq.dwg	PROVISION :	PLANO No. 1.4



LEYENDA

- △ ENTRADA AL PLC: SELECTOR O PULSADOR MANUAL
- △ ENTRADA AL PLC: ENTRADA DE DETECTOR
- SALIDA DEL PLC
- ⊙ LAMPARA: ⊙ ENCENDIDO ⊙ APAGADO
- R = ROJO G = VERDE
- B = AZUL W = BLANCO
- A = AMBAR Y = AMARILLO
- ⎓ RELE NEUMATICO 60 PSIG PARA VALVULA
- ⎓ RELE NEUMATICO 0 PSIG PARA VALVULA
- ⎓ RELE NEUMATICO 3 - 15 PSIG PARA VALVULA
- TEMPORIZADOR INTERNO DEL PLC
- LINEA DE TIEMPO
- - - - - SEÑAL ELECTRICA
- CONEXION INTERNA DEL PLC

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica		FECHA :
		AUSTRAL GROUP S.A.A.
UBICACION :	TITULO :	DIBUJO :
PAITA	DIAGRAMA DE EVENTOS DEL CICLO MODO DESCARGA VACIO EN AUTOCLAVE	REVISADO :
		APROBADO :
CODIGO Even_Aut.dwg	PROVISION :	PLANO No. 2.1

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MathWorks, Inc. *MATLAB Reference Guide*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
- [2] Ogata, Katsushito. *Designing Linear Control Systems with MATLAB*. Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- [3] Rojas-Moreno, Arturo. *Control Avanzado - Diseño y Aplicaciones en Tiempo Real*. Publicación Independiente, 2001.
- [4] Hermasa. *Manual Técnico de Instrucciones - Empacadora de Sardinias*. Technical Report. P.O. Box 1207 - 36200, Vigo, España.
- [5] UNI-PAK Corporation. *Manual de Operación – UPC-110 Semi-Automatic Empty Can Depalletizer*. Technical Report.
- [6] Hermasa. *Manual Técnico de Instrucciones - Cocedor Automático Tipo CDA*. Technical Report. P.O. Box 1207 - 36200, Vigo, España.
- [7] Burgess G.H.O., Cutting C.L., Lovern J.A., Waterman J.J. *El Pescado y las Industrias Derivadas de la Pesca*. Editorial Acribia Zaragoza (España), 1965.
- [8] Gavin A., Weddig M.L. *Alimentos Enlatados - Principios de Control del Proceso Térmico, Acidificación y Evaluación del Cierre de los Envases*. The Food Processors Institute, sixth edition, 1995.
- [9] Zilli and Bellini s.r.l. *Instructions Handbook - Vacuum Filler*. Technical Report A031. 43100 Parma (Italy) - Via Benedetta, 85/A.

- [10] Zilli and Bellini s.r.l. *Instructions Handbook - Aggraffatrice Automatica*. Technical Report A026. 43100 Parma (Italy) - Via Benedetta, 85/A.
- [11] Sommetrade S.L. *Catálogo - Llenadoras y Cerradoras de Latas*. Technical Report. Avda. Zugazarte 8, 2º. - Edif. Abra 4. - 48930 - Las Arenas - Vizcaya (España).
- [12] Murzan. *07 Volúmenes - Austral Inline Dilution System*. Technical Report. 2909 Langford Road 1-700, Norcross, Georgia 30071 – U.S.A.
- [13] Whallon Machinery, Incorporated. *Operation Manual - Can Palletizing System*. Technical Report. 205 N. Chicago Street - Box 429 - Royal Center, Indiana - U.S.A.
- [14] Liberty Industries, Inc. *Catálogo - Overhead Stretch Wrap System*. Technical Report. 8433 South Avenue, Building No.4, Youngstown, Ohio 44514 - U.S.A.
- [15] Malo Inc. *Operating Instructions Catalog of the Crateless Retort System*. Technical Report. P.O. Box 50183, Tulsa, OK 74150-0183.