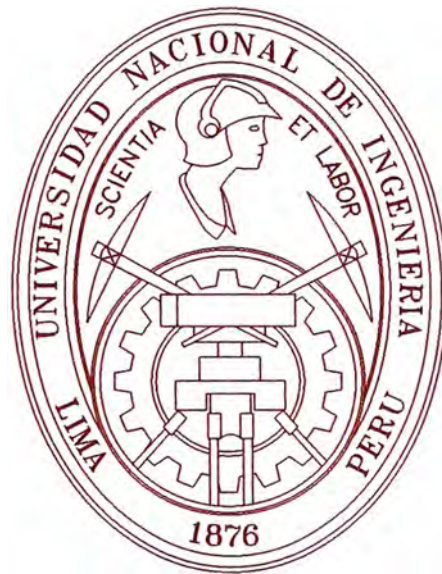


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**“COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN PASTEURIZADOR DE
CERVEZA TIPO TÚNEL”**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

ARTURO GERMÁN COLÁN COLÁN

PROMOCIÓN 1989-II

LIMA – PERU

- 2006 -

A **Dios**, que ilumina nuestros caminos.
A Berta y Germán, mis padres, le debo sus esfuerzos.
A Rosa, mi esposa, por su amor y comprensión.
A Efraín y Belén, mis hijos.
A Oscar, Violeta y César, mis hermanos, ejemplos a seguir.

TABLA DE CONTENIDOS

PRÓLOGO		1
CAPÍTULO 1		
1.0.	INTRODUCCIÓN.	3
1.1.	OBJETIVO DEL ESTUDIO.	4
1.2.	LIMITACIONES DEL ESTUDIO.	5
CAPÍTULO 2		
2.0.	CONCEPTOS BÁSICOS.	6
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN.	6
2.1.1.	MATERIAS PRIMAS.	6
2.1.2.	TRATAMIENTO DE AGUA.	6
2.1.3.	ALMACENAMIENTO.	7
2.1.4.	MOLIENDA.	7
2.1.5.	ENFRIAMIENTO DE MOSTO.	8
2.1.6.	FERMENTACIÓN Y MADURACIÓN.	8
2.1.7.	FILTRACIÓN.	8
2.1.8.	TANQUES DE CERVEZA TERMINADA.	9
2.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENVASADO.	9
2.2.1.	DEPALETIZADORA.	9
2.2.2.	DESENCAJONADORA.	9
2.2.3.	LAVADORA DE CAJAS.	10

2.2.4.	LAVADORA DE BOTELLAS.	10
2.2.5.	INSPECTOR DE BOTELLAS VACIAS.	10
2.2.6.	LLENADORA.	10
2.2.7.	INSPECTOR DE NIVEL.	11
2.2.8.	PASTEURIZADOR.	11
2.2.9.	ETIQUETADORA.	11
2.2.10.	CODIFICADOR DE TINTA.	12
2.2.11.	ENCAJONADORA.	12
2.2.12.	INSPETOR DE CAJAS LLENAS.	12
2.2.13.	PALETIZADORA.	12
2.3.	PASTEURIZACIÓN.	14
2.4.	PASTEURIZADOR TIPO TÚNEL.	14
2.4.1.	MALLAS TRANSPORTADORAS.	15
2.4.2.	SISTEMA DE VAPOR.	17
2.4.3.	SISTEMA DE AGUA.	17
2.4.4.	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.	21
2.4.4.1.	ENFRIADOR NH3 - <u>agua</u> .	21
2.4.4.2.	<u>TANQUE</u> DE AGUA HELADA.	21
2.4.4.3.	<u>BOMBA DE RECIRCULACIÓN</u> .	21
2.5.	UNIDADES DE PASTEURIZACIÓN.	22
2.6.	UNIDAD DE PASTEURIZACIÓN LETAL.	22
2.7.	TEMPERATURA MÁXIMA.	23
2.8.	PUNTO FRÍO EN BOTELLA.	23

2.9.	TEMPERATURA DE ROCÍO.	23
2.10.	TEMPERATURA DE SALIDA.	23
2.11.	CURVA DE PASTEURIZACIÓN.	23
2.12.	TIEMPO DE RECORRIDO DEL PASTEURIZADOR.	24
2.13.	BAJA PASTEURIZACIÓN.	24
2.14.	ALTA PASTEURIZACIÓN.	25

CAPÍTULO 3

3.0.	COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN PASTEURIZADOR TIPO TÚNEL.	26
3.1.	INACTIVACIÓN TÉRMICA DE MICROORGANISMOS.	26
3.2.	UNIDADES DE PASTEURIZACIÓN.	32
3.3.	EFFECTOS TÉRMICOS EN LOS COMPONENTES QUÍMICOS DE LA CERVEZA.	37
3.4.	TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA BOTELLA EN EL PASTEURIZADOR TIPO TÚNEL.	39
3.5.	MODELO TEÓRICO.	43

CAPÍTULO 4

4.0.	DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE CARGAS TÉRMICAS.	57
4.1.	VACÍO DE BOTELLAS EN EL PASTEURIZADOR.	57
4.1.1.	VACÍO EN LA ZONA DE CALENTAMIENTO.	57

4.1.2.	VACÍOS EN LA ZONA DE ENFRIAMIENTO.	61
4.2.	CONTROL DE UP.	62
4.2.1.	CÁLCULO DE LA TEMPERATURA PROMEDIO.	63
4.3.	OPERACIÓN NORMAL.	65
CAPÍTULO 5		
5.0.	ESTUDIO DE MEJORAS.	67
5.1.	CONDICIÓN ACTUAL DEL PASTEURIZADOR.	67
5.2.	OPORTUNIDADES DE MEJORA.	68
5.2.1.	MODIFICACIÓN DE CURVA DE PASTEURIZACIÓN.	68
5.2.2.	MODIFICAR EL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA AL TANQUE DE AGUA FRÍA.	69
5.2.2.1	<u>ANÁLISIS TÉRMICO</u>	69
	CONCLUSIONES.	74
	BIBLIOGRAFÍA	78
	ANEXOS	79

PRÓLOGO

Este trabajo fue realizado en el pasteurizador de cerveza de la Línea 1 de Envasado de la cervecería Backus y Johnston S.A.A. - planta Ate en el formato 620 ml.

En el capítulo 1 se realiza una introducción del concepto de pasteurización y los tipos de pasteurizaciones existentes, asimismo se describen los parámetros del proceso de pasteurización. Luego se analiza los objetivos del presente trabajo que es el de evaluar el comportamiento térmico de una botella de cerveza, es decir una relación de la temperatura de la cerveza en función de la temperatura de los tanques del pasteurizador, tiempo de recorrido, temperatura de ingreso al pasteurizador, etc. Por otro lado se analizan las limitaciones que tiene el estudio, que básicamente son las discrepancias existentes entre el proceso de pasteurización real y otro teórico, en el proceso teórico se asumen lluvias constantes a lo largo del tanque pero realmente hay separaciones entre bandeja y bandeja. También se asumen valores iguales del coeficiente de transferencia de calor en todos los tanques de calentamiento, lo cual no es exacto pero para efectos del trabajo en mención es valedero.

En el capítulo 2 se realiza una descripción del proceso de elaboración y envasado de cerveza acentuándose en el diagrama de flujo del proceso de Envasado. Luego se analiza con mayor detalle el proceso de pasteurización, describiéndose específicamente el pasteurizador San Martín y los sistemas que los conforman. Por último en este capítulo se explican algunos conceptos importantes en el proceso de pasteurización.

En el capítulo 3 se llega a obtener la fórmula que relaciona los parámetros de pasteurización, unidades de pasteurización, temperatura máxima, unidades letales, en función de la temperatura de las lluvias, tiempo de recorrido, temperatura de entrada y los coeficientes de transferencia de calor para los tanques de calentamiento y para los tanques de enfriamiento.

En el capítulo 4 se analizan las cargas térmicas del equipo a diferentes condiciones de operación: control de UP, vacío en la zona de enfriamiento, vacío en la zona de calentamiento, y operación normal.

En el capítulo 5 se analiza las condiciones actuales de operación del pasteurizador y se evalúan propuestas de mejora, para reducir el consumo de energía y mejorar las condiciones operativas del pasteurizador.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La pasteurización en el envasado de alimentos perecibles, es uno de los procesos más importante porque inactiva microorganismos que de otra forma podrían deteriorar rápidamente el producto. Este proceso fue descubierto por el sabio Francés Louis Pasteur en 1862. Con este descubrimiento productos como la leche, el vino, la cerveza y demás bebidas pudieron transportarse mayores distancias sin el riesgo de rápido deterioro. El proceso consiste en elevar la temperatura del producto por encima de los 60° C y luego enfriarlo a las condiciones ambientales.

Existen a saber dos tipos de pasteurizadores: pasteurizador flash y pasteurizador tipo túnel.

En el pasteurizador flash el producto es sometido al cambio de temperatura en línea antes de ser envasado. La ventaja de esta pasteurización es que el costo inicial del equipo es comparativamente menor, pero debido a que luego de ser calentado a más de 60° C es enfriado a condiciones de ser envasado aproximadamente de 1 a 2° C, requiere mayor consumo de energía. La otra desventaja adicional de este sistema es la necesidad de tener controlado cualquier riesgo de contaminación después del pasteurizado.

En el pasteurizador tipo túnel se pasteuriza el producto ya envasado.

En este sistema los productos envasados son sometidos a lluvias de agua gradualmente superiores, con lo que el producto llega a más de 60° C y luego es enfriado paulatinamente a aproximadamente 30° C.

Los parámetros de pasteurización se miden con una sonda colocada en una botella patrón, la sonda es ubicada en el “punto frío” de la botella que como su nombre lo dice, en el proceso de calentamiento y enfriamiento es el punto con mas baja temperatura dentro de la botella. La importancia de esta medición está en el hecho de medir el punto con más baja pasteurización en todo el envase.

Los parámetros de pasteurización son:

- a) Unidades de pasteurización (UP).
- b) Temperatura máxima.
- c) Unidades de pasteurización letales.
- d) Temperatura de salida.

1.1. Objetivo del estudio.

El objetivo del presente informe es diseñar un modelo teórico del comportamiento térmico a diferentes condiciones de operación del Pasteurizador de botellas de cerveza tipo túnel de la Línea 1 de envasado de la Unión de Cervecerías Peruanas Backus y Johnston SAA – Planta Ate y evaluar su balance térmico correspondiente.

Para el Diseño, se analiza el proceso de transferencia de calor en una botella de cerveza, luego se estima el coeficiente de transferencia de calor comparando una curva de pasteurización real, obtenida con la sonda de medición y la curva teórica. Se ajustan los valores de los coeficientes de transferencia de calor hasta que las dos

curvas se superpongan. A partir de estos coeficientes calculados podemos obtener la curva teórica de pasteurización en función de la temperatura de los tanques. Con lo que es factible realizar variaciones a la temperatura de los tanques y obtener diferentes condiciones de operación.

Asimismo se presenta una propuesta de ahorro energético en el referido pasteurizador.

1.2. Limitaciones del estudio.

El presente es un estudio teórico y guarda ciertas diferencias con respecto al proceso de pasteurización real básicamente por los siguientes motivos:

Variación de medidas del parque de botellas; todas las botellas son diferentes, no son exactamente iguales por lo que la superficie externa, la conductividad térmica, volumen, etc, y por consiguiente el coeficiente de transferencia de calor también presenta ciertas diferencias.

Variación existente en las lluvias del pasteurizador; el diseño teórico asume lluvias uniformes a lo largo de pasteurizador, lo cual presenta diferencias con la realidad.

En este estudio se utiliza un coeficiente de transferencia de calor para los tanques de calentamiento y otro para los tanques de enfriamiento, esto nos da una buena exactitud para la realización de los cálculos.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. Descripción del proceso de elaboración.

Brevemente se describe a continuación el proceso de preparación de la cerveza, con mayor énfasis en la línea de Envasado.

2.1.1 Materias Primas.

Se utiliza malta cervecera, la cual se prepara limpiando y seleccionando la cebada, que luego se hace germinar, secar y luego tostar y obtener la mejor malta cervecera.

El lúpulo es una flor femenina que le da aroma y ese sabor característico a la cerveza. Se importa el mejor lúpulo del mundo.

2.1.2 Tratamiento de agua.

Uno de los insumos más importante es el agua. El agua se extrae de pozos de más de 140 metros de profundidad y se almacena bajo las condiciones de higiene más adecuadas, el agua cervecera se obtiene con un proceso de electrodiálisis reversible, que con una combinación de sales minerales

garantizan el exclusivo sabor.

2.1.3 Almacenamiento.

Una vez que la malta ingresa a la cervecería, es sometida a un riguroso proceso de limpieza y selección antes de ser almacenada. La malta es almacenada en silos especialmente diseñados para garantizar y mantener permanentemente la calidad de esta importante materia prima. Como complemento, un sofisticado sistema de control de stocks permite conocer la cantidad de malta recepcionada, almacenada, etc.

2.1.4 Molienda

Desde los silos de almacenamiento se extrae la cantidad de malta que será utilizada para la elaboración de la cerveza.

Estos granos se acondicionan previamente para conseguir la humedad especificada para nuestro proceso y después se muelen en equipos de alta tecnología que garantizan una granulometría adecuada. La malta molida se almacena en tolvas de alimentación y está lista para ser usada.

Modernos sistemas de cocimiento con pailas de acero inoxidable permiten procesar la malta y el lúpulo para elaborar el mosto cervecero. La automatización de esta etapa del proceso nos permite seguirlo paso a paso y controlar el mínimo detalle. Una conexión vía módem hasta Alemania, con los fabricantes, nos permite seguridades adicionales ante improbables fallas en el módulo de control maestro.

2.1.5. Enfriamiento del Mosto.

El mosto elaborado en el Cocimiento se encuentra a una temperatura superior a los 95°C como consecuencia de haberlo sometido a temperaturas de ebullición constantemente controladas.

Ahora el mosto es enfriado hasta 8° C. para luego ser fermentado en tanques de acero inoxidable cilindro - cónicos.

En esta etapa del proceso interviene la levadura; ésta se dosifica al mosto frío y se encargará de transformar los azúcares del mosto en anhídrido carbónico y alcohol.

2.1.6. Fermentación y Maduración.

Los tanques cilindro cónicos permiten realizar el proceso de fermentación del mosto y la maduración de la cerveza en forma óptima.

Equipados con sistemas de refrigeración perfectamente aislados y dotados de sistemas de limpieza centralizados, estos tanques procesan en forma automatizada la cerveza, con la edificación cubriendo sólo la base de los tanques, ahorrando espacio, energía y tiempo.

Por su ubicación, configuración y diseño las operaciones manuales en estos tanques son mínimas con lo que la posibilidad de error humano queda reducida al mínimo.

2.1.7. Filtración

Luego de casi 21 días, la cerveza está prácticamente lista. Sólo falta el proceso de filtración. Con la filtración se eliminan todas las materias insolubles y se le da la brillantez característica de las cervezas. Este proceso particularmente importante es controlado y automatizado de modo tal, que el producto final mantiene siempre una calidad invariable.

Una vez más la tecnología ultra-moderna juega un rol fundamental en la Filtración de cerveza.

2.1.8. Tanques de Cerveza Terminada

Para garantizar el cumplimiento de todos los parámetros de calidad especificados por la Dirección Técnica de la organización, tenemos una última etapa: los tanques de cerveza terminada. En estos tanques se ejecutan los últimos controles, verificando el cumplimiento de las especificaciones.

2.2. Descripción del proceso de Envasado.

2.2.1. Depaletizadora.

Las botellas retornan del mercado en paletas de 72 cajas en el caso de formato 620 ml, armadas en 6 camas de 12 cajas cada una. Esta máquina retira las cajas de las paletas y las coloca en el transportador una por una. De allí el nombre de depaletizadora.

2.2.2. Desencajadora.

Este equipo es el encargado de retirar con un sistema de cabezales con accionamiento neumático las botellas de las cajas y colocarlos en el transportador de envases. Aquí el sistema de transporte que es un conjunto de cadenas de tablillas de acero inoxidable que se cargan de transportador las botellas en posición vertical a todos los equipos.

2.2.3. Lavadora de cajas.

La presentación de las cajas es muy importante para el proceso por lo que este equipo cuenta con un sistema de inyección de agua caliente que elimina toda la suciedad con la que viene del mercado.

2.2.4. Lavadora de botellas.

Está compuesta de 5 tanques con una determinada concentración de soda cáustica y a una temperatura cercana a los 80°C, cada tanque posee inyectores de soda que lavan la botella interna y externamente. Luego del lavado cáustico, se enjuaga las botellas exhaustivamente con lo que las botellas están habilitadas microbiológicamente para ser llenadas.

2.2.5. Inspector de botellas vacías.

Este es un equipo de alta tecnología, que detecta y rechaza toda botella con defecto como: pico roto, cuerpo extraño, líquido residual, sucio interno, etc.

Este equipo es calibrado previamente con botellas con defectos patrones, para que las botellas defectuosas sean rechazadas al 100%.

2.2.6. Llenadora.

La máquina llenadora es uno de los equipos más sofisticados de la línea de embotellamiento.

A velocidades de más de 750 botellas por minuto, cada una de las llenadoras nos entrega botellas con un contenido exacto de cerveza.

Menos de un segundo después de la llenadora, la máquina coronadora tapa la botella herméticamente.

2.2.7. Inspector de nivel.

Equipo de última generación que desecha botellas que tienen nivel de llenado fuera de norma, estos equipos se calibran de acuerdo a botellas previamente preparadas con bajo nivel estándar.

2.2.8. Pasteurizador.

La pasteurización de la cerveza es tal vez una de las operaciones más importantes en la etapa del embotellado.

Como un complemento más a todas las seguridades que se toman en el proceso, la pasteurización inhibirá la presencia de cualquier microorganismo en el producto.

Las botellas son sometidas a un calentamiento hasta los 60.5° C y luego un repentino enfriamiento para cumplir las condiciones de pasteurización requeridas.

2.2.9. Etiquetadora.

Dependiendo de las marcas y de las presentaciones las botellas pueden tener: etiquetas de cuerpo, contra etiquetas, estañolado, etiqueta de cuello, etc.

Estas son colocadas en la etiquetadora con una goma especial que asegura el pegado incluso cuando las botellas son sumergidas en agua helada.

2.2.10. Codificador de tinta.

En todas las botellas se imprime un código donde especifica la fecha de vencimiento, planta de producción, semana producida, etc.

2.2.11. Encajonadora.

Las botellas de cerveza son ahora colocadas en sus respectivas cajas, ya sean de plástico o de cartón, según el cliente y su punto de destino.

En forma automática y controlando que nunca falte ni una sola botella en sus respectivas cajas, la máquina encajonadora opera ininterrumpidamente.

2.2.12. Inspector de cajas llenas.

Aquí se inspecciona todas las cajas cuidando que no falten botellas en ellas, las cuales son rechazadas.

2.2.13. Paletizadora.

Finalmente todas las cajas son apiladas sobre plataformas de madera denominadas "pallets".

Estos "pallets" serán cargados a las unidades de transporte que llevarán la cerveza a los centros de distribución ubicados en todo el territorio nacional.

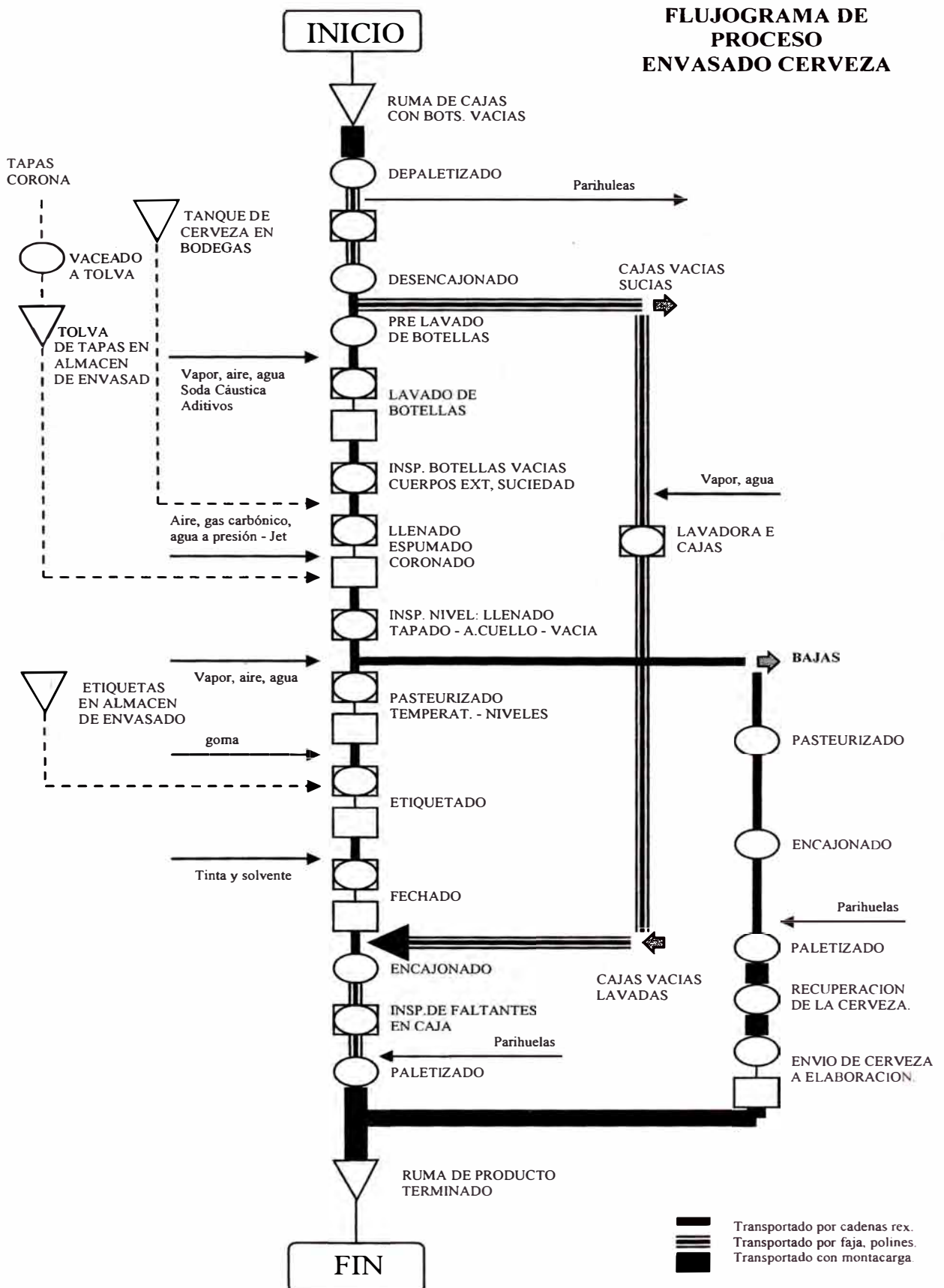


Fig. 2.1 Flujograma del proceso de Envasado de cerveza

2.3. Pasteurización.

El proceso de pasterización ha sido crucial para preparar alimentos y derivados conservados largo tiempo, saludables y con buenas cualidades organolépticas. Su descubrimiento se debe a Pasteur. En 1856 el vino francés frecuentemente se agriaba al envejecer con las consiguientes pérdidas. El industrial vinícola Bigo, padre de un alumno de Pasteur, acudió a él en solicitud de ayuda. Las observaciones microscópicas de Pasteur demostraron que, junto a las células normales de levadura, en el vino agrio, se encontraban otras células diferentes alargadas de levaduras que realizaban una fermentación láctica, en lugar de la alcohólica. Pasteur sugirió que en la fermentación del vino, tras la producción de alcohol y antes de que comenzase la de ácido láctico, se realizase un tratamiento térmico a 57 °C durante unos pocos minutos para matar las levaduras. El éxito hizo que se buscasen soluciones parecidas para la leche y otros productos, en cada caso con la temperatura y tiempo adecuados a los organismos a destruir mediante la pasteurización.

2.4. Pasteurizador tipo túnel.

Los pasteurizadores funcionan bajo el principio de transportar el envase a través de zonas cronometradas de calentamiento y enfriamiento, en los cuales se somete los envases a lluvias de agua. La temperatura del agua dentro de cada zona se eleva hasta alcanzar la temperatura deseada en el envase. Esta temperatura se puede alcanzar en la zona de prepasteurización o pasteurización, normalmente para condiciones de bajas unidades de pasteurización se alcanza saliendo del tanque de pasteurización. Es

importante que las lluvias de agua tengan un flujo constante para evitar “puntos fríos” en el pasteurizador.

El pasteurizador tipo túnel está compuesto por una cámara de dos pisos (inferior y superior), ver figura 2.2 dividida en zonas de: calentamiento, pre-pasteurización, pasteurización, y enfriamiento, además transportadores individuales de carga y descarga para cada uno de los pisos.

El sistema consta de 15 tanques repartidos en la siguiente forma: 5 tanques de calentamiento, 5 tanques de enfriamiento, 4 tanques de pasteurización y un tanque (el 15) que provee de un enfriamiento adicional a los envases.

2.4.1 Mallas transportadoras.

Estos pasteurizadores utilizan cuatro mallas localizadas dos en cada nivel, construidas en acero inoxidable y especialmente diseñadas para este tipo de aplicación, que garantiza un pasaje suave y sostenido de las botellas por el interior de la cámara evitando caída y/o rotura de las mismas.

Debido a su concepción estas mallas trabajan con la misma eficacia para cualquier tamaño de envase, sobretodo para envases de diámetro reducido.

El movimiento de las mallas está producido por cuatro moto reductores a engranajes de velocidad reducida con variación electrónica de velocidad, localizados 2 en cada nivel, situación que permite movimientos independientes entre niveles.

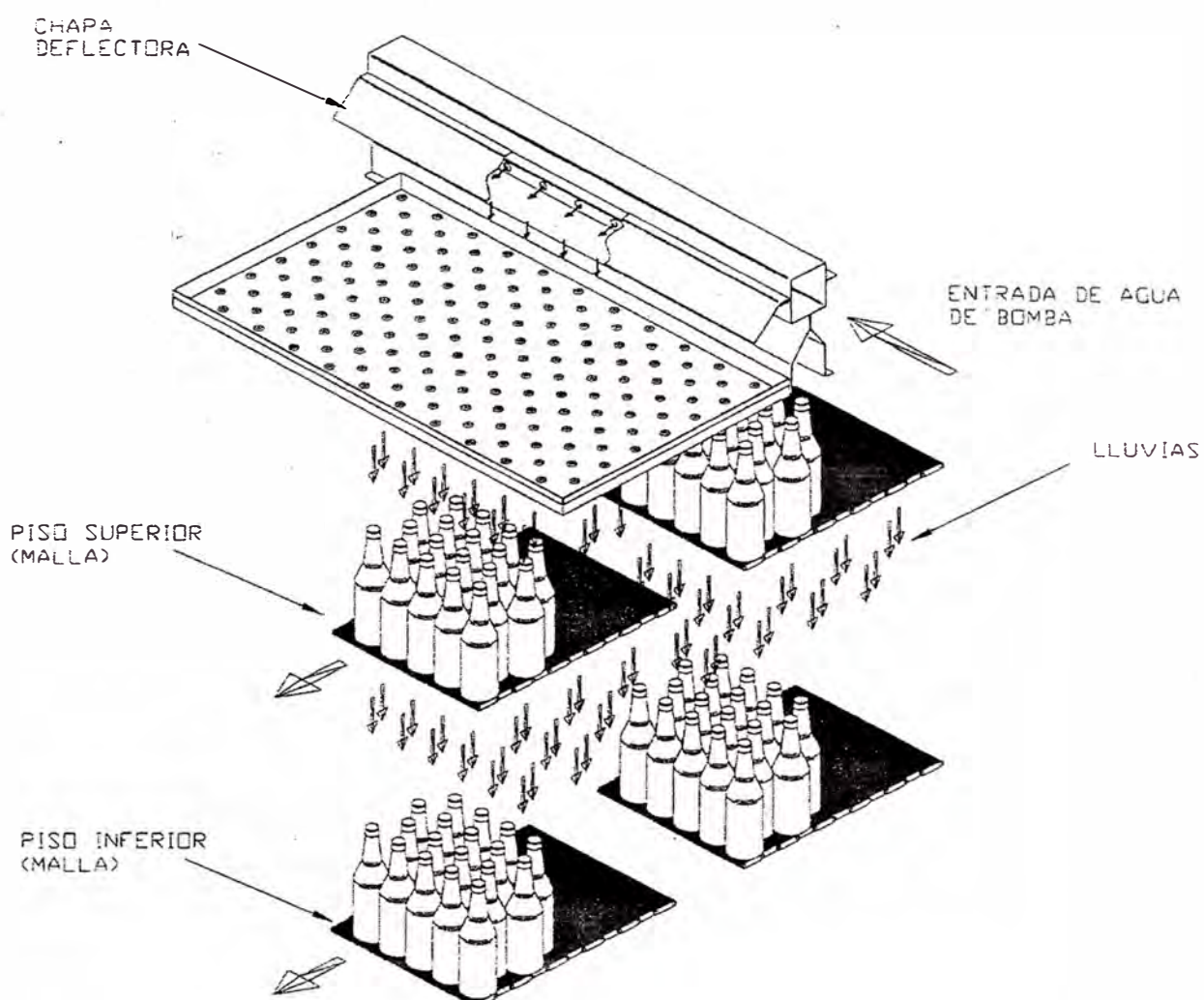


Fig. 2.2. Distribución de agua dentro del Pasteurizador

Una malla que circula debajo de las aperturas para retorno de agua a los tanques, retira cualquier residuo ó sólido que exista en el torrente, depositándolos en un carro apropiado y localizado en el extremo de descarga de la máquina.

2.4.2. Sistema de vapor.

La función del sistema de vapor es atemperar el agua a suministrar a las distintas etapas del proceso mediante un intercambiador de calor del tipo “casco y tubos”. Esta agua caliente está destinada a lograr y mantener las temperaturas prefijadas de cada una de estas cámaras.

El sistema está controlado automáticamente mediante un cuadro de válvulas de accionamiento electro neumático.

2.4.3. Sistema de agua.

El pasteurizador posee un sistema de recirculación regenerativa de agua entre las zonas de calentamiento (inicio del proceso) y las de enfriamiento (final del proceso) con el objeto de economizar agua y vapor. Esta economía se logra por la utilización del agua que recoge calorías al enfriar el producto (etapas del enfriamiento), utilizándola para calentar el nuevo producto que está ingresando al pasteurizador (etapas de calentamiento) y viceversa. El último tanque no es regenerativo y tiene la finalidad de reducir la temperatura de salida del producto a valores inferiores de 30°C.

Bajo estas condiciones los tanques de calentamiento se encuentran en equilibrio térmico no requiriendo ingreso de agua helada a cualquiera de los tanques cuando el pasteurizador se encuentra a plena capacidad, este balance se rompe cuando ocurre un “vacío en el flujo de botellas” lo que ocasiona que uno de los tanques se desequilibre, por ejemplo cuando el vacío se encuentra en la zona de calentamiento el número de botellas en la zona de enfriamiento

es superior por lo que va a producirse un calentamiento de los tanques, entonces es necesario un ingreso de agua helada a los tanques de calentamiento para compensar este desequilibrio. Cuando este vacío llega a la zona de enfriamiento, el número de botellas en la zona de enfriamiento será superior por lo que se producirá un enfriamiento de los tanques, entonces ocurrirá el proceso inverso en los tanques de enfriamiento ingresará agua caliente para compensar este desequilibrio.

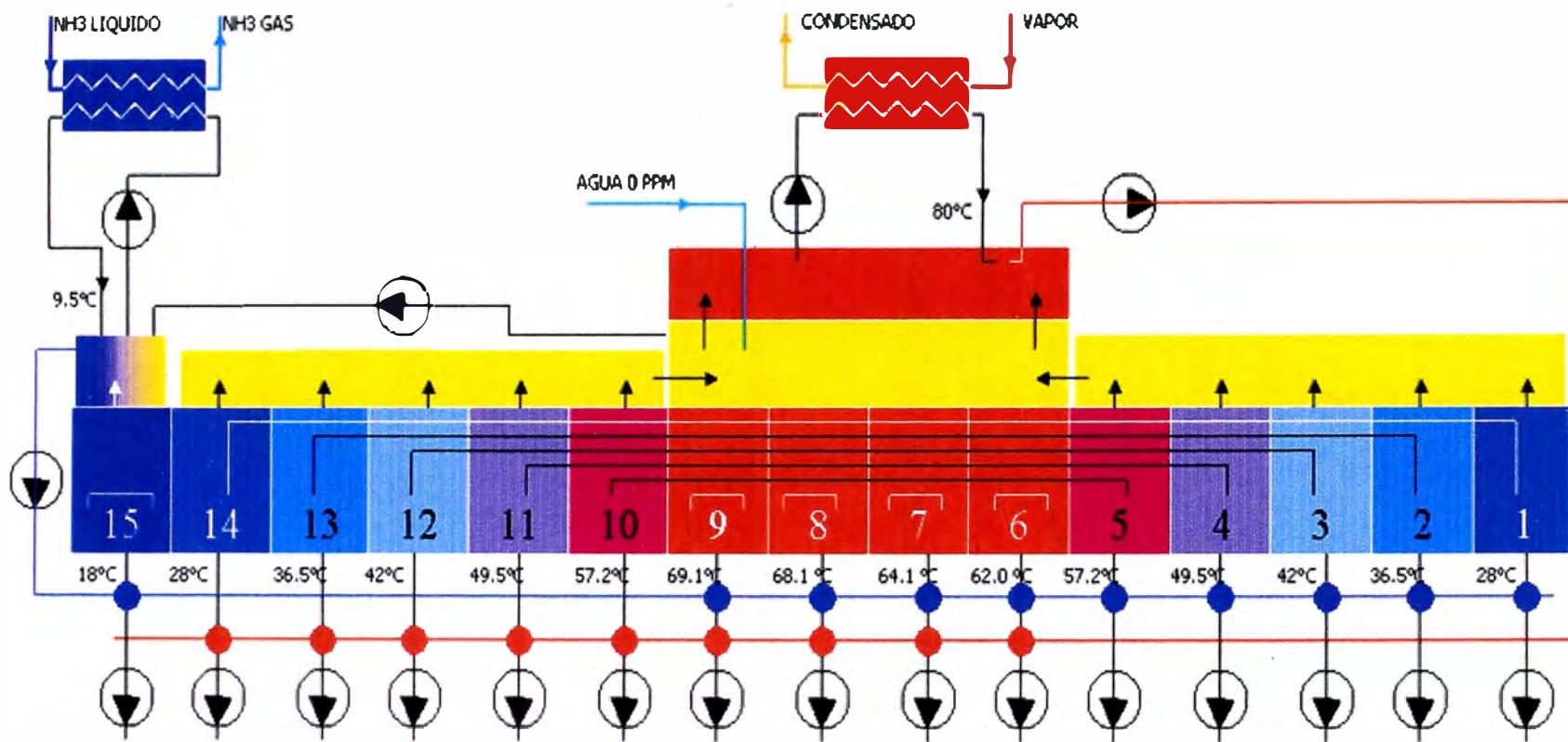
El sistema de agua funciona de la siguiente forma: cuando hay requerimiento de agua caliente ó fría a uno de los tanques, éste sube su nivel y rebosa hacia una canaleta donde el agua es conducida a un tanque llamado intermedio, éste tanque recolecta el agua de todos los tanques. El tanque intermedio tiene una función muy importante porque está enviando agua constantemente por rebose al tanque de agua caliente y asimismo, y para evitar el consumo de agua, envía agua al tanque de agua fría cuando éste tiene bajo nivel.

Desde el tanque de agua caliente se bombea permanentemente agua entre 75 – 80 °C. a todos los tanques los cuales cuentan con sistema de válvulas con accionamiento neumático en la succión de las bombas. Asimismo el tanque de agua caliente, recircula agua en el intercambiador de calor en forma constante. Para mantener una temperatura de 80°C en el tanque.

La mayoría de los pasteurizadores actuales son del tipo regenerativo por tanto presentan un bajo consumo de agua, excepto lo que se consume por arrastre de agua en las botellas y por evaporación, esto en condiciones normales sin vacíos, pero este consumo puede ser muy alto cuando se presentan “los

vacíos” en el pasteurizador básicamente debido a una parada en la línea, lo que provoca desabastecimiento de botellas a la máquina. Dependiendo de la capacidad del pasteurizador puede fluctuar entre 1 a 2 m³/hr en condiciones normales, pero también puede tener un consumo puntual dependiendo del tamaño de la máquina (y de los tanques) de 15 a 30 m³ (obviamente dependiendo del tiempo del vacío. El pasteurizador que se describió anteriormente tiene un sistema de refrigeración el cual provee de agua helada a los tanques cuando hay necesidad de enfriar los tanques de calentamiento. Esto elimina el consumo de agua durante el desbalance pero aumenta el consumo de energía eléctrica.

Fig. 2.3. Distribución del pasteurizador tipo túnel.



Resultados típicos:
 12.3 PU totales
 9.0 PU letales
 61.0°C máx temp.
 30°C temp salida.

2.4.4. Sistema de refrigeración.

El pasteurizador cuenta con un sistema de enfriamiento de agua compuesto por:

2.4.4.1. Enfriador NH₃-agua.

Este enfriador trabaja con NH₃ y controla la temperatura del agua de salida del enfriador manteniendo la presión del NH₃ en el enfriador en 4.0 psi y con una válvula controladora de nivel de NH₃ (ingreso de NH₃ líquido) a ½ nivel del tanque. Con estas condiciones se mantiene la temperatura del agua helada en 11°C.

2.4.4.2. Tanque de agua helada.

En este tanque se está recirculando permanentemente agua por el enfriador y asimismo se esta enviando agua helada a los tanques que requieran bajar su temperatura.

2.4.4.3. Bomba de recirculación de agua helada.

Esta bomba mantiene un flujo constante de agua entre el tanque de agua helada y el enfriador de NH₃.

2.5. Unidades de pasteurización (UP).

El grado de pasteurización se mide en unidades de pasteurización, que se define como una exposición de un minuto a una temperatura de 60°C. Esta es una medida letal del tratamiento térmico producido por la pasteurización.

Las unidades de pasteurización para el caso de la cerveza internacionalmente están entre los valores de 7.0 a 25.0.

Las condiciones de pasteurización se miden colocando una sonda especial en una botella, para que viaje a través del pasteurizador y mida las temperaturas a lo largo de la máquina.

Las unidades de pasteurización pueden expresarse por la fórmula sgte:

$$UP = 1.393^{(T-60)} \cdot t \quad 2.5.1$$

Donde:

- t : es el período de tiempo muestreado
- T : es la temperatura promedio del producto en ese lapso de tiempo (°C).
- UP : son las unidades de pasteurización ganadas en el lapso de tiempo t.

2.6. Unidad de pasteurización letal.

Son las unidades de pasteurización ganadas por el producto a temperaturas superiores a 60°C. Las unidades letales fluctúan entre 5 y 15. Para cumplir con esta condición la temperatura máxima debe superar los 60°C.

2.7. Temperatura máxima.

Es la mayor temperatura registrada por la sonda durante el recorrido de la botella patrón en el pasteurizador. Esto sucede en el momento que sale del último tanque de pasteurización.

2.8. Punto frío en botella.

Temperatura del producto sobre el eje central del recipiente localizado de 2 a 2.5 cm arriba de la parte inferior de la botella. Este punto, en el interior de la botella, se encuentra a más baja temperatura. Normalmente la sonda de temperatura esta ubicada en el punto frío para lograr medir el valor mas bajo de temperatura y poder asegurar que con los valores de UP, se logre inhibir microorganismos en la cerveza.

2.9. Temperatura de rocío.

Temperatura del agua que baña a las botellas.

2.10. Temperatura de salida.

Temperatura promedio de las botellas a la salida del pasteurizador. Este se puede medir de 2 formas: con el último valor de temperatura leído por la sonda en la botella patrón o abriendo una botella y midiendo directamente la temperatura del producto.

2.11. Curva de pasteurización.

La lectura de la temperatura del producto en el punto frío se realiza mediante una sonda colocada en una botella patrón a condiciones normales de trabajo. Esta sonda

lee valores puntuales de temperaturas cada 30 segundos los que al final del recorrido del pasteurizador forman una curva de Temperatura vs. Tiempo.

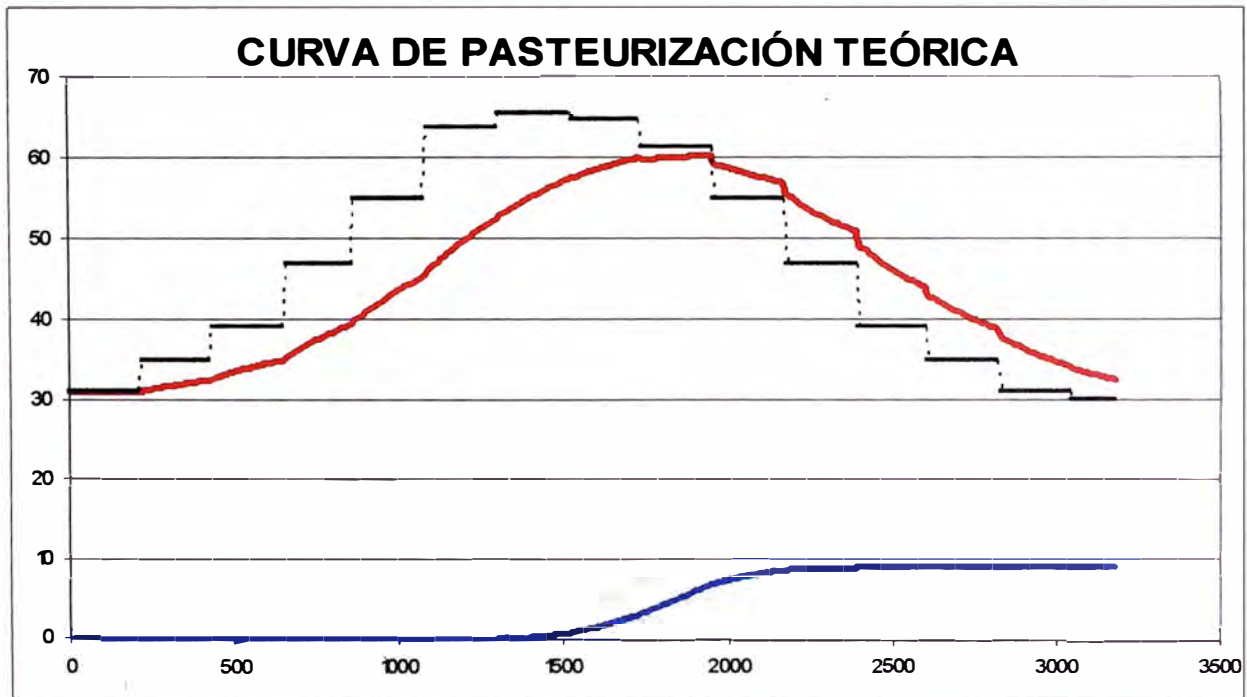


Fig. 2.4. Curva de pasteurización

2.12. Tiempo de recorrido del pasteurizador.

Es el tiempo que demora una botella desde que ingresa al pasteurizador hasta que sale, tomando en cuenta todo el tiempo que está en contacto con las lluvias del pasteurizador. Este tiempo se determina por las dimensiones del pasteurizador y por la capacidad que debe tener la línea, para este pasteurizador en estudio el tiempo de recorrido del piso superior es de 53 minutos y del inferior es de 55 minutos. Esto debido a que el piso inferior por diseño de máquina está sometido a lluvias “más frías” en la zona de calentamiento y pasteurización.

Cuando el tiempo de recorrido es muy reducido las botellas saldrá con mayor temperatura del pasteurizador, por el poco tiempo en la zona de enfriamiento.

2.13. Baja pasteurización.

Término utilizado para describir unos valores de unidades de pasteurización por debajo de la especificación. Tanto a las unidades de pasteurización ganadas como a la temperatura máxima alcanzada en el proceso. Como norma los valores de pasteurización no deben ser menores de 7 UP y 60.0 °C.

2.14. Alta pasteurización.

Término utilizado para describir unos valores de unidades de pasteurización por encima de la especificación. Para el caso de nuestra empresa se considera alta pasteurización todos los valores por encima de 12 UP y 61.0° C.

CAPÍTULO 3

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN PASTEURIZADOR TIPO TÚNEL

3.1. Inactivación térmica de microorganismos.

Si una población homogénea de microorganismos es sometida a calor con temperatura constante suficientemente alta para ser letal, por lo general el número de sobrevivientes se reducirá con el tiempo de la siguiente forma:

$$N_t = N_0 \cdot 10^{-t/D} \quad 3.1.1$$

Donde:

N_t = Número de sobrevivientes en el tiempo t

N_0 = Número inicial de organismos vivos.

T = Tiempo (min)

D = Tiempo de reducción decimal.

Los valores de N son usualmente expresados como concentraciones, por ejemplo el número de microorganismos por ml, número de microorganismos por botella ó lata.

El valor de D representa el tiempo necesario a una temperatura dada que inactiva el 90% de la población.

Los microbiólogos a menudo aplican la ecuación 3.1.1 entre dos puntos 1 y 2, en el diagrama de $\log N$ vs t , de donde el valor de D se calcula:

$$D = (t_2 - t_1) / (\log N_1 - \log N_2) \quad 3.1.2$$

Hay numerosos reportes sobre desviaciones de la inactivación lineal presentada en la figura 3.1.1. Por razones prácticas sin embargo, en el cálculo de la pasteurización, se asume que la inactivación de microorganismos sigue un simple orden lineal. Las desviaciones de la linealidad son normalmente muy pequeñas.

El calor por un cierto tiempo (t) a la temperatura T resultará en el siguiente factor de inactivación:

$$\text{Factor de inactivación} = N_0/N_t = 10^{t/D} \quad 3.1.3$$

Conocido el valor de D, el tiempo necesario para alcanzar un cierto grado de inactivación puede ser fácilmente calculado.

Si una suspensión de bacteria de ácido láctico a una concentración original de 10000 células por ml y un valor de D de 2 min. a una temperatura constante de 60°C. Ocurrirá lo siguiente. El calor por 2 min. reducirá el número de células vivas al 90%, de 10000 a 1000 células por ml. Después de intervalos adicionales de 2 min., este tratamiento calorífico resultará en 99%, 99.9%, 99.99%, etc. de reducción en el número de células vivas.

En el mencionado ejemplo el número de células vivas después de 16 min. de tratamiento a 60°C habrá sido reducido a 1 célula en 10 litros. Si esta cerveza es envasada en una botella de 0.5 litros, estadísticamente 1 de cada 20 botellas, contendrá un organismo vivo lo cual da una seguridad al 95%. Si la cerveza es

envasada en barriles de 100 litros, cada barril debe contener 10 células vivas. Después de una pasteurización de 20 minutos el número de células vivas será de 1 por 1000 litros. El número de botellas estériles es ahora de 99.95%, mientras que el porcentaje de barriles libres es 90%. Un mayor incremento del tiempo de pasteurización incrementará la seguridad. Teóricamente una seguridad del 100% nunca puede ser lograda.

Desde un punto de vista práctico el trabajo está en identificar el valor de D de los más resistentes organismos que provocan el deterioro de la cerveza.

Incrementar la temperatura de calentamiento significa que los porcentajes de inactivación se incrementarán y el valor de D se reducirá.

La dependencia de temperatura es usualmente descrita por el valor de Z como se muestra en la ecuación 3.1.4.

$$Z = (T_2 - T_1) / (\log D_1 - \log D_2) \quad 3.1.4$$

Dentro de un intervalo de temperatura estudiado, el valor de D a una temperatura específica debe ser calculado del tipo de diagrama mostrado en la figura 3.1.2. Las extrapolaciones podrían evitarse por las siguientes razones. Primero en el lado de baja temperatura, hay una temperatura límite por debajo en la cual no ocurre ninguna inactivación térmica. Segundo mientras el valor de Z es directamente relacionado con la temperatura, la correspondiente fórmula comúnmente usada por las reacciones de primer orden usa valores de temperatura recíproca.

$$\mathbf{R.Ln10/Ea = (1/T1-1/T2)/(logD1-logD2) \quad 3.1.5}$$

Donde:

R = Constante universal de los gases

Ea = Energía de activación

Para facilitar la comparación con la ecuación 3.1.4, la constante de velocidad de la reacción química k en la ecuación 3.1.5 ha sido reemplazada por D de acuerdo a la relación:

$$\mathbf{D = Ln10/k \quad 3.1.6}$$

La importancia de especificar el rango de temperatura relevante a los procesos en cuestión está más ilustrado por la ecuación 3.1.7, que es una combinación de las ecuaciones 3.1.4 y 3.1.5.

$$\mathbf{Z.E_a = R.Ln10.T_1.T_2 \quad 3.1.7}$$

Para facilitar los cálculos una de estas temperaturas puede ser mantenida constante como una temperatura de referencia. Obsérvese que la elección de esta temperatura influenciará el valor de Z.Ea . En el caso de la pasteurización de cerveza, 60°C es generalmente usada como la temperatura de referencia.

Mientras la otra temperatura varía dentro de rangos limitados, el producto $Z \cdot E_a$ será bastante constante. Si por ejemplo el valor de Z es considerado constante dentro de un rango de temperatura de 55°C - 75°C , habrá una variación en E_a de aproximadamente 3%.

Debería también tenerse en cuenta que la diferencia en el valor de Z entre los diferentes microorganismos significa un cambio en la resistencia relativa con la temperatura como se muestra en la figura debajo 3.1.3.

Así, debajo de la temperatura T , el organismo A es el más resistente mientras en la temperatura sobre T el organismo B es el más resistente.

De la literatura los valores de D y Z para diferentes organismos residuales de cerveza han sido resumidos en la tabla 3.1.1. La tabla también contiene alguna información sobre levadura de cerveza.

La tabla 3.1.1 muestra que existe una gran variación en la resistencia al calor de diferentes microorganismos.

En adición a esto los valores de D y Z son también influenciados por el medio en que los microorganismos son sometidos a calor. En el caso de la cerveza los sgtes parámetros son importantes:

- PH.
- Dióxido de Carbono contenido en la cerveza.
- Contenido de alcohol.
- Extracto residual.
- Amargo.

La resistencia de microorganismos generalmente se reduce con los siguientes parámetros:

- Reducción del dióxido de carbono.
- Reducción del PH.
- Alto contenido de alcohol.
- Aumento en el amargo de la cerveza.

Un alto extracto de la cerveza puede tener efecto de protección también facilita el crecimiento de organismos vivos.

Tabla 3.1 Valores de D60 y Z de algunos organismos residuales de cerveza y algunas cepas de levadura de cerveza

Organismo	D60 (min)	Z (°C)
Levadura de cerveza	0,00038*)	4
Levadura libre	0,0060*)	4
S. globosus	0,076*)	5
S. cerevisiae var. Ellipsoideus	0,00095*)	4
Lactobacilius sp	0,024*	3
Pediococcus sp	0,0073*)	4
Lactobacillus heterofermentative		
Cepa A	2,1	7,5
Cepa B	3,8	8,3
Cepa D	3,5	7,6
Cepa E	4,3	4,4
Cepa F	3,9	5,8
Cepa G	4,4	8

Cepa H	0,068	6,9
Cepa I	0,062	6,6
Cepa J	0,15	8,6
Cepa K	0,042	5,2
Hansenula anomala	0,0039	4,6
Pichia membranaefaciens	0,00025	2,8
S. carlsbergensis	0,004	4,4
Lactobacillus frigidus	0,44	15
Pediococcus acidilactici	0,87	11
L. delbrueckii	0,091	12
Saccharomyces		
cepa XY66 (levadura libre)		
Células vegetales en cerveza	0,24	8
Células vegetales en AFB	0,53	5,5
Esporas en cerveza	2,9	6,9
Esporas en AFB.	23	4,1
*) Calculado de los valores D50 y D55 respectivamente		

3.2. Unidades de pasteurización.

Puesto que los experimentos de inactivación son más laboriosos, las recomendaciones generales son verificar la cantidad de calor necesario para pasteurizar la cerveza. Tales recomendaciones especifican un número de unidades de pasteurización. (UP).

Una unidad de pasteurización (UP) corresponde a un minuto de calor a 60°C.

Con una temperatura de referencia de 60°C, el valor de la ecuación 3.1.4 se convierte en:

$$Z = (T-60)/(\log D_{60} - \log D_T) \quad 3.2.1$$

La relación entre D_{60} y el valor de D a la temperatura T , D_T , puede ser expresada como un número dimensional, el indicador letal LT , es como sigue:

$$LT = D_{60}/D_T \quad 3.2.2$$

El indicador letal es considerado como el tiempo (en minutos) a 60°C que produce la misma inactivación en un minuto de temperatura a T °C (ver tabla 3.1.2). Podría agregarse que el indicador letal es también igual al factor correspondiente de las constantes de las reacciones de primer orden, así:

$$LT = k_T/k_{60}. \quad 3.2.3$$

Introduciendo el indicador letal a la fórmula del valor de Z se obtiene los sgtes valores:

$$LT = 10^{(T-60)/Z} \quad 3.2.4$$

Basado en un trabajo Del Vecchio (1951) un valor de $Z = 6.94$ °C es generalmente aceptado.

Por lo que la ecuación 3.1.10 se convierte en:

$$LT = 1.393^{(T-60)} \quad 3.2.5$$

En la tabla 3.1.2 los valores de LT entre 50.0°C y 79.9°C son dados en intervalos de 0.1°C.

Algunas aproximaciones útiles son como sigue:

$$UP_{total} = \sum_0^t L_T \Delta t T \quad 3.2.6$$

$$= \int_0^t 1.393^{(T-60)} .dT \quad 3.2.7$$

Tabla 3.2 Valores del indicador letal (LT) entre 50.0°C y 79.9°C basado en la ecuación $LT = 1.393^{(T-60)}$

T °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
50	0.036	0.038	0.039	0.040	0.042	0.043	0.044	0.046	0.047	0.049
51	0.051	0.052	0.054	0.056	0.058	0.060	0.062	0.064	0.066	0.068
52	0.071	0.073	0.075	0.078	0.081	0.083	0.086	0.089	0.092	0.095
53	0.098	0.102	0.105	0.109	0.112	0.116	0.120	0.124	0.128	0.132
54	0.137	0.141	0.146	0.151	0.156	0.162	0.167	0.173	0.178	0.184
55	0.191	0.197	0.204	0.211	0.218	0.225	0.233	0.240	0.249	0.257

56	0.266	0.275	0.284	0.293	0.303	0.313	0.324	0.335	0.346	0.358
57	0.370	0.382	0.395	0.409	0.422	0.437	0.451	0.467	0.482	0.499
58	0.515	0.533	0.551	0.569	0.588	0.608	0.629	0.650	0.672	0.694
59	0.718	0.742	0.767	0.793	0.820	0.847	0.876	0.905	0.936	0.967
60	1.000	1.034	1.069	1.105	1.142	1.180	1.220	1.261	1.304	1.348
61	1.393	1.440	1.488	1.539	1.590	1.644	1.700	1.757	1.816	1.877
62	1.940	2.006	2.073	2.143	2.216	2.290	2.367	2.447	2.530	2.615
63	2.703	2.794	2.888	2.986	3.086	3.190	3.298	3.409	3.524	3.643
64	3.765	3.892	4.023	4.159	4.299	4.444	4.594	4.749	4.909	5.074
65	5.245	5.422	5.605	5.793	5.989	6.191	6.399	6.615	6.838	70.68
66	7.306	7.553	7.807	8.070	8.342	8.623	8.914	9.215	9.525	9.846
67	10.18	10.52	10.88	11.24	11.62	12.01	12.42	12.84	13.27	13.72
68	14.18	14.66	15.15	15.66	16.19	16.73	17.30	17.88	18.48	19.11
69	19.75	20.42	21.10	21.81	22.55	23.31	24.10	24.91	25.75	26.61
70	27.51	28.44	29.40	30.39	31.41	32.47	33.56	34.70	35.87	37.07
71	38.32	39.61	40.95	42.33	43.76	45.23	46.76	48.33	49.96	51.64
72	53.38	55.18	57.04	58.97	60.95	63.01	65.13	67.33	69.59	71.94
73	74.36	76.87	79.46	82.14	84.91	87.77	90.73	93.78	96.94	100.2
74	103.6	107.1	110.7	114.4	118.3	122.3	126.4	130.6	135.0	139.6
75	144.3	149.2	154.2	159.4	164.8	170.3	176.1	182.0	188.1	194.5
76	201.0	207.8	214.8	222.0	229.5	237.2	245.2	253.5	262.0	270.9
77	280.0	289.4	299.2	309.3	319.7	330.5	341.6	353.1	365.0	377.3
78	390.0	403.2	416.8	430.8	445.3	460.4	475.9	491.9	508.5	525.6
79	543.3	561.7	580.6	600.1	620.4	641.3	662.9	685.2	708.3	723.2

Si el cálculo de UP es basado en temperaturas basadas en grados Fahrenheit, 1.393 en la ecuación debería ser reemplazada por 1.202 y el valor de la temperatura a 60°C por 140.

Si son usadas temperaturas promedio de 1 minuto de intervalo, la ecuación se convierte:

$$\mathbf{UP_{total}} = \sum_0^t \mathbf{1.393^{(T-60)}} \quad \mathbf{3.2.8}$$

El número total de unidades de pasteurización (UP) para un proceso de pasteurización es también referido como el Valor letal total del proceso.

Cuando el valor de UP para un cierto proceso ha sido calculado, es recomendado que el resultado no se aproxime con más de 2 dígitos debido a la relativamente larga variación en los valores de Z para diferentes microorganismos.

Al dividirse las UP totales con los valores de D60 de los mas resistentes tipo de microorganismos nos da el valor del factor de inactivación logarítmica para estos organismos (es válido el valor de Z 6.94°C proporcionado).

Debido a las variedades de organismos contaminantes y las diferencias entre los valores de Z para diferentes microorganismos, es importante realizar pruebas para determinar los niveles de unidades de pasteurización requeridos. En la práctica es recomendable mantener márgenes de seguridad aceptables.

En la siguiente tabla se muestra valores recomendados internacionalmente de UP para diferentes productos:

Tabla 3.3 Valores de UP típicos para diferentes productos cerveceros

Producto	Mínimo UP	Máximo UP
Pilsner y cerveza lager	15	25
Ales y scout	20	35
Cervezas con bajo alcohol	40	60
Cerveza no alcoholicas	80	120
Limonadas	300	500
Jugos de frutas	3000	5000

Los valores de limonadas y jugos de frutas son incluidas en la tabla 3.3 sólo para efectos comparativos.

3.3. Efectos térmicos en los componentes químicos de la cerveza.

Así como los microorganismos, las reacciones químicas son también influenciadas por los parámetros tiempo y temperatura. En la esterilización de alimentos se han hecho tentativas para calcular el “cook values” cuando comparan diferentes procesos. La dependencia de la temperatura es entonces usualmente dada por el valor de Z. La aproximación que el indicador de reacción es duplicada por un incremento de 10°C en la temperatura resulta en el siguiente valor de Z:

$$\begin{aligned}
 Z &= (T_2 - T_1) / (\log k_2 - \log k_1) \\
 &= 10 / \log 2 = 33.2^\circ\text{C} \quad 3.3.1
 \end{aligned}$$

Modelos similares han sido sugeridos para calcular el efecto del calor en la pasteurización de cerveza. Dymond (1992), usa una unidad de impacto térmico (TIU) para calcular cambios químicos.

$$\text{TIU} = \int_0^t 2^{(T-20)/10} .dt \quad 3.3.2$$

Donde la temperatura de referencia es 20°C.

Alternativamente, la siguiente es la forma más general que puede ser usada para calcular el efecto del calor inducido en los cambios químicos.

$$\text{TIU} = \int_0^t 10^{(T-tr)/Z} .dt \quad 3.3.3$$

La temperatura de referencia T_r , debería preferiblemente seleccionada en el rango de temperaturas máximas del proceso. La misma temperatura de referencia, 60°C, como es usada en el cálculo de las unidades de pasteurización, por ejemplo podría ser usada. Basada en la literatura un valor de Z de 25°C puede ser sugerido.

Observe que las integrales anteriores, como las integrales de las UP, sólo dan valores relativos del efecto del tratamiento térmico. Sería necesario usar la constante de reacción para calcular el grado de cambio (cf el factor de inactivación para microorganismos). Una corrección para las posibles desviaciones de los valores de Z puede ser requerida.

Puesto que la pasteurización de cerveza se realiza a temperaturas más bajas que las usadas en los alimentos, los efectos del calor normalmente no son detectables, particularmente si la cerveza tiene bajo contenido de oxígeno.

Si el contenido inicial de oxígeno es alto o la combinación de tiempos de procesos y temperaturas es excesivamente mayor a la normal, el olor y el sabor puede ser afectado.

3.4. Transferencia de calor en una botella en el pasteurizador tipo túnel.

Durante el proceso del túnel de pasteurización, el calentamiento y el enfriamiento del producto toma lugar en las paredes del envase. La transferencia de calor del producto es una combinación de transferencia de calor por convección del agua de los spray al envase, conducción a través de las paredes del envase y convección libre del envase al producto. La convección natural es el resultado de la diferencia de densidades creado por el gradiente de temperatura dentro del producto. La fig 4.2.11 muestra un modelo típico de estas corrientes.

Para nuestros procesos de pasteurización se define el punto frío a 15 mm de la base de la botella.

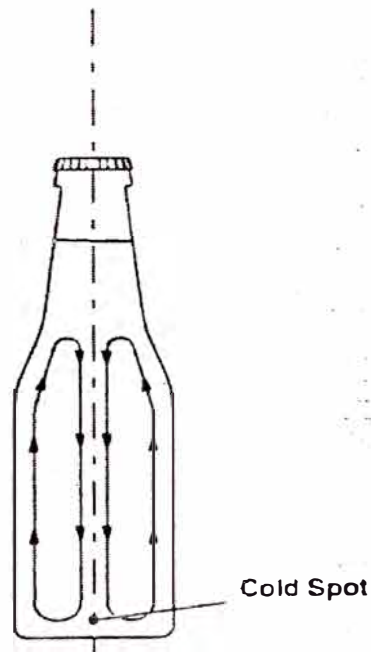


Fig. 3.1. Ubicación del punto frío en una botella.

El coeficiente de transferencia de calor puede ser calculado como sigue:

$$1/U = 1/\alpha_{ext} + \delta/\lambda + 1/\alpha_{int} \quad 3.4.1$$

Donde:

α_{ext} = coeficiente de transferencia externa de calor.

δ = espesor de la pared del envase.

λ = Conductividad térmica del material del envase.

α_{int} = Coeficiente de transferencia interna de calor.

El valor del coeficiente de transferencia externa de calor se asume de la curva siguiente, donde se ingresa como dato el flujo de agua de las duchas del pasteurizador en litros/seg.m².

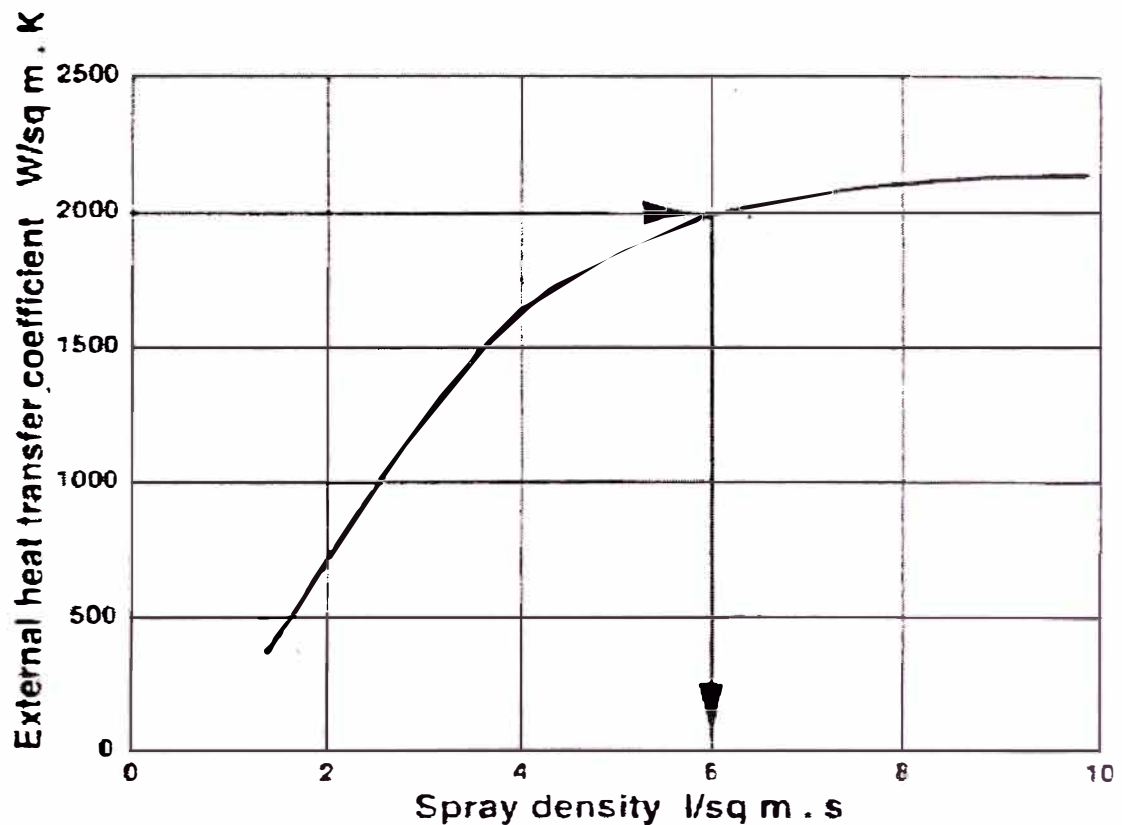


Fig.3.2. Coeficiente de transferencia externa de calor.

El coeficiente de transferencia interna de calor es calculado usando la ecuación para establecer el número de Grashof:

$$Gr = l^3 \cdot g \cdot \Delta T \cdot \beta \cdot \rho^2 / \eta^2 \quad 3.4.2$$

Donde:

- l = Altura de la superficie de transferencia de calor.
- g = aceleración de la gravedad.

- ΔT = Diferencia de temperatura entre la pared y el fluido.
- β = coeficiente de expansión del fluido.
- ρ = densidad del fluido.
- η = Viscosidad dinámica del fluido.

El número de Prandtl es calculado usando la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Pr} = \eta \cdot C_p / \lambda \quad \mathbf{3.4.3}$$

Donde:

- C_p = Calor específico del fluido (para una gas este valor es a presión constante)
- η = Viscosidad dinámica del fluido.
- λ = Conductividad térmica del fluido.

El Número de Prandtl es una medida de las propiedades físicas del fluido.

Luego calculamos el Número de Nusselt que está definido por la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Nu} = 0.59 \cdot Gr^{0.25} \cdot Pr^{0.25} \quad \mathbf{3.4.4}$$

De donde para calcular el valor de α_{int} utilizamos el valor de Nu de la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Nu} = \alpha \cdot d / \lambda \quad \mathbf{3.4.5}$$

Donde:

d = diámetro del envase.

De esta fórmula obtenemos el valor de α_{int} (coeficiente de transferencia de calor interna).

Para nuestro caso el cálculo sería así:

Datos:

α_{ext} = 2000 W/m².K

Flujo de agua en las duchas del pasteurizador 6 lt/m² seg

δ = 2.5 mm.

λ = 0.9 W/m.K

l = 0.27

g = 9.81 m/seg²

ΔT = 15°K.

β = 0.52 10⁻³ K⁻¹

ρ = 1007 kg/m³

η = 1.8126 10⁻³ kg/m s

0.47 10⁻³ kg/m s

De donde α_{int} = 1980 W/m² K

El valor de U calculado es de 209 W/m² K

3.5. Modelo teórico.

En las botellas dentro del pasteurizador se puede considerar el proceso de transferencia de calor alrededor del envase como indica la ecuación siguiente:

$$V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T = U \cdot A \cdot (T_w - T_p) \Delta t \quad 3.5.1$$

Donde:

V = Volumen del producto en el envase.

C_p = Calor específico de la cerveza.

A = Área de la superficie del envase sujeto a transferencia de calor.

El lado izquierdo de la ecuación define el requerimiento de calor del producto mientras que la mano derecha define la transferencia de calor a través de la pared del envase.

La ecuación puede ser reagrupada de la siguiente forma:

$$\Delta T / \Delta t = U \cdot A \cdot (T_w - T_p) / (V \cdot \rho \cdot C_p) \quad 3.5.2$$

Por tanto se reemplaza:

$$K_p = U \cdot A / (V \cdot \rho \cdot C_p) \quad 3.5.3$$

Usando los valores conocidos de U, A, V, ρ y C_p tenemos el siguiente valor:

$$K_p = 0.0032877 \quad 3.5.4$$

Relacionando las ecuaciones 3.5.2 y 3.5.3 tendríamos la siguiente ecuación:

$$\Delta T/\Delta t = K_p (T_w - T_p) \quad 3.5.5$$

K_p es por tanto el coeficiente total de transferencia de calor para un envase determinado que incorpora el coeficiente de transferencia de calor, el área de transferencia de calor, así como el volumen, densidad y el calor específico del producto.

Cuando la ecuación es usada dentro de una gran variación de temperaturas, como ocurre en un túnel de pasteurización, las pruebas demuestran que los valores de K_p en el calentamiento y en el enfriamiento deben ser diferentes.

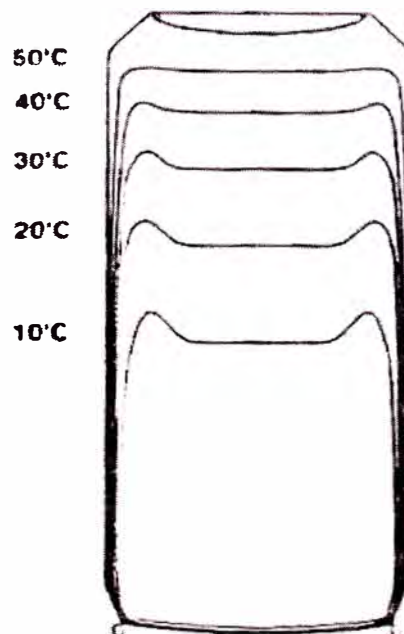


Fig. 3.3. Isotermas generadas dentro de una lata de cerveza sometida a un baño de agua a 66°C durante 2 minutos.

Para alcanzar el efecto de pasteurización correcto, todos los cálculos de diseño deben proveer un mínimo tratamiento térmico al punto frío. La exactitud para localizar y sensor la temperatura del “punto frío” es crucial para establecer un correcto programa de tratamiento térmico.

Una vez ubicado el punto frío, todas las condiciones de pasteurización se refieren a este punto.

En la práctica se cuenta con una sonda ubicada en una botella patrón la cual registra la temperatura del producto a lo largo del pasteurizador. Las unidades de pasteurización, tiempo de recorrido, temperatura máxima, está referidas a esta botella patrón pero se considera la misma para todo el producto dentro del pasteurizador.

Por lo anterior se puede concluir lo siguiente:

“El incremento de temperatura de las botellas en un tanque en un momento determinado es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la botella al inicio del tanque y la temperatura de las lluvias, adicionalmente es proporcional al tiempo transcurrido en el tanque”.

Se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta T = k\Delta T_1\Delta t \quad 3.5.6$$

Asumiendo que el tiempo se inicia cuando la botella ingresan al tanque.

$$T - T_i = k(T_{lluvia} - T_i)t \quad 3.5.7$$

Donde:

T : Temperatura de la botella

T_i : Temperatura de la botella al ingreso del tanque.

T_{lluvia} : Temperatura de las lluvias de agua.

K : Constante de transferencia de calor.

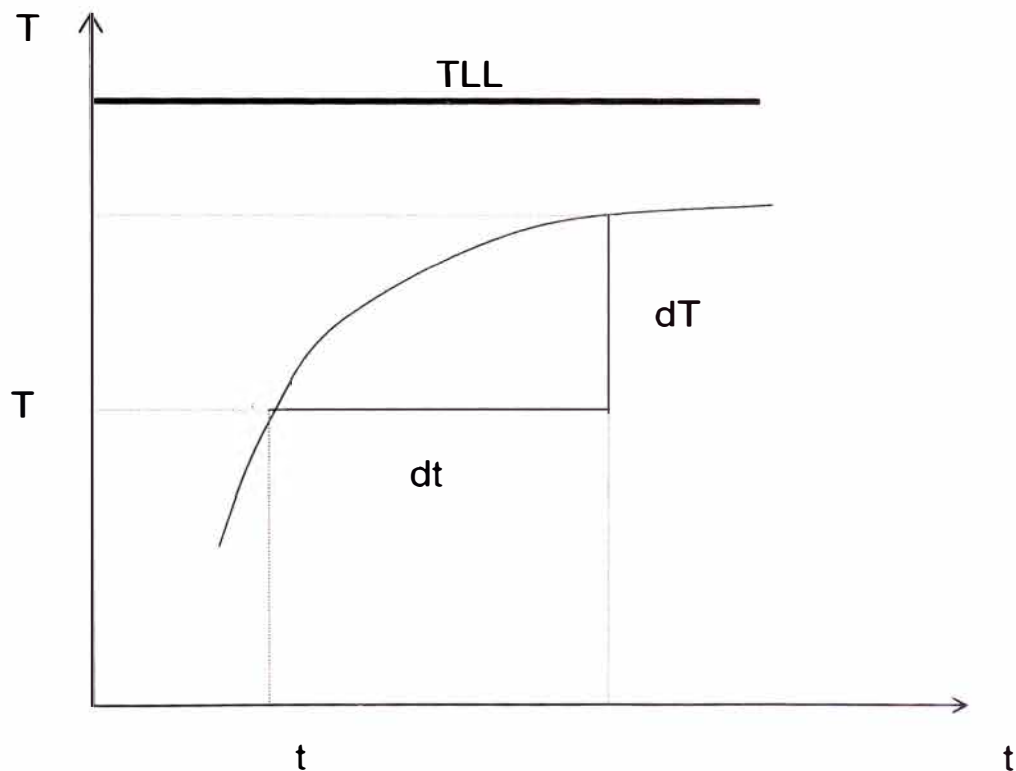


Fig. 3.4. Variación de temperatura del producto en el tiempo.

En la ecuación 1 y de la figura superior, aplicamos diferenciales y utilizando la figura 1, debido a que se aplican diferenciales se iguales los valores de T y de T_i :

$$dT = k(T_{lluvia} - T)dt \quad 3.5.8$$

$$\int_{T_i}^T (T_{lluvia} - T)^{-1} dT = \int_0^t k dt \quad 3.5.9$$

$$kt = -Ln(T_{lluvia} - T) + Ln(T_{lluvia} - T_i) \quad 3.5.10$$

$$T = T_{lluvia} - (T_{lluvia} - T_i) e^{-kt} \quad 3.5.11$$

Con esta ecuación podemos conocer el comportamiento térmico de la botella en un tanque determinado del pasteurizador en un momento dado, teniendo como datos la temperatura de la lluvia, la temperatura de la botella en el momento de ingresar y el coeficiente de transferencia de calor.

Con estos datos se puede evaluar en forma teórica la curva de comportamiento térmico del pasteurizador teniendo como datos la temperatura de los tanques y el factor de transferencia de calor total de la botella.

Para calcular en forma real la constante de transferencia de calor de la botella en el punto frío. Se compara la curva real de pasteurización y la curva teórica. Luego

ajustamos el valor de k en el calentamiento y en el enfriamiento hasta que las dos curvas se superpongan con lo que se determinan los valores antes mencionados.

Los valores así obtenidos son los mas reales posibles y son como sigue

$$K_p \text{ (calentamiento)} = 0.00217$$

$$K_p \text{ (enfriamiento)} = 0.00315$$

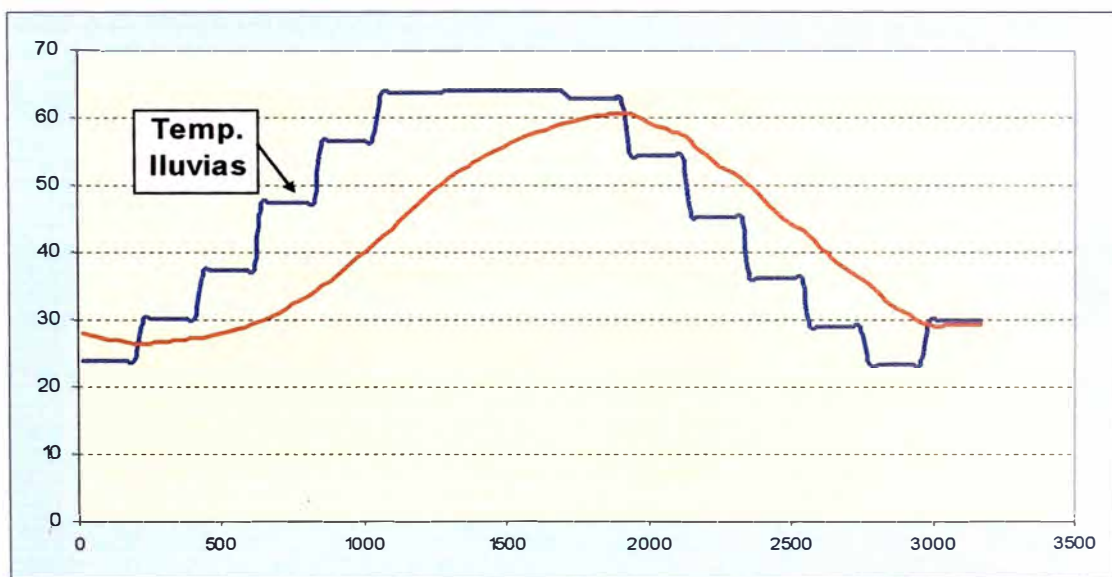


Fig. 3.5. Curva de pasteurización teórica. Pasteurizador Línea 1.

Esta curva es importante por lo siguiente:

- 1.- Expresa con una exactitud bastante aceptable con respecto a la curva real, el comportamiento térmico de las botellas dentro del pasteurizador.
- 2.- Se pueden variar los set points de temperatura de los tanques, obteniéndose una nueva curva con diferentes parámetros de pasteurización.
- 3.- Sirve para analizar las posibles variaciones de temperatura en los tanques y el efecto en los resultados de la pasteurización.
- 4.- No representa una curva exacta debido a los siguientes factores:

- Cada tanque tiene un diferente coeficiente de transferencia de calor porque depende de la diferencia entre las temperaturas de las lluvias y el producto.

- Variaciones de las temperaturas de los tanques, excepto los tanques de pasteurización (6, 7, 8 y 9) que tienen muy poca diferencia respecto a la temperatura seteada, los demás tanques por diseño de máquina presentan mayores diferencias respecto a la temperatura seteada.

En la figura siguiente se observa lo señalado anteriormente.

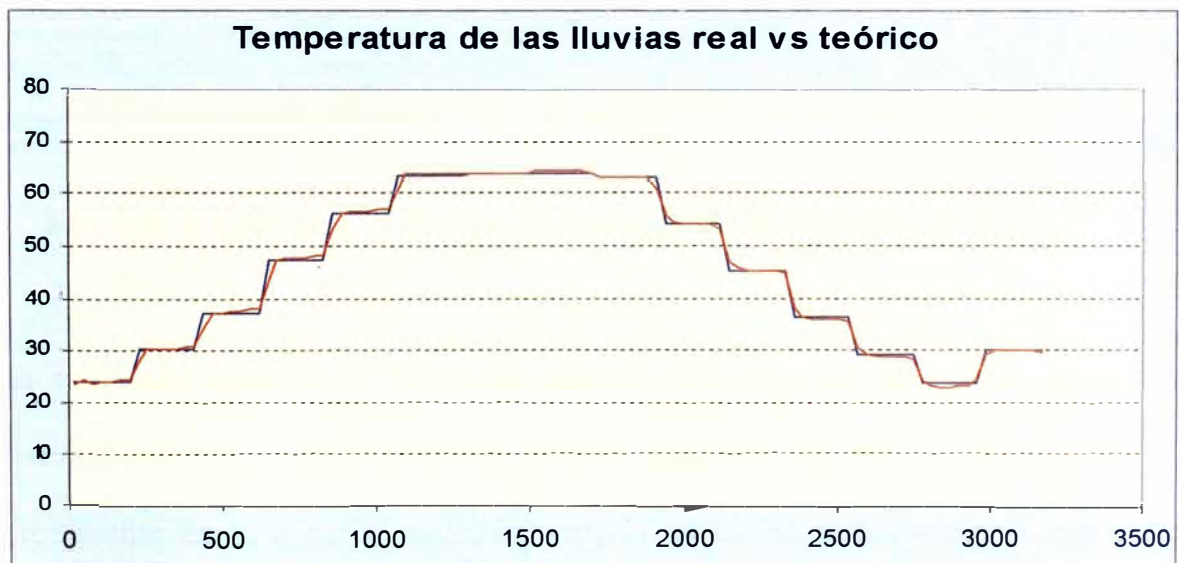


Fig 3.6. Temperatura de las lluvias real vs teórico

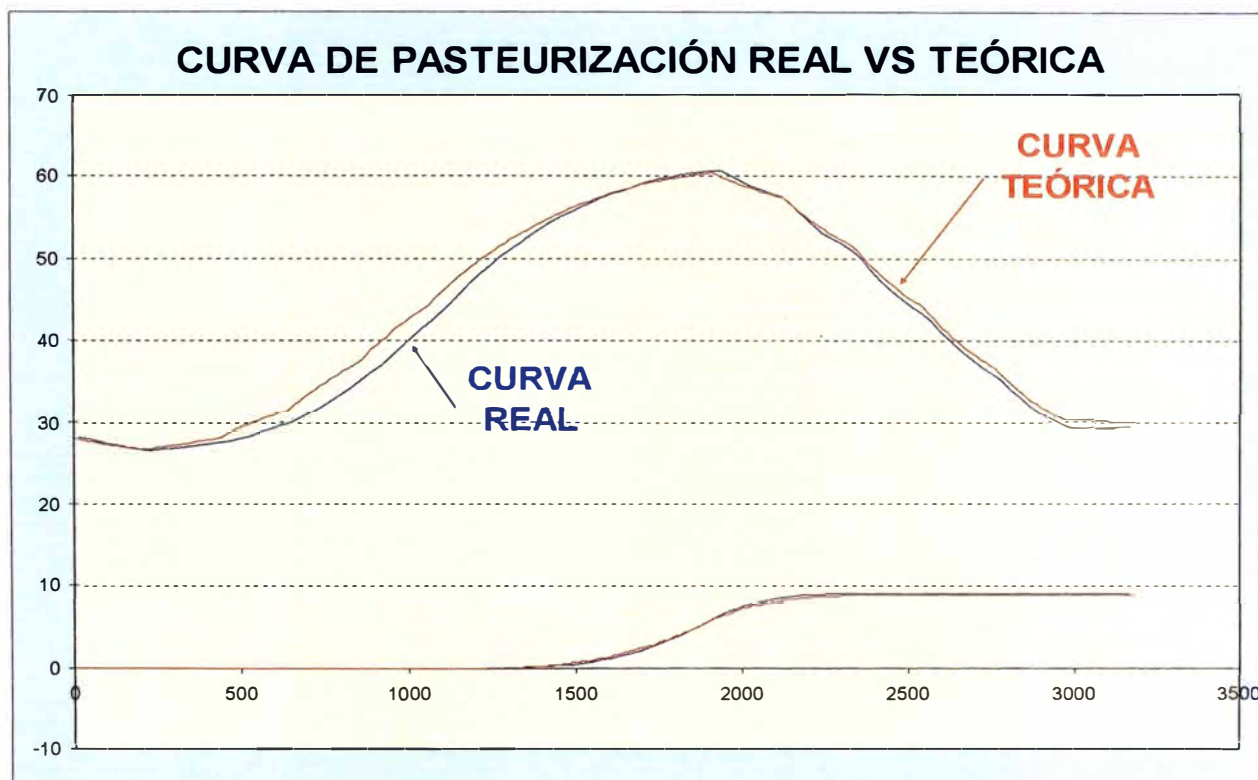


Fig. 3.7. Curva real vs teórica formato 620 – Pasteurizador Línea 1.

Como se puede apreciar en la figura anterior la curva no tiene diferencias muy apreciables respecto a una curva real de pasteurización, las diferencias se presentan principalmente en la zona de calentamiento antes de los tanques de pasteurización debido a que, como se observa en la figura 3.6 a las variaciones de temperaturas de los tanques propias del equipo.

La tabla adjunta en hoja Excel muestra el detalle de los cambios en el proceso variando los set points de los tanques:

Línea 1		
Tanque	°T tk	T lluvia
1	22,9	24,6
2	28,6	30,5
3	35,5	38
4	43,6	45
5	53,8	57
6	64,8	64,8
7	64,7	64,7
8	63,3	63,3
9	63,2	63,2
10	57	53,8
11	45	43,6
12	38	35,5
13	30,5	28,6
14	24,6	22,9
15	28	28
°T ingreso al past	27,2	
Tiempo de recorrido	53	
k calentamiento	0,00217	
k enfriamiento	0,00315	
RESULTADOS		
UP teórico	8,81	
T máx teórico	60,55	
°T salida past	28,86	

Tabla 3.4. Tabla excel de resultados de Línea 1

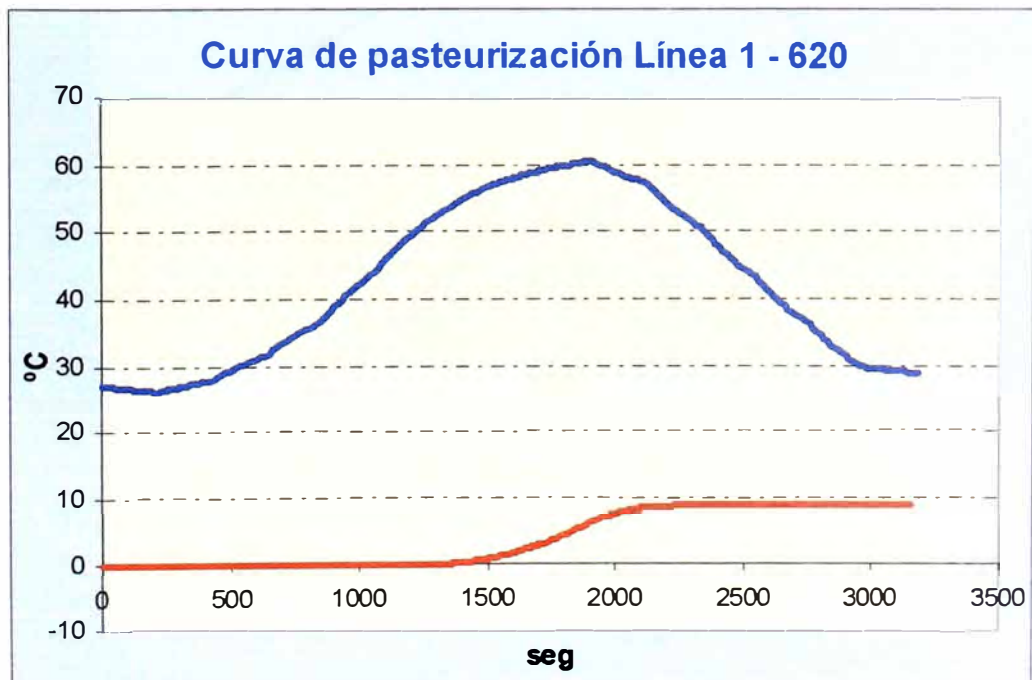


Fig 3.8. Curva de pasteurización Línea 1 – Formato 620 ml.

		Línea 2											
Formato		310		330		CR355		PC355		620		L100	
Tanque		T tk	T lluvia	T tk	T lluvia	T tk	T lluvia	T tk	T lluvia	T tk	T lluvia	T tk	T lluvia
1		26	28	30	30	26	28	26	28	28	30	26	28
2		44	47	39	41	40	42	38	42	39	40	38	43
3		58,5	58,5	54,4	54,4	54,5	54,5	55	55	65,5	65,5	56	56
4		62,7	62,7	60,5	60,5	62	62	62,2	62,2	62,7	62,7	64,1	64,1
5		47	44	41	39	42	40	42	38	40	39	43	38
6		28	26	30	30	28	26	28	26	30	28	28	26
°T ingreso al past		27		24		24		28		34,68		30	
Tiempo de recorrido		43		55		50		43		42		60	
k calentamiento		0,0023		0,0030		0,0025		0,0031		0,0019		0,00135	
k enfriamiento		0,0036		0,0034		0,0033		0,0030		0,0028		0,00155	
RESULTADOS													
UP real		9,5		9,9		10,5		11		8,8		9	
T max real		60,3		59,9		60,4		60,4		60,3		60,2	
UP teórico		9,0		9,8		9,1		9,7		8,7		8,2	
T max teórico		60,79		59,96		60,63		61,09		60,51		60,15	
°T salida del past		33,18		33,35		31,66		33,64		35,98		37,15	

Tabla. 3.5. Tabla en Excel de resultados de Línea 2

Las siguientes curvas de pasteurización corresponden a los formatos de Línea 2:

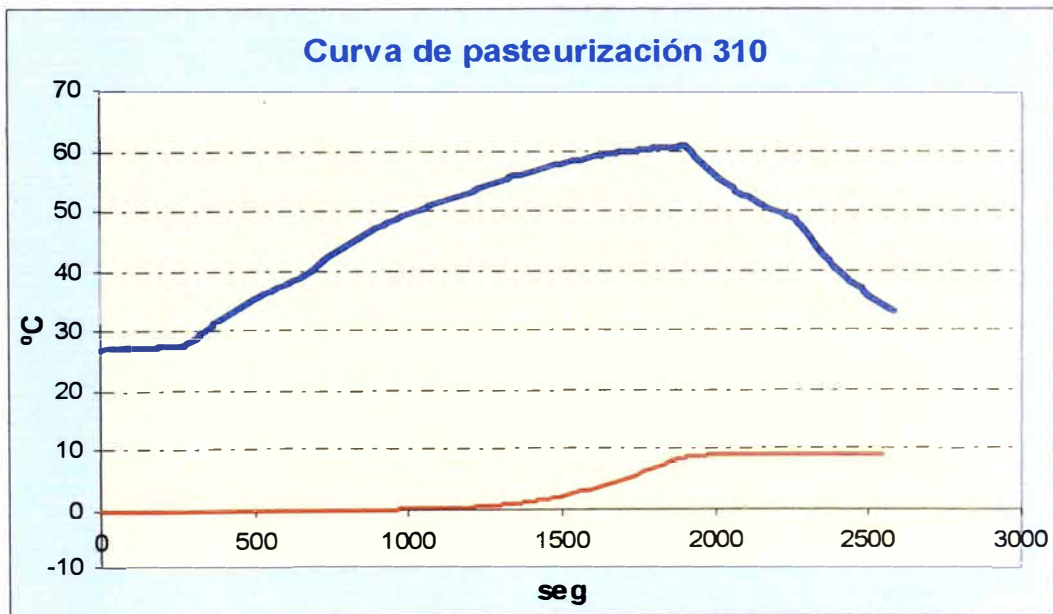


Fig. 3.9. Curva de pasteurización formato 310

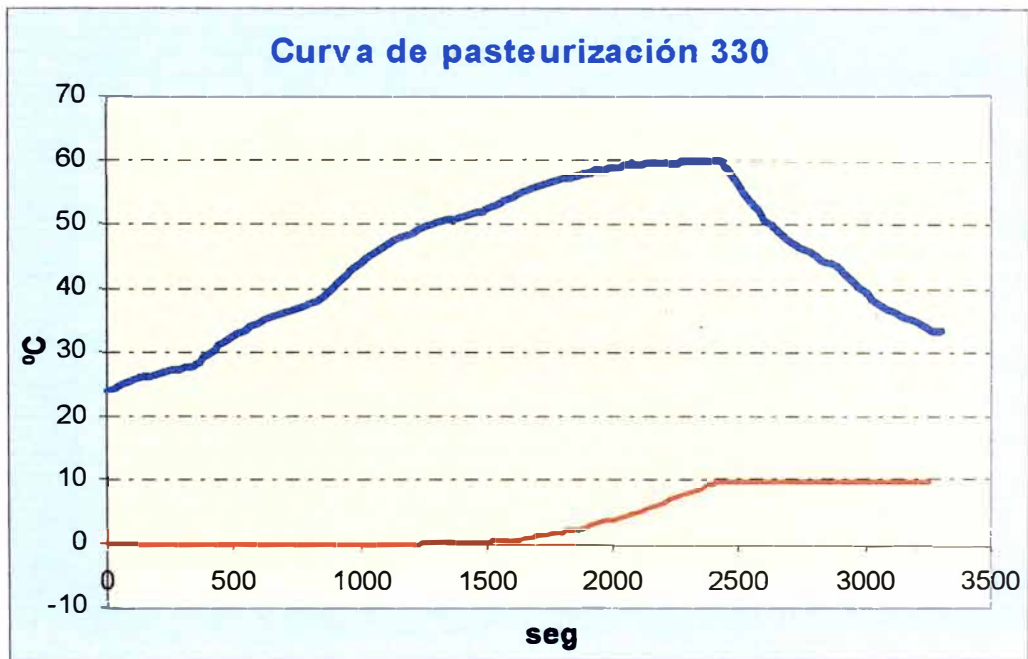


Fig. 3.10. Curva de pasteurización formato 330

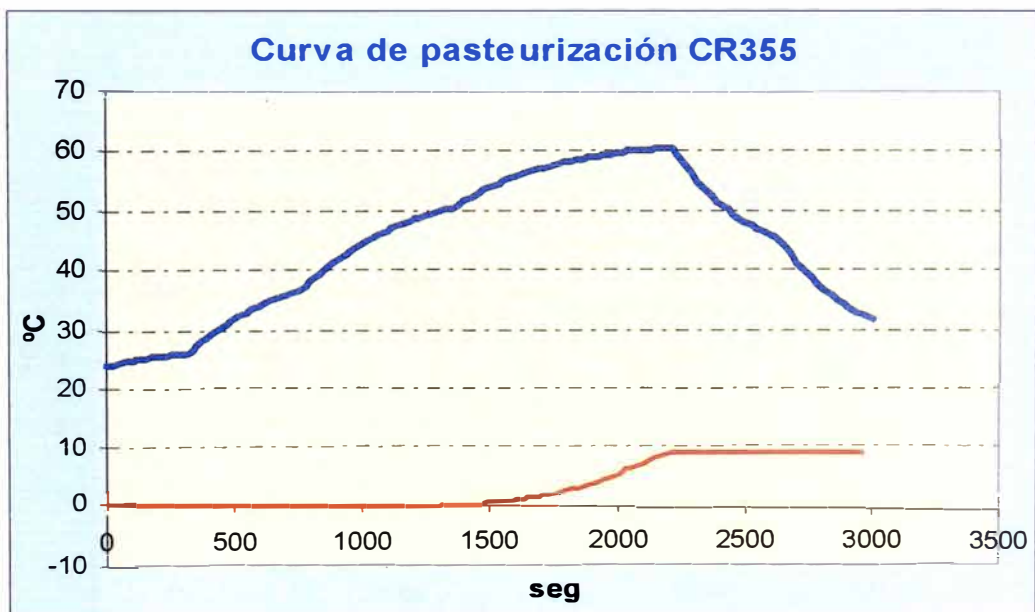


Fig. 3.11. Curva de pasteurización formato 355 LN

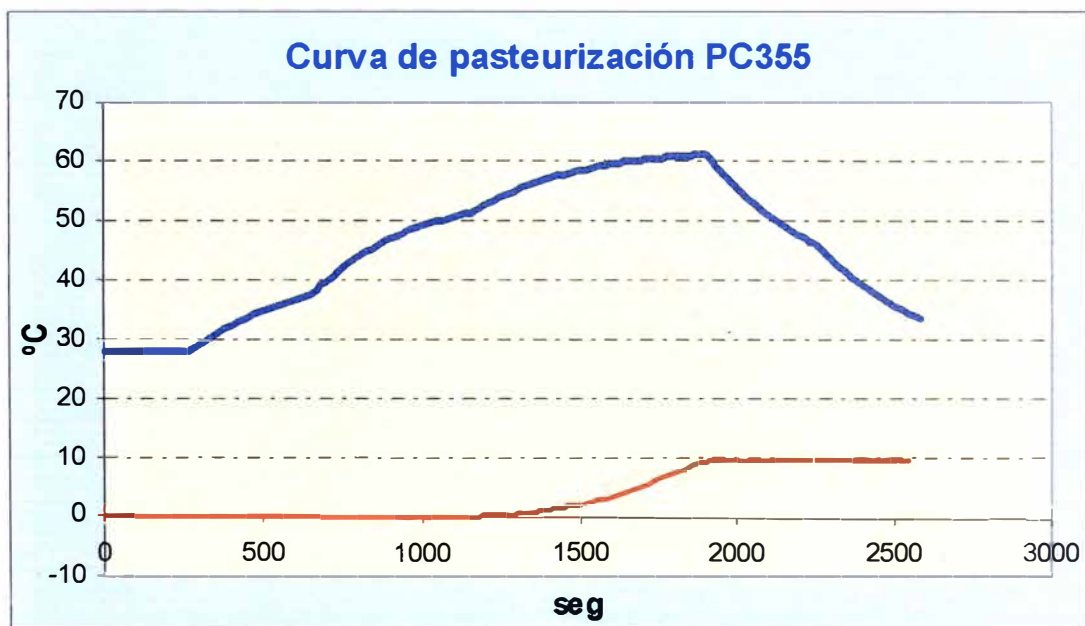


Fig. 3.12. Curva de pasteurización formato 355 SN

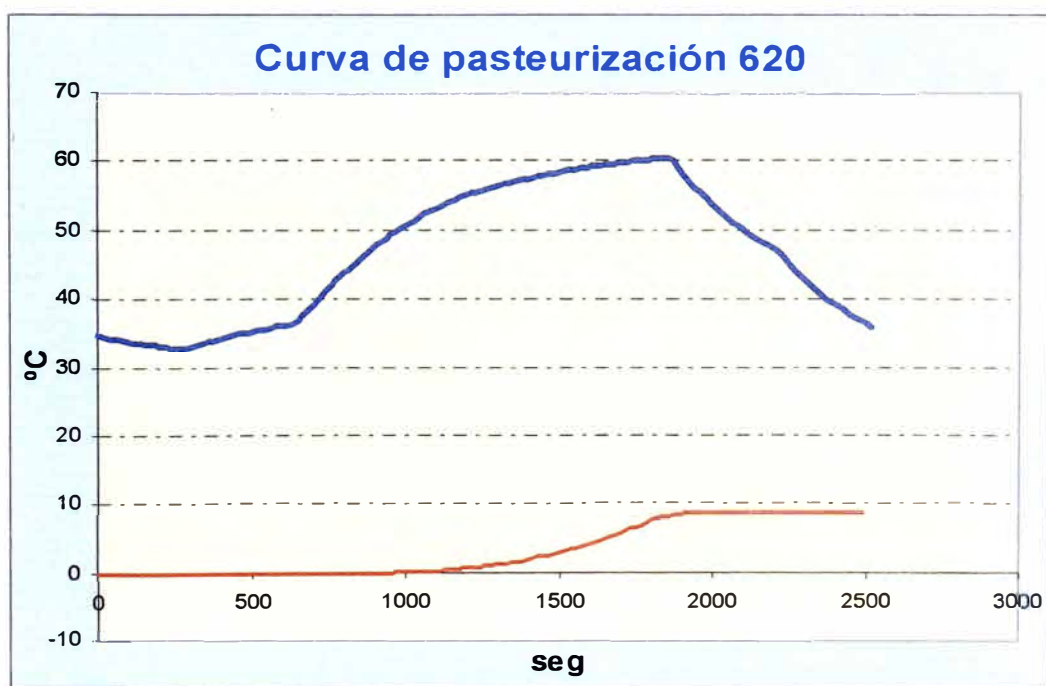


Fig. 3.13. Curva de pasteurización formato 620

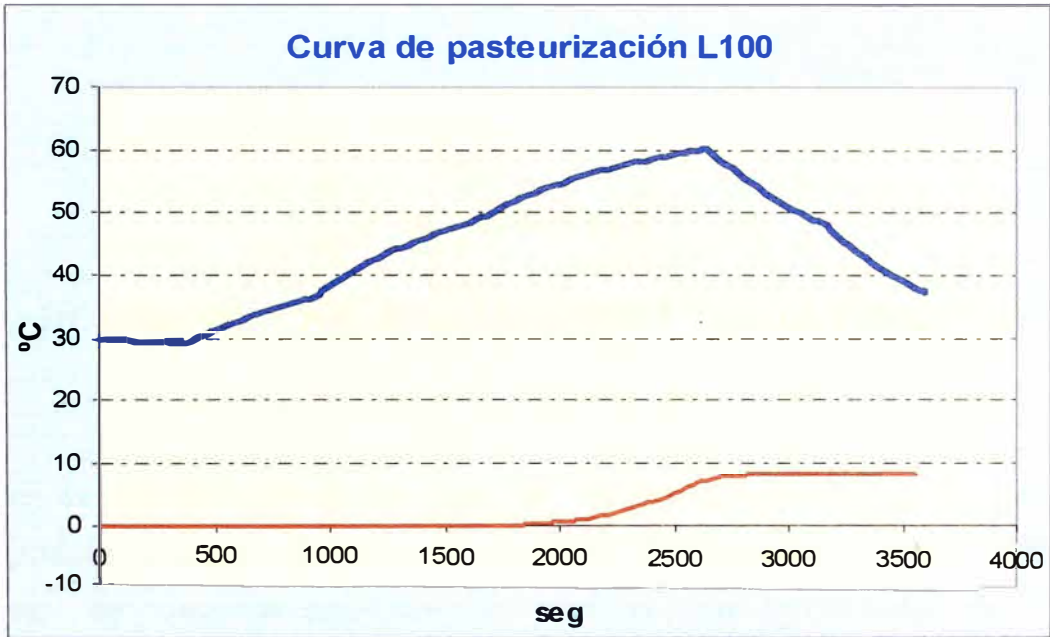


Fig. 3.14. Curva de pasteurización formato L100

CAPÍTULO 4

DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE CARGAS TÉRMICAS

Producto de condiciones de la línea de envasado, externas a la máquina, el pasteurizador presenta diversas condiciones de operación. Estas pueden ser problemas de desabastecimiento de botellas por problemas en lavadora, depaletizadora, etc. ó por acumulación en la salida del pasteurizador por problemas en transportadores de botellas ó cualquier máquina después del pasteurizador. Con la finalidad de tener en orden de magnitud, en este capítulo se evalúan las cargas térmicas de la máquina en estos estados de operación.

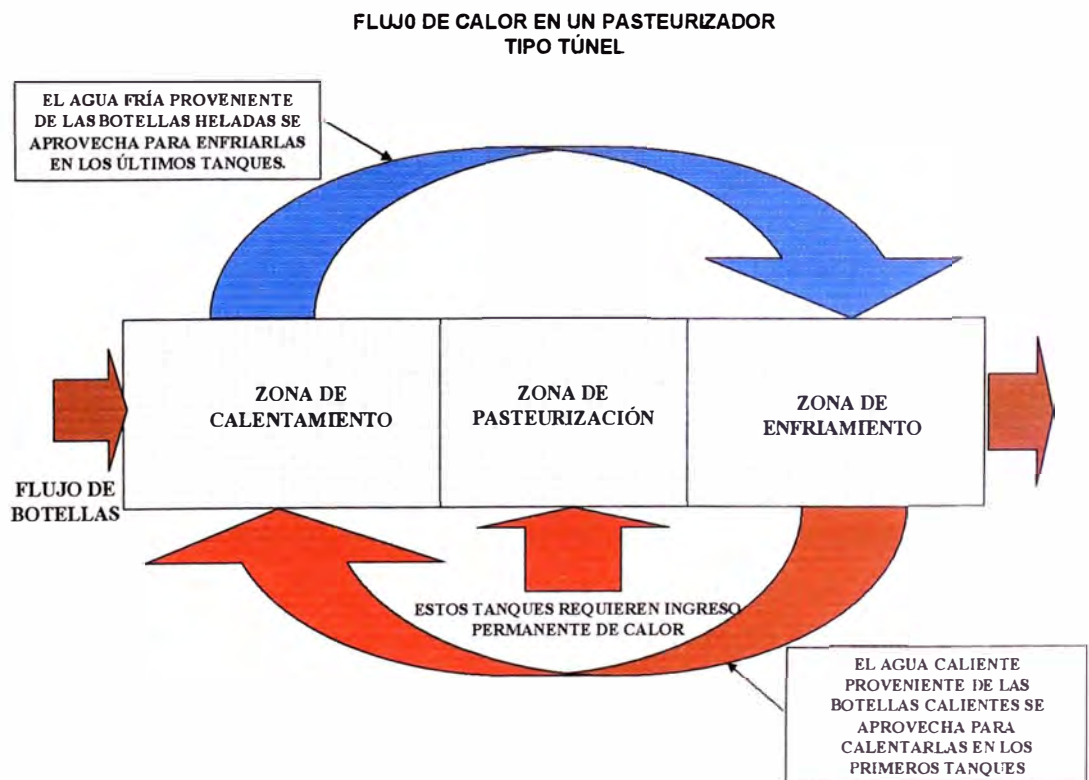


Fig. 4.1. Flujo de calor en un pasteurizador tipo Túnel.

4.1. Vacío de botellas en el pasteurizador.

4.1.1. Vacío de botellas en la zona de calentamiento.

En esta condición existe un desbalance por falta de botellas en la zona de calentamiento, lo que provoca un calentamiento de los tanques de enfriamiento y por consiguiente un requerimiento adicional de agua helada en los tanques.

Para realizar este cálculo primero determinaremos la cantidad de botellas en un área determinada.

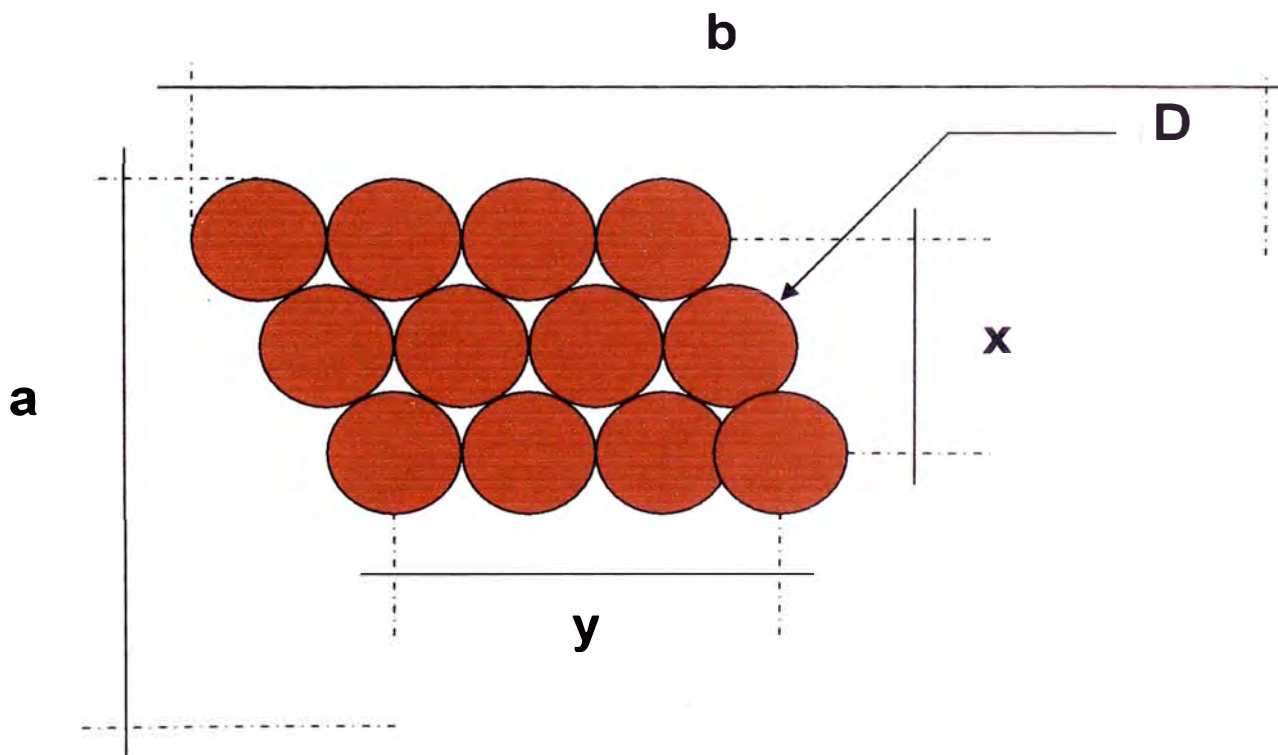


Fig. 4.2. Distribución de las botellas en un pasteurizador tipo túnel.

El área física de la superficie ó transportador es de $a \cdot b$

Luego determinamos:

$$b = n \cdot D$$

Donde:

n = Número de botellas longitudinalmente.

Luego:

$$a = (m-1)D\sqrt{3}/2 + D \quad 4.1.1$$

Donde:

m = Número de botellas transversalmente.

Deducimos luego:

$$m = \frac{2(a-D)\sqrt{3}}{3D+1} \quad 4.1.2$$

Con esta fórmula podemos determinar la cantidad de botellas en un sector con área "a.b", esto se puede aplicar para determinar las botellas que se encuentran ó ingresan en un pasteurizador tipo túnel.

$$\text{Área} = b(2(a-D)\sqrt{3}/3D+1)/D \text{ (bot)} \quad 4.1.3$$

Donde:

a y b = Dimensiones del sector.

D = Diámetro de la botella.

Cuando se presenta un vacío de un minuto producto de falta de botellas en el transportador de entrada al pasteurizador, se presenta un vacío de 1500 botellas.

La siguiente tabla muestra la capacidad del pasteurizador con los pisos completos.

# de tqs	A	B	M	n	Area	# de bts	Piso superior	Piso inferior
							T recorrido(min)	T recorrido(min)
	1	1	13,0	14,8	1	193	0,2	0,2
	1	2	26,0	14,8	2	385	0,5	0,5
	1	3	39,0	14,8	3	578	0,7	0,7
	2	1	13,0	29,8	2	388	0,5	0,5
	3	1	13,0	44,8	3	582	0,7	0,8
	2	2	26,0	29,8	4	775	0,9	1,0
	3	3	39,0	44,8	9	1747	2,1	2,3
1	6,78	2,2	28,6	101,5	14,9	2901	3,5	3,7
2	6,78	4,4	57,1	101,5	29,8	5801	7,1	7,5
3	6,78	6,6	85,7	101,5	44,7	8702	10,6	11,2
4	6,78	8,8	114,3	101,5	59,7	11602	14,1	15,0
5	6,78	11	142,9	101,5	74,6	14503	17,7	18,7
15	6,78	33	428,6	101,5	223,7	43508	53,0	56,2

Tabla 4.1. Distribución del número de envases en el pasteurizador.

Tanques	1	2	3	4	5
Temperatura lluvias	31	35	39	46,8	54,8
T cerv inicio tq	5,2	9,5	18,1	26	33,7
T cerv final tq	9,5	18,1	26	33,7	41,7
Carga térmica (kJ)	68137,8	136275,6	125183,4	122014,2	126768,0

Tabla4.2. Aporte térmico de los tanques de calentamiento al sistema regenerativo.

La variación del desbalance térmico se observa en el siguiente diagrama donde el tiempo de parada de producción ocasiona un requerimiento de agua helada hasta un máximo de 578379 kJ.

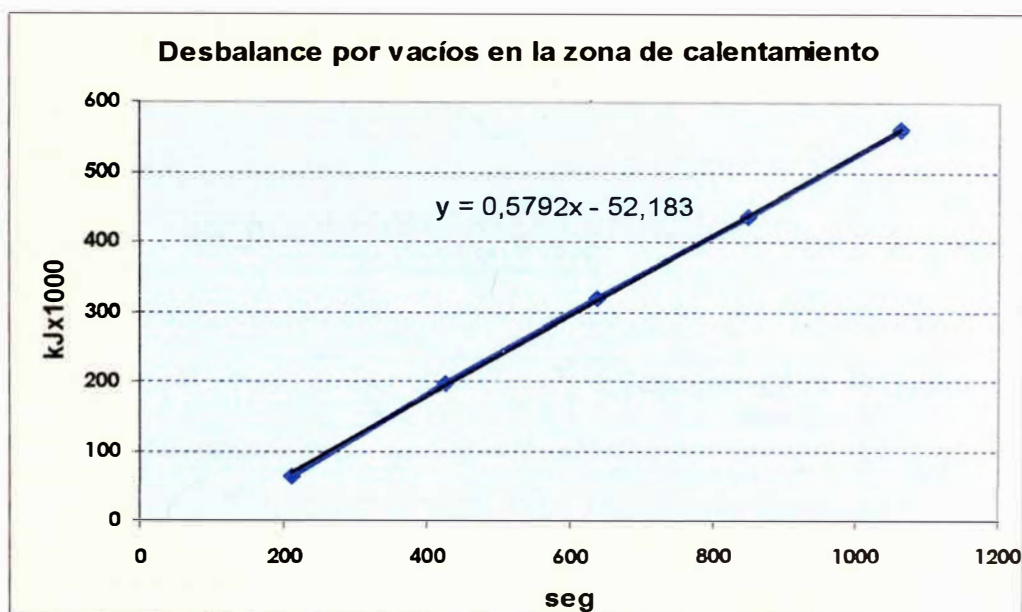


Fig. 4.3. Carga térmica por desbalance en el calentamiento por seg.

El calor residual que con las que se retiran las botellas se calcula de la siguiente forma:

$$Q = C.(C_v.p.V + C_{env}.P).(T_s - T_i)$$

Donde:

C = Capacidad en envases por hora, 90000 env/h

C_v = Calor específico de la cerveza, 4.19 KJ/Kg.°C.

ρ = Peso específico de la cerveza, 1.007 kg/lt

V = Volumen del envase, 0.62 lt.

C_{env} = Calor específico del vidrio del envase, 0.837 KJ/kg.°C.

P = Peso del envase vacío, 0.45 kg

T_s = Temperatura de salida del producto, 30°C

T_i = temperatura de ingreso del producto, 8°C.

Q = 5925.45 MJ/h

VACÍOS DE BOTELLAS EN LA ZONA DE CALENTAMIENTO

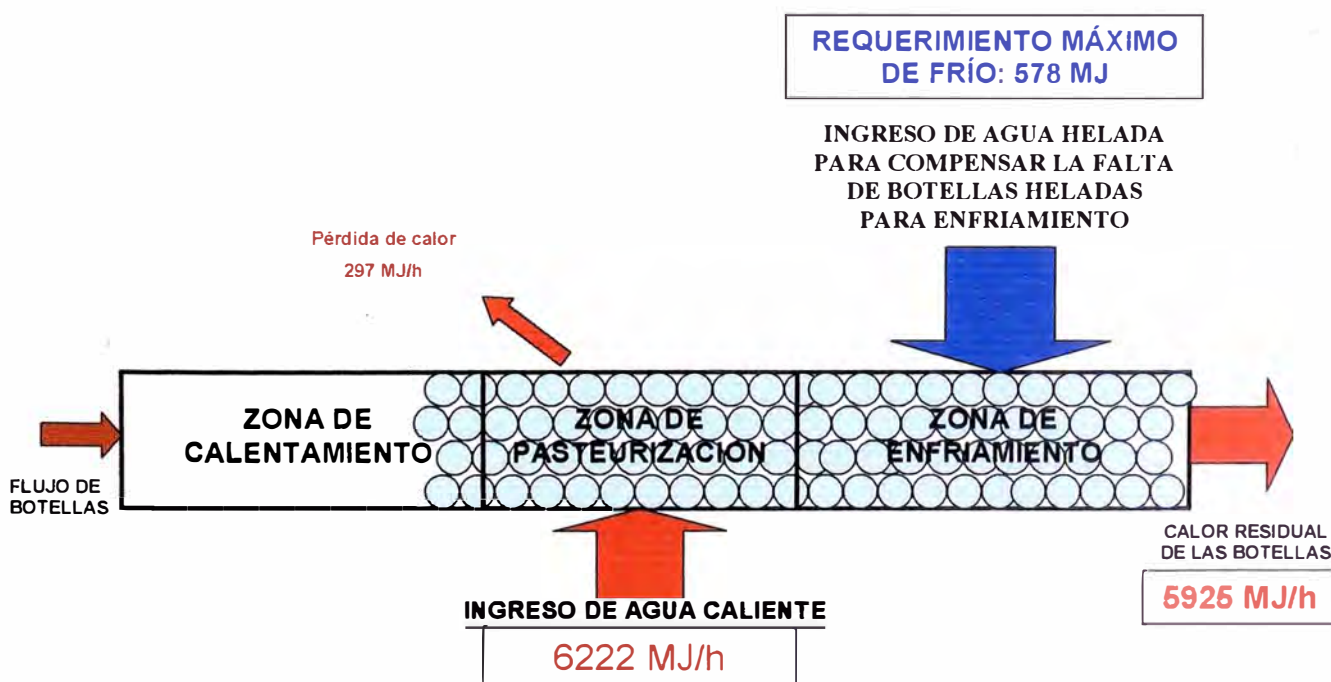


Fig. 4.4. Flujo de calor con vacíos en la zona de calentamiento.

4.1.2. Vacío de botellas en la zona de enfriamiento.

Cuando el vacío de envases anteriormente explicado pasa de la zona de calentamiento a la zona de enfriamiento, en estos tanque se produce un enfriamiento de los tanques de calentamiento, por lo que es necesario en estas condiciones un consumo de agua caliente adicional. En las condiciones más críticas el desbalance se produce en forma inversa que en el proceso de calentamiento, de acuerdo al siguiente cuadro:

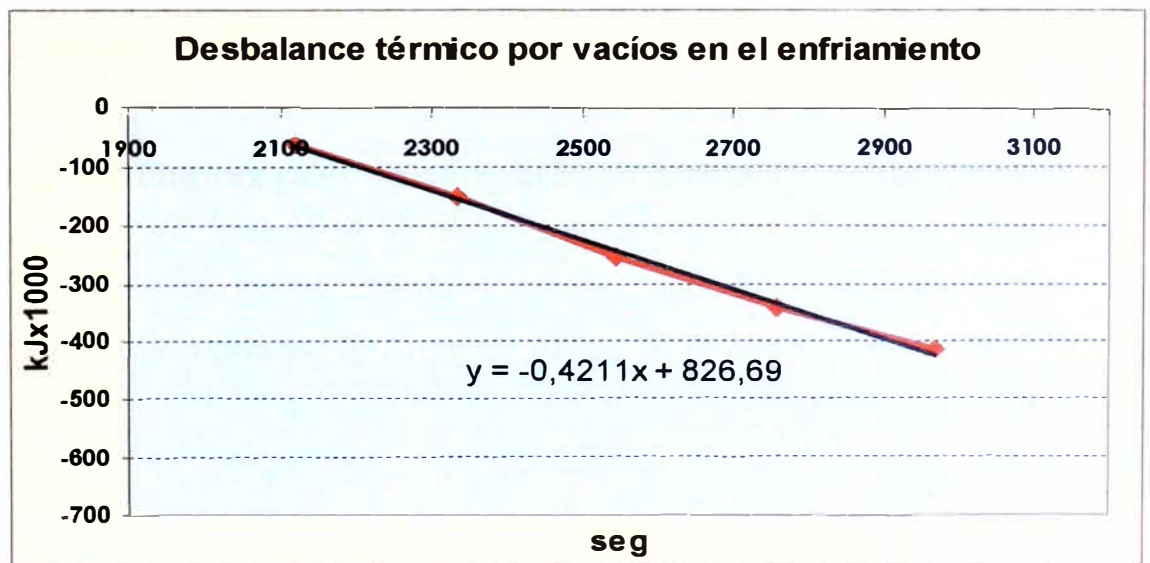


Fig.4.5. Carga térmica por desbalance en el enfriamiento por seg.

El máximo requerimiento de vapor se produce para 413580 kJ. Asumiendo el calor latente de 2080 kJ/kg para vapor a 5 bar, se requerirá 199 kg de vapor.

VACÍOS DE BOTELLAS EN LA ZONA DE ENFRIAMIENTO

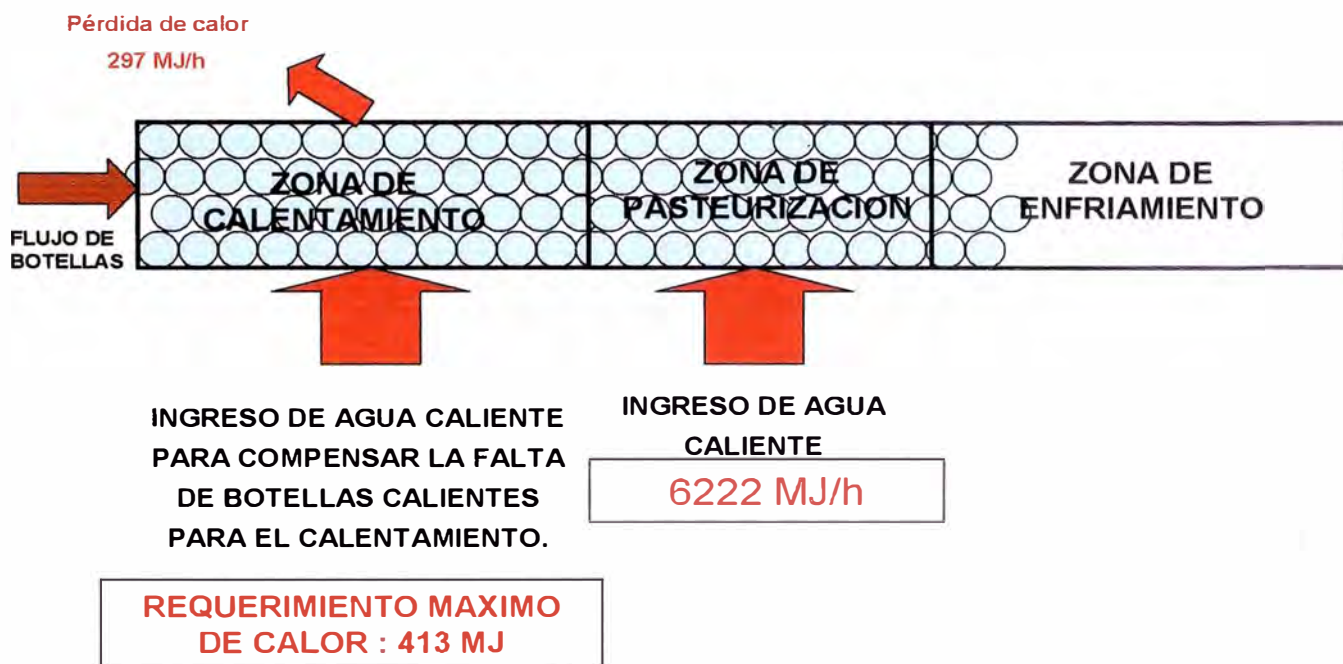


Fig. 4.6. Flujo de calor durante vacíos en la zona de enfriamiento.

4.2. Control de UP.

Cuando se produce una parada de los pisos del pasteurizador, se produce lo que se llama comúnmente un control de Unidades de pasteurización, es decir el set point de temperatura de los tanques baja a 50°C, durante 10 minutos en todos los tanques de pasteurización; esto con la finalidad de evitar la ganancia de unidades de pasteurización durante la parada.

Cuando el pasteurizador entra en control de UP, los set points de temperatura de los tanques 6, 7, 8 y 9 bajan a 50 °C.

Las condiciones iniciales de temperatura son de 57 °C en los tanques de pasteurización y el tanque intermedio, para luego llegar a 50 °C.

Datos:

Temp. Inicial del agua	: 57 °C
Temp final del agua	: 50 °C
Volumen tanques	: 13,6 m ³
Calor espec. del agua	: 4,184 kJ/kg°C
Tiempo de enfriamiento	: 4 min
Densidad agua a 50°C	: 1000 kg/m ³
COP del sistema	: 3.5
Pérdida de frío	: 15%

Con estos datos:

$$\begin{aligned} \text{Energía frigorífica} &= (T_f - T_i) \cdot V \cdot \delta \cdot C_p \\ &= 126.9 \text{ kw-h.} \end{aligned}$$

4.2.1 Cálculo de la temperatura promedio.

La temperatura promedio de las botellas en un tanque determinado será calculada de la siguiente fórmula:

$$T = T_{lluvia} - (T_{lluvia} - T_i) e^{-kt} \quad 4.2.1$$

Integramos esta ecuación:

$$\int T dt = \int (T_{lluvia} - (T_{lluvia} - T_i) e^{-kt}) dt \quad 4.2.2$$

$$T \Delta t = T_{lluvia} \Delta t + (T_{lluvia} - T_i) \Delta t / k e^{-kt} \quad 4.2.3$$

De donde podemos deducir que la temperatura promedio en un tanque determinado será:

$$T_{promedio} = T_{lluvia} + (T_{lluvia} - T_i) (kt + 1) \cdot e^{-kt} / k^2 \quad 4.2.4$$

Donde:

T = Tiempo de recorrido del pasteurizador.

K = Coeficiente de transferencia de calor.

Ti = Temperatura inicial del proceso.

T_{lluvia} = temperatura de la lluvia de agua.

t = tiempo de recorrido de un tanque del past. (212 seg).

Las condiciones de la cerveza en los tanques de pasteurización varían de acuerdo a la siguiente tabla:

Tanques	6	7	8	9
Temperatura lluvias	63,6	65,4	64,6	61,1
T cerv inicio tq	44,93	51,76	56,76	59,63
T cerv final tq	51,76	56,76	59,63	60,2
T prom antes de UP	48,60	54,44	58,30	59,92
T prom despues de UP	52	52	52	52
Carga térmica	210240,76	kJ		

Tabla 4.3. Temperatura del producto y de las lluvias en los tanques de pasteurización.

La carga térmica producto del enfriamiento de las botellas sería de:

$$Q = 210240.76 \text{ kJ}$$

Lo que totaliza con el enfriamiento del agua, haciendo un total de:

$$\text{Energía frigorífica} = 185.12 \text{ kW-hr}$$

Como el COP del sistema de refrigeración es de 3.5, se concluye que la energía eléctrica consumida en un control de UP es de:

$$\text{Energía eléctrica} = 53 \text{ kW-hr.}$$

Como esto se produce en 4 minutos, la potencia requerida para esto es alta por lo que normalmente en un control de UP es necesario arrancar un compresor de NH₃ adicional lo que genera problemas de sobrecarga y sobrecostos adicionales.

Esta potencia adicional es de:

Potencia eléctrica = 793 kW.

CONSUMO DE ENERGÍA DURANTE UN CONTROL DE UP



Fig. 4.7. Flujo de calor durante un control de UP.

4.3. Operación normal.

En operación normal sólo los tanques de pasteurización deben tener ingreso de agua caliente. La cantidad de calor requerida se determina por el flujo de botellas en los pisos de la máquina.

Debido a que el pasteurizador es netamente regenerativo en condiciones normales de operación es decir, sin vacíos de producción, no habrá consumo de agua helada. El consumo de agua será sólo la necesaria para compensar la pequeña cantidad que arrastran los envases y por evaporación, que en el caso de este pasteurizador representa de 1 a 1.5 m³/hr.

El consumo de calor puede ser calculado de la siguiente forma:

$$Q = C.(C_v.V.\rho + C_{env}.P).((T_p - T_i) - (T_p - T_d)) + Q_{loss} \quad 4.3.1$$

Donde:

Q = Consumo de calor, KJ/h

Q_{loss} = Pérdida de calor en el proceso, KJ/h.

C = Capacidad en envases por hora, (1500 env/min)

C_v = Calor específico de la cerveza, 4.19 KJ/Kg.°C

ρ = Peso específico de la cerveza, (1.007 Kg/lt)

V = Volumen del envase, (0.620 lt)

C_{env} = Calor específico del vidrio del envase, 0.837 KJ/Kg.°C

P = Peso del envase vacío, 0.450 Kg.

T_p = temperatura máxima de pasteurización, 60.5°C

T_i = Temperatura de la cerveza al ingresar al pasteurizador, 8°C

T_d = Temperatura de salida del pasteurizador, 30°C

Podemos asumir por las condiciones de la máquina que la pérdida de calor por radiación es del 5% del total.

Por lo que el consumo de calor sería de:

$$Q = 6221723 \text{ KJ/h}$$

Se podría también calcular el consumo de vapor sabiendo que se utiliza vapor saturado a 5 bar.

h_{fg} = Calor latente del agua a 5 bar = 2080 KJ/Kg

$$m = 3636 \text{ kg/hr}$$

Asimismo en condiciones normales también, la máquina consume energía frigorífica en el tanque 15 donde las botellas se enfrían en promedio de 35 a 31°C.

La energía requerida sería:

$$Q = 66553 \text{ kJ}$$

ó

$$Q = 18.5 \text{ Kw-hr.}$$

CONDICIÓN NORMAL DE PRODUCCIÓN

Fig. 4.8. Flujo de calor en condición normal de producción.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO DE MEJORAS

5.1. Condición actual del pasteurizador.

Actualmente en el pasteurizador la compensación del nivel de agua del tanque de agua fría se realiza enviando agua con una bomba desde el tanque intermedio que se encuentra con una temperatura muy elevada aproximadamente de 56° C. lo que provoca una sobrecarga del sistema de refrigeración de la planta. Ya que por este motivo en algunas oportunidades la temperatura de entrada del enfriador sobrepasa los 40° C.

Esto sucede en especial cuando sucede un control de UP, lo cual genera una demanda alta de agua fría para enfriar los tanques de pre y pasteurización a 50° C. Bajo estas condiciones de control de UP, los tanques de pre y pasteurización bajan de 63° C en promedio a 50°C.

Cuando se eleva la temperatura del agua helada y el sistema continúa solicitando ésta, se genera un problema debido a que el consumo de agua helada aumenta y por consiguiente el ingreso de agua caliente al tanque de agua helada aumenta también, produciéndose un círculo vicioso que no termina hasta que las botellas heladas reducen el requerimiento de agua helada.

Este mismo problema sucede cuando existe un desabastecimiento de botellas al pasteurizador, es decir cuando se presenta un vacío de botellas en el pasteurizador, lo que provoca un requerimiento de agua helada y por consiguiente se presenta el mismo problema anterior.

5.2. Oportunidades de mejora.

5.2.1. Modificación de curva de pasteurización.

Las curvas de pasteurización deben tener una forma tal que el pasteurizador trabaje en forma regenerativa en condiciones normales de operación. Como describimos anteriormente las características de pasteurización son:

Unidades de pasteurización.

Temperatura máxima.

Temperatura de salida del pasteurizador.

Unidades letales.

Para que cumpla los requerimientos de la temperatura de salida es necesario que las temperaturas de los tanques de calentamiento y enfriamiento trabajen con las temperaturas de equilibrio.

Al realizar esta modificación se redujo el consumo ó recirculación de agua helada de 1.0 a 0.8 m³/hr.

El ahorro energético sería:

$$Q = 0.2 * 4.184 * (57-9) * 1000$$

$$Q = 40166 \text{ kJ/hr.}$$

En una semana sería el consumo de

$$Q = 1651 \text{ kw-hr}$$

Con un COP de 3.5 y el costo de 0.4 S/kw-hr

El ahorro sería de S/. 189 semanales ó S/. 9434 al año.

5.2.2. Modificar el sistema de alimentación de agua al tanque de agua fría.

La propuesta de mejora consiste en alimentar con agua fresca el tanque de agua fría cuando hay requerimiento por bajo nivel; esto provocará que exista sobre nivel en los tanques intermedios, por lo que se colocará un rebose para que el exceso de agua se evacue al desagüe.

La ventaja de esta alternativa representa un ahorro de energía frigorífica al no enfriar agua a 55°C. Asimismo al tener agua fría a 10°C casi en forma constante también se reduciría el consumo de agua fría.

Desventaja:

La mayor desventaja es el desperdicio de agua fresca al tener que desechar al desagüe lo innecesario. Como contraparte un mejor enfriamiento, es decir mantener el agua a la menor temperatura va a redundar en un menor consumo de agua.

5.2.2.1. Análisis térmico.

El consumo de energía frigorífica se debe a dos componentes: debido a los vacíos durante el proceso de producción que son determinados

por la eficiencia de la línea de producción, una eficiencia promedio de producción es de 95% y debido a los controles de UP producidos.

El primer componente se analiza de la siguiente forma:

Los vacíos en la zona de calentamiento producen consumos de agua helada. Analizando el proceso, para una eficiencia del 95%, en una hora de producción tendríamos 3 min de vacío por lo que el consumo de energía estaría dado por la línea de tendencia de la figura 4.1.

$$Q = 0,5792 \times 180 - 52,183$$

$$Q = 52073 \text{ kJ/h.}$$

Por último de acuerdo al capítulo IV definimos que los controles de UP producen un consumo de:

$$Q = 3675324 \text{ kJ/h.}$$

En promedio un control de UP se produce cada 24 horas, por lo que se distribuye esta carga térmica en forma horaria.

$$Q = 153139 \text{ kJ/h.}$$

En total el flujo de calor sería de:

$$Q = 205212 \text{ kJ/h.}$$

El consumo de agua helada promedio es de 0.8 m³/h. Este consumo tiene dos componentes 0.4 m³/h que corresponde a un consumo normal producido por pequeños vacíos a una eficiencia de línea del 95% y un componente variable de 0.4 m³/h que es debido a los controles de UP y a las paradas mayores.

El consumo de frío de 0.8 m³/h, enfriada de 57 a 9° C, sería:

$$Q = 0.8 * 4.184 * (57-9) * 1000$$

$$Q = 160666 \text{ kJ/h}$$

En una semana de trabajo (148 hrs), la energía consumida sería de:

$$E = 6603 \text{ kw-hr.}$$

El COP del sistema es de 3.5 por lo que el consumo de energía sería de:

$$E = 1887 \text{ kw-hr.}$$

El costo de energía eléctrica es de 0.4 S/kw-hr.

Es decir gastamos semanalmente S/. 755 en enfriar el agua del pasteurizador.

Por el sistema propuesto no consumiríamos energía eléctrica para realizar este enfriamiento pero si gastaríamos agua.

El total gastado sería de $0.4 * 148 = 59 \text{ m}^3$ semanal

Asumiendo un costo de 0.5 S/m³

El costo de desechar el agua caliente sería de S/30

El consumo de energía para enfriar 0.5 m³/hr (se asume esta cantidad debido a que la temperatura de agua helada sería mas constante) de 23 a 9°C. sería:

$$Q = 0.5 * 4.184 * (23-9)$$

$$Q = 29288 \text{ kJ/hr}$$

$$E = 344 \text{ kw-h}$$

Gasto sería de S/.138

Es decir semanalmente gastaríamos S/617 (755-138)

El ahorro sería de S/617 semanal.

El ahorro total anualizado sería de S/.32084.

El gasto de inversión no es representativo debido a que básicamente requiere una modificación en el software del equipo y a la instalación de una línea de agua automatizada.

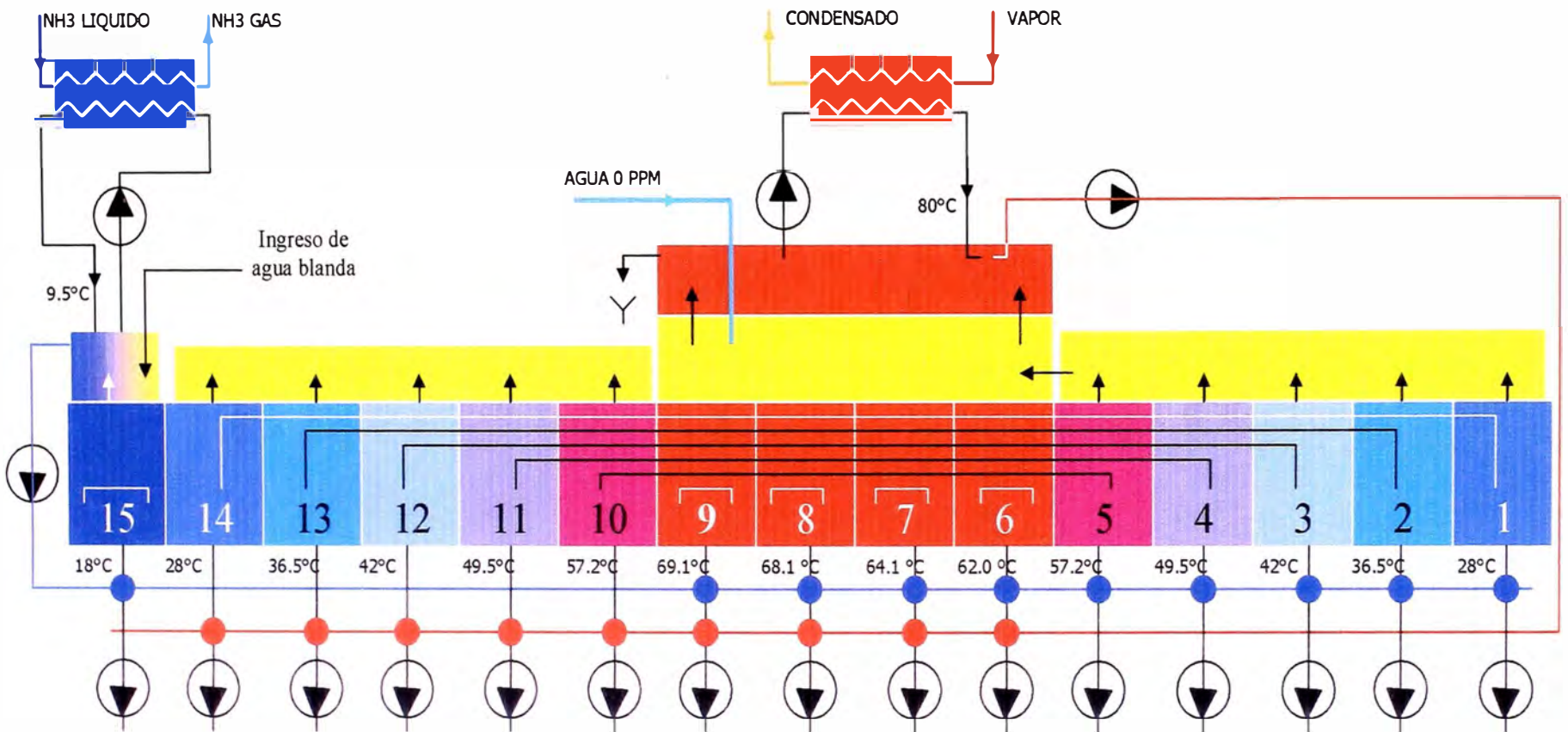
El impacto de esta mejora no solamente es económico sino también operativo por las siguientes razones:

En un control de UP bajarían rápidamente la temperatura de los tanques de pasteurización, por lo que el tiempo de parada se reduciría, mejorando la eficiencia de la línea de producción.

Incluso en los casos extremos no habría necesidad de arrancar otro compresor de NH₃ debido a que no habría picos de consumo de energía.

Se podrían plantear otras opciones como aprovechar el calor del agua caliente, ó colocar una torre de enfriamiento, pero esto requiere de una inversión mayor, además el volumen de agua desechada no es muy alto.

Fig. 5.1. Diagrama del pasteurizador con la mejora propuesta.



CONCLUSIONES

1.- Con este trabajo se logra diseñar el modelo teórico del comportamiento térmico del pasteurizador a partir del cálculo de la temperatura del producto en un momento del recorrido en función de los siguientes parámetros:

- Tiempo de recorrido.
- Temperatura de los tanques.
- Temperatura de la botella al ingreso del pasteurizador.

La fórmula es la siguiente:

$$T = T_{lluvia} - (T_{lluvia} - T_i) e^{-kt}$$

Donde:

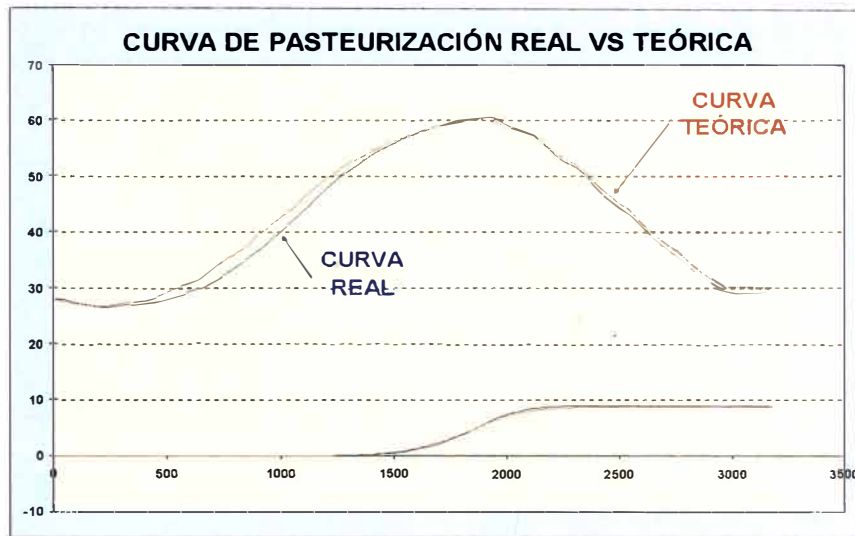
T_{lluvia} = Temperatura de la lluvia.

T_i = Temperatura inicial de la botella al ingresar al tanque.

K = Coeficiente de transferencia de calor.

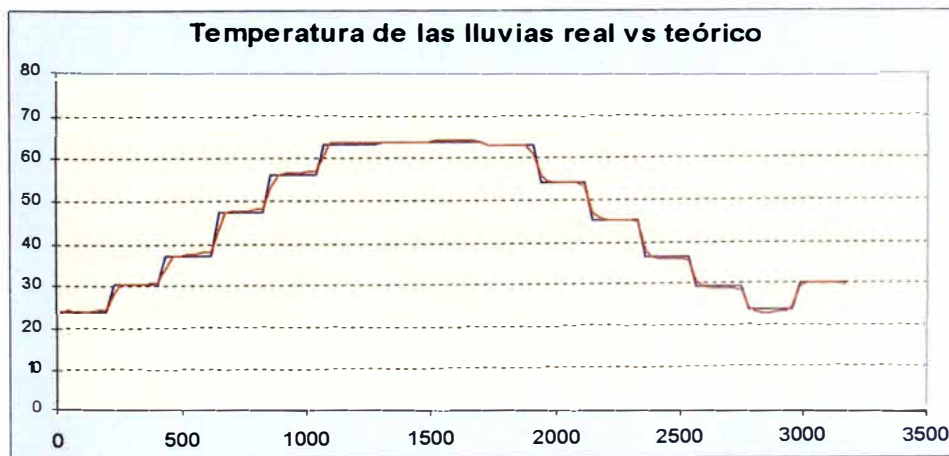
t = Tiempo de recorrido desde el ingreso al tanque.

2.- Las diferencias de la curva teórica respecto a la curva real obtenida mediante la sonda de prueba se puede observar en la siguiente figura:



Esta diferencia se debe a los siguientes motivos:

- La curva teórica calcula los parámetros de pasteurización asumiendo temperaturas constantes de las lluvias. En una curva real la temperatura de los tanques tiene cierta variación principalmente los tanques de recirculación del 1 al 5 y del 10 al 15. Los tanques de pasteurización tienen temperaturas más constantes con ligeras variaciones del orden de 0.1°C .



- Entre bandeja y bandeja hay una separación de 10 cm. Donde las botellas no reciben lluvias.

- Cada tanque en teoría tiene un coeficiente de transferencia de calor diferente debido a que la diferencia de temperaturas entre la lluvia y el producto es diferente en cada tanque. Este margen de error se reduce cuando las diferencias de temperatura mencionadas anteriormente se reducen. Para efectos prácticos se asumen coeficientes iguales para todos los tanques de calentamiento y otro para todos los tanques de enfriamiento. Esto se verifica al analizar la curva de las unidades de pasteurización donde la curva teórica y real se superponen. Significa esto que mayor impacto en el cálculo de los parámetros de pasteurización tienen los tanques del 6 al 9 (tanques de pasteurización).

3.- La transferencia de calor en la botella se presenta en tres partes: conductivo entre las lluvias y la superficie de la botella, conductivo a través de las paredes del envase y convectivo dentro de la cerveza. De las tres partes la primera y tercera (conductivo entre lluvias y botella y convectivo dentro del envase) tienen mayor impacto. Aplicando la fórmula para elaborar la curva de pasteurización se puede comprobar luego que el coeficiente de transferencia de calor para la zona de calentamiento es inferior al coeficiente para la zona de enfriamiento. Esto tiene lógica debido a que la transferencia de calor por convección dentro de la botella es mayor cuando la temperatura del líquido es mayor que la de la lluvia, la zona fría se va encontrar en la zona superior de la botella por lo que se acelera el efecto convectivo.

4.- El coeficiente de transferencia de calor en la botella depende de los siguientes parámetros:

- Espesor de la botella, en este caso las botellas retornables tienen mayor espesor de pared de vidrio por tanto tienen menor coeficiente de transferencia de calor.

- Tipo de lluvia del pasteurizador; puede ser con bandejas como el de Línea 1 con mayor flujo de agua ó con sprays como en el pasteurizador de Línea 2. El pasteurizador de Línea 1 por tener las lluvias mayor flujo de agua y estar casi en contacto continuo con las botellas, el coeficiente de transferencia de calor es mayor.

- La diferencia de temperatura entre la lluvia y el producto.

Esto se resume en los coeficientes calculados:

	Línea 1		Línea 2				
Formato	620	310	330	CR355	PC355	620	L100
k calentamiento	0,00217	0,0023	0,0030	0,0025	0,0031	0,0019	0,00135
k enfriamiento	0,00315	0,0036	0,0034	0,0033	0,0030	0,0028	0,00155

5.- Es necesario recordar que las unidades de pasteurización analizadas en el proceso real y el teórico de refieren a la zona del punto frío que es la zona a 15 mm de la base de la botella y es donde experimentalmente se ha comprobado se presenta la más baja temperatura en la botella.

6.- La curva de pasteurización en el pasteurizador de Línea 1 presenta menor margen de error por el número de tanques debido a que la diferencia de temperaturas entre la lluvia y el producto en cada tanque es más constante.

7.- A partir del balance térmico podemos concluir en la siguiente tabla:

Condiciones de operación	Consumo de energía calorífica	Consumo de energía frigorífica	Calor residual de botellas
Vacíos en la zona de calentamiento	6222 MJ/h	578 MJ	5925 MJ/h
Vacíos en la zona de enfriamiento	414 MJ		
Control de UP	6222 MJ/h	210 MJ - 3150 MJ/h	
Operación normal	8050 MJ/h		5925 MJ/h

En operación normal, el consumo de energía se presenta sólo en los tanques de pasteurización porque en todo momento se requiere que el producto alcance los 60.5°C, durante esta condición todo el calor que ingresa al pasteurizador es igual al calor residual con el que salen las botellas más una pérdida de calor que se produce en la máquina. En esta condición sin vacíos en la máquina es decir con una eficiencia constante, el ingreso de agua caliente ó fría en los tanques de calentamiento y enfriamiento debe ser nula ya estos tanques trabajan en forma regenerativa.

8.- La mejora propuesta va a mejorar el proceso en sí por los siguientes motivos:

- Reducción del consumo de energía eléctrica. El ahorro estimado anual sería de S/. 32084.

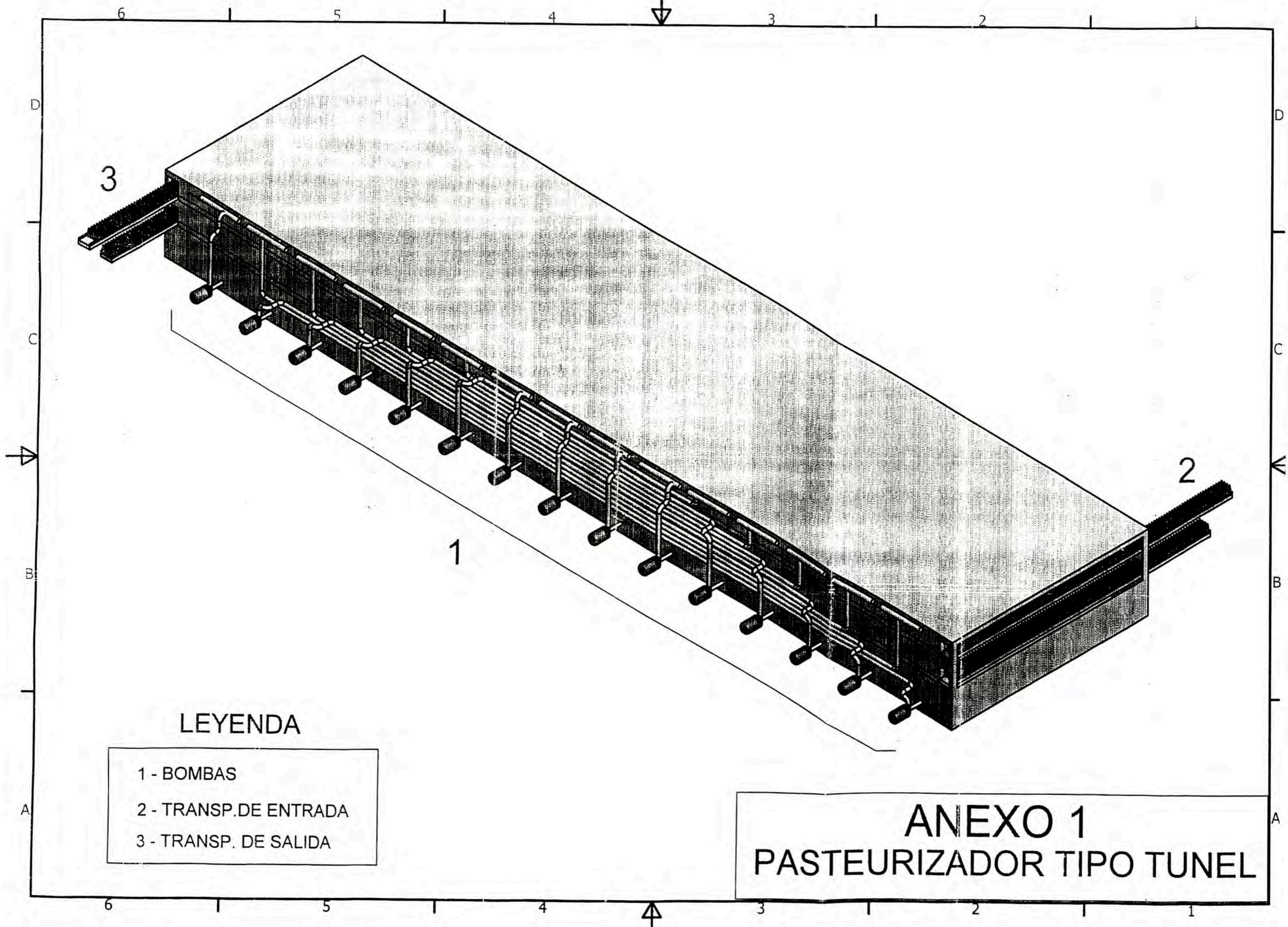
- Si bien es cierto aumenta el consumo de agua, este no es representativo ya que la mejora es rentable.

- Se mejora el proceso en sí, porque se tendrían temperaturas más estables durante el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Broderick, H. 1978. El cervecero en la práctica. Un manual para la industria cervecera. 2da edición. Tomo II. Caracas, Venezuela. 550 p.
- KERN, D. 1986. Procesos de transferencia de calor. 19 va impresión. Mexico. 980 p.
- European Brewery Convention. 1995. Beer Pasteurisation. Manual of good practice. EBC Technology and Engineering Forum. 1era edición. England. 136 p.
- Dorton, J. 1998. Measuring points and PU Pick-Up. US. Technical quarterly. Vol. 35 (4) 203-207.
- Patiño, L. A.; Espinoza, H.; Velásquez, O. 2001. Estudio numérico de la transferencia de calor en la cerveza en el proceso de pasteurización. *Ciencia e Ingeniería*, 2001, vol.22, no.3, p.19-26. ISSN 1316-7081.

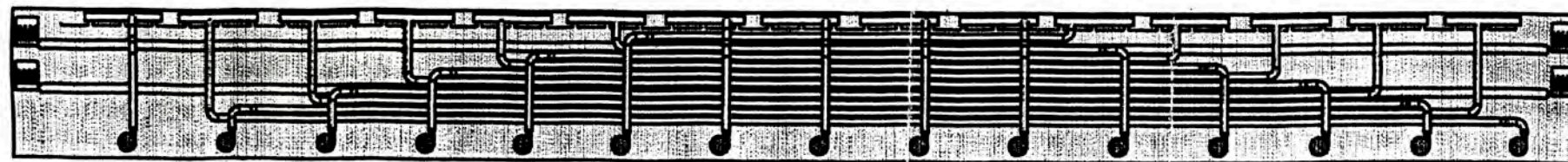
ANEXOS



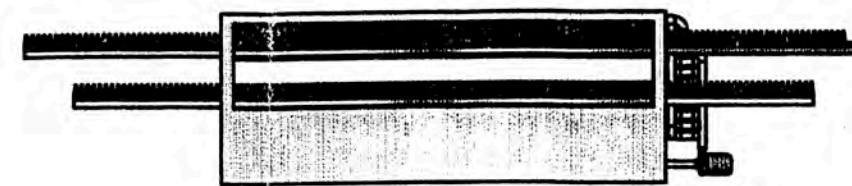
LEYENDA

- 1 - BOMBAS
- 2 - TRANSP.DE ENTRADA
- 3 - TRANSP. DE SALIDA

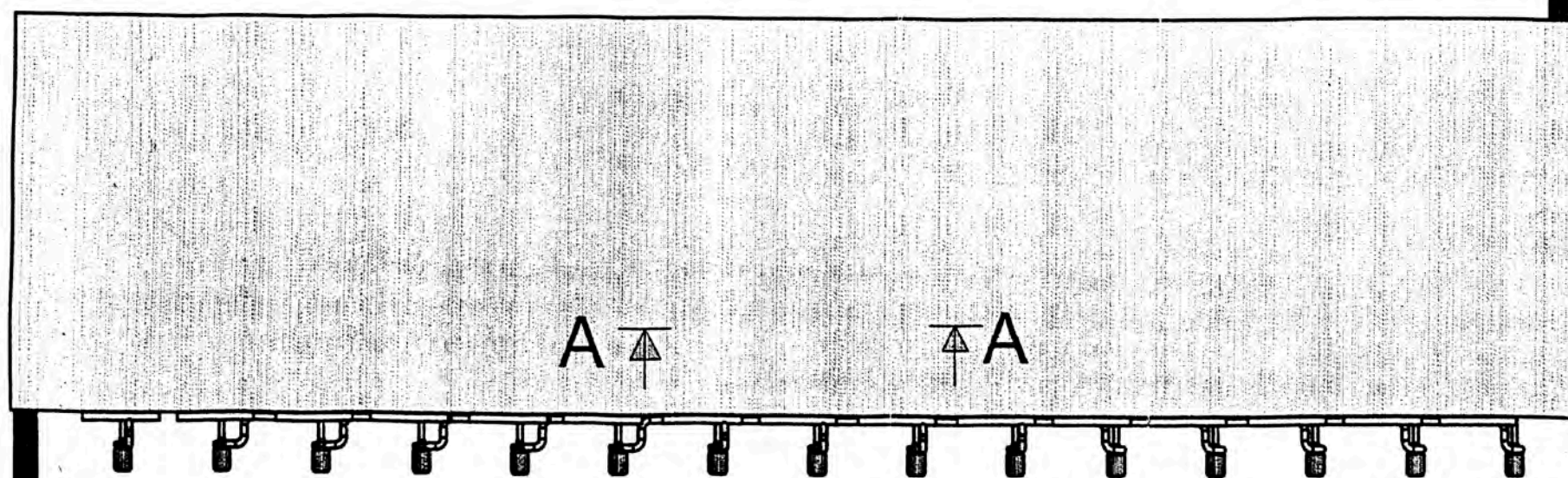
ANEXO 1
PASTEURIZADOR TIPO TUNEL



V. LATERAL DERECHA



V. FRONTAL



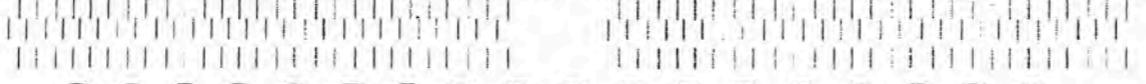
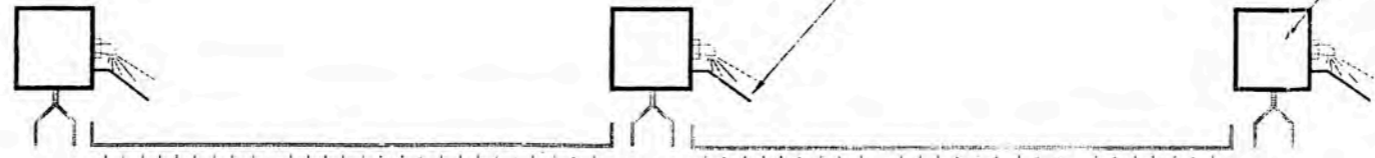
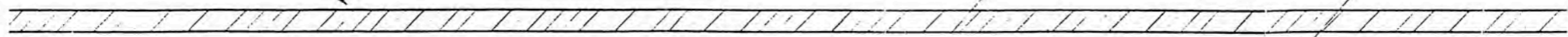
V. SUPERIOR

ANEXO 2
VISTAS DEL PASTEURIZADOR

TECHO DEL
PASTEURIZADOR

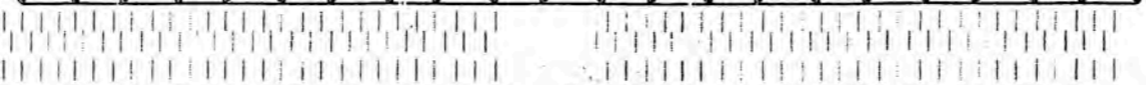
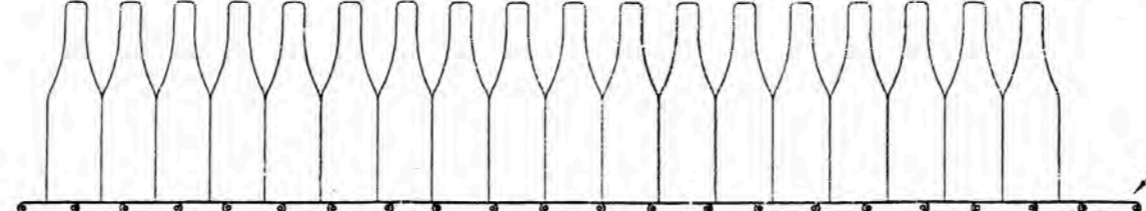
CHAPA DEFLECTORA

ENTRADA DE AGUA
DE BOMBA

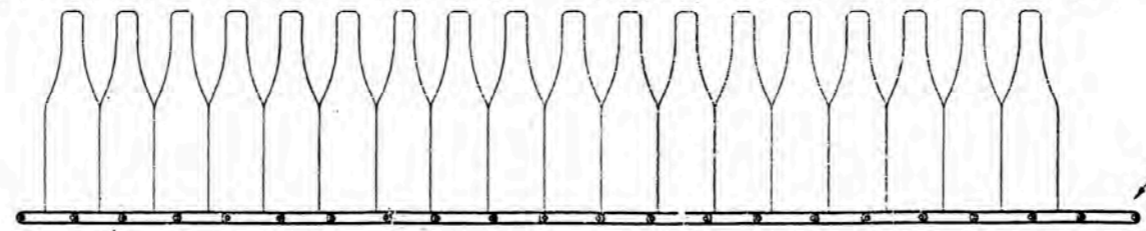


PISO SUPERIOR
(MALLA)

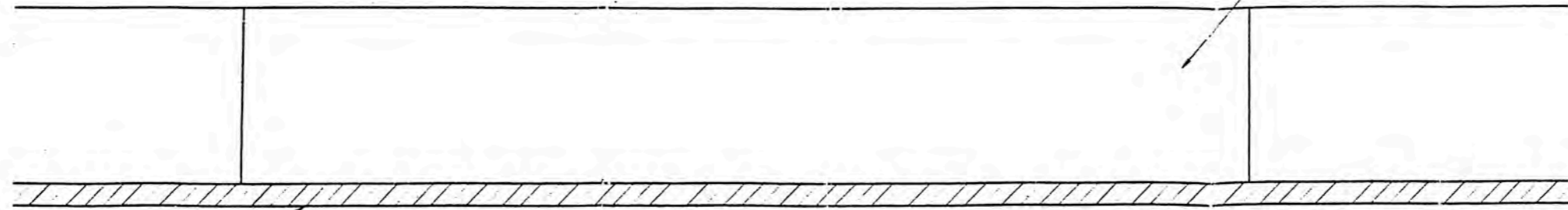
LLUVIAS



PISO INFERIOR
(MALLA)



TANQUES

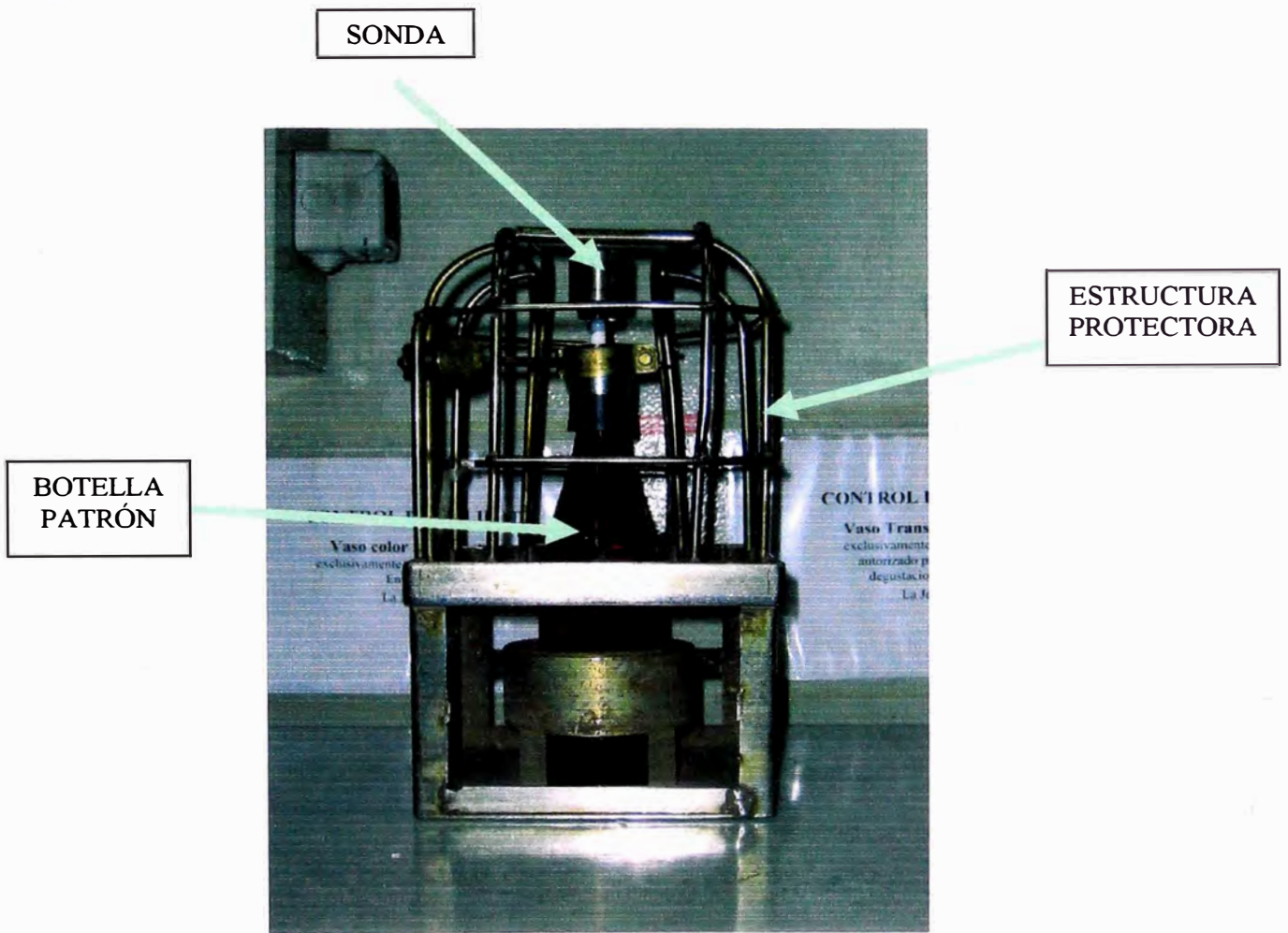


PISO DEL
PASTEURIZADOR

CORTE A-A

ANEXO 3

DETALLE INTERNO
PASTEURIZADOR



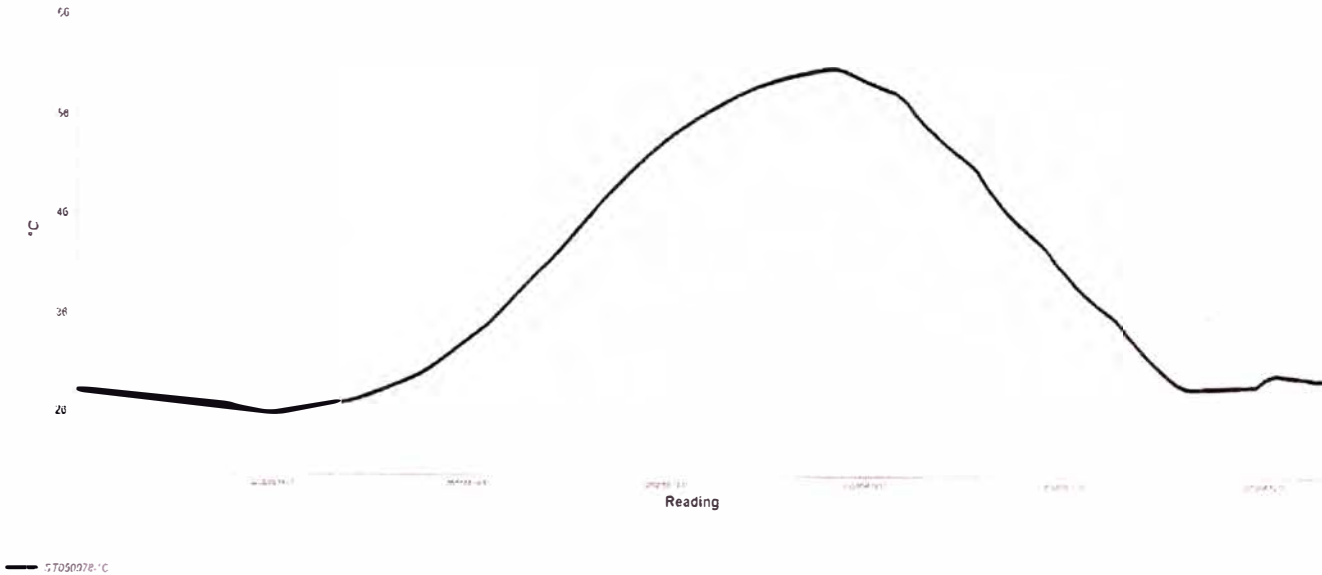
Anexo 4: Medición de Unidades de pasteurización reales



Anexo 5: Sonda de medición.

Backus

Standard Graph



Tipo Lectura: Temperatura
Número de Serie: ST050078
Lectura Mínima: 26.12 °C
Lectura Máxima: 60.52 °C
Read By:

Nombre ensayo: DT100
Lectura Media: 39.510 °C
Desviación Std: 12.210 °C
Pu 8.6

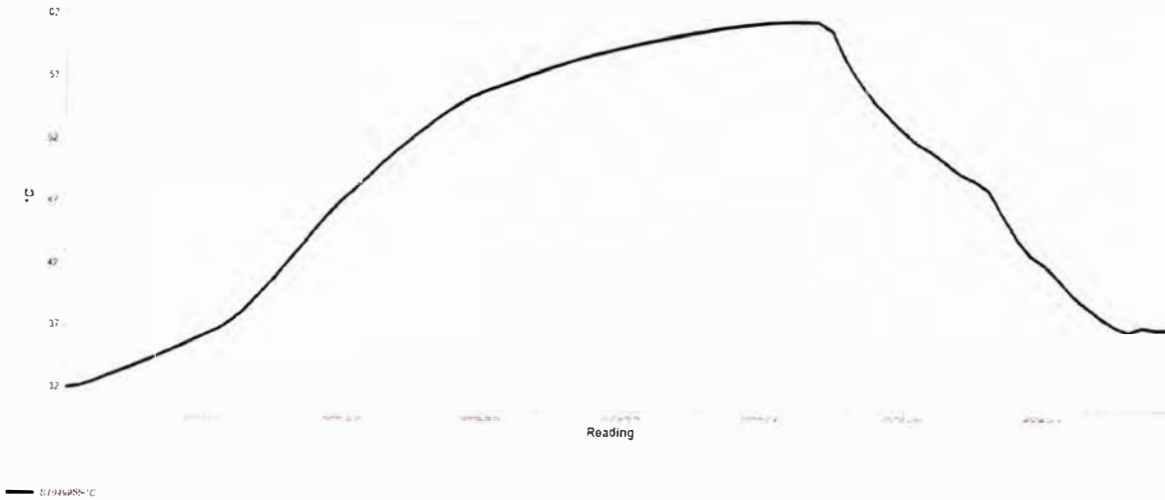
Hora Inicio: 09/26/06 14:11:00
Valor Rango: 1-128
Intervalo Lectura: 00:00,30
No. Puntos Leídos 128
Validación Fecha: Original

DATATRACE

Standard Graph

Backus

Standard Graph



Tipo Lectura: Temperatura
Número de Serie: ST049955
Lectura Mínima: 31.87 °C
Lectura Máxima: 60.83 °C
Read By:

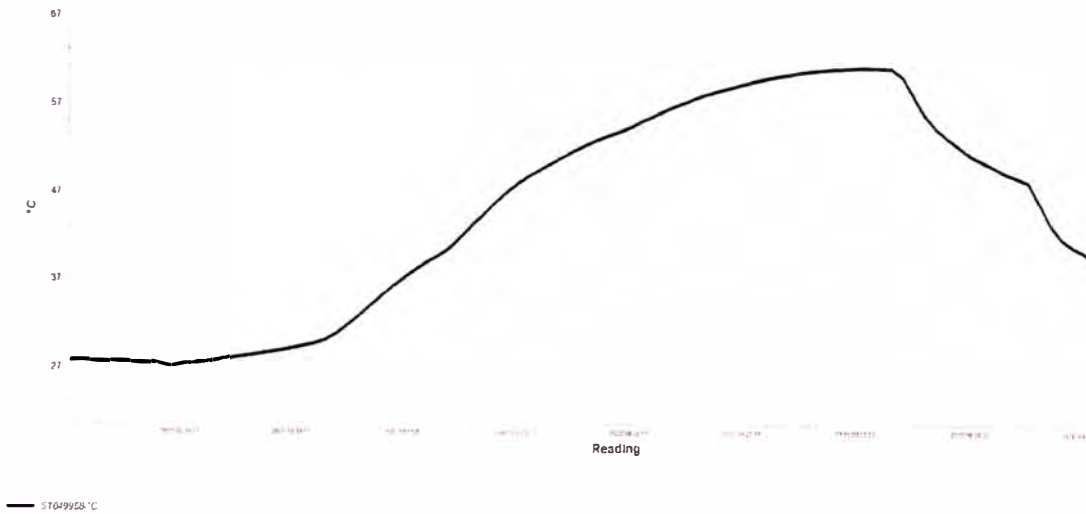
Nombre ensayo: DT100
Lectura Media: 48.270 °C
Desviación Std: 9.770 °C
Pu 11.3

Hora Inicio: 09/07/06 20:18:00
Valor Rango: 1-80
Intervalo Lectura: 00:00:30
No. Puntos Leídos 80
Validación Fecha: Original

Anexo 7. Curva de pasteurización Línea 2 – Formato 620 ml.

Backus

Standard Graph



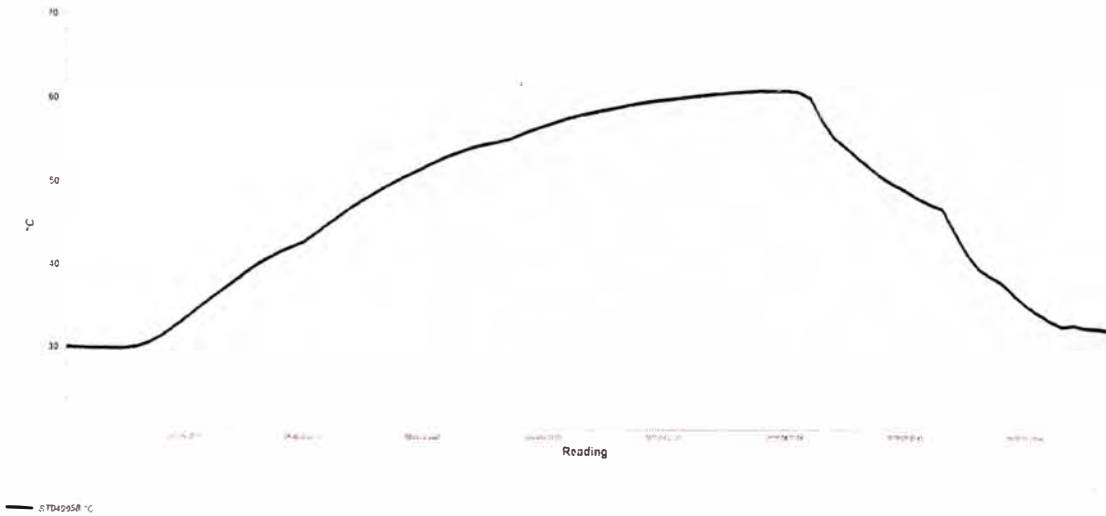
Tipo Lectura: Temperatura
Número de Serie: ST049958
Lectura Mínima: 26.52 °C
Lectura Máxima: 60.33 °C
Read By:

Nombre ensayo: DT100
Lectura Media: 43.300 °C
Desviación Std: 12.020 °C
Pu 9.1

Hora Inicio: 08/31/06 19:46:00
Valor Rango: 1-100
Intervalo Lectura: 00:00:30
No. Puntos Leídos: 100
Validación Fecha: Original

Backus

Standard Graph



Tipo Lectura: Temperatura
Número de Serie: ST049958
Lectura Mínima: 29.83 °C
Lectura Máxima: 60.44 °C
Read By:

Nombre ensayo: DT100
Lectura Media: 46.530 °C
Desviación Std: 10.680 °C
Pu 10.3

Hora Inicio: 09/05/06 20:06:00
Valor Rango: 1-89
Intervalo Lectura: 00:00:30
No. Puntos Leídos 89
Validación Fecha: Original



Anexo 11. Vista frontal de un pasteurizador tipo túnel.