

**Universidad de Matanzas**



**Facultad de Ciencias Técnicas  
Departamento de Química**

**Trabajo de Diploma para la obtención del  
Título de Ingeniero Químico.**

**Título: Rediseño del sistema de pasteurización para la  
producción de queso crema en el Combinado Lácteo  
"Germán Hernández Salas".**

**Autor:**

**Merlyn Daydee Andux Utria**

**Tutor:**

**Dr.C. Agustín Benítez Hernández.**

**Ing. Addiel Crossier Guach.**

**Matanzas, 2019**

*No es la especie más fuerte  
la que sobrevive, ni la más  
inteligente, sino la que  
responde mejor al cambio.*

*Charles Darwin.*

## **Declaración de Autoridad**

Yo, Merlyn Daydee Andux Utria, declaro ser el único autor de esta investigación titulada: “Determinación de las condiciones de operación y diseño del sistema de pasteurización para la obtención de queso crema en el combinado lácteo “Germán Hernández Salas”, realizada en la Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos”, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y, en calidad de tal, autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada Institución como material de consulta.

**Matanzas, 2019.**



## **Resumen**

El presente trabajo se realiza en la etapa de pasteurización del proceso de producción de queso crema en el combinado lácteo de Cárdenas "Germán Hernández Salas". Tiene como objetivo determinar las condiciones de operación y diseño del sistema de pasteurización que garanticen las temperaturas de trabajo, mediante la evaluación de diferentes casos de estudio. Como resultado se obtuvieron las áreas de intercambio de calor, relativas de cada sección del pasteurizador que garantizan las temperaturas de pasteurización.

## **Abstract**

The present work is carried out in the pasteurization stage of the process of production of cream cheese in the Cárdenas Dairy Combination "Germán Hernández Salas". Its objective is to determine the conditions of operation and design of the pasteurization system that guarantee working temperatures, by evaluating different case studies. As a result, the relative heat exchange areas of each section of the pasteurizer that guarantee the pasteurization temperatures were obtained.

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| CAPÍTULO 1: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.....  | 3  |
| 1.1 Pasteurización.....  | 3  |
| 1.1.1 Objetivo principal de la pasteurización.....   | 4  |
| 1.1.2 Tipos de pasteurización .....  | 5  |
| 1.1.3 Equipos utilizados en la pasteurización .....  | 9  |
| 1.2 Intercambiadores de Placas.....  | 11 |
| 1.3 Simulación. ....   | 17 |
| 1.3.1 Ventajas y desventajas de la simulación de procesos. ....                              | 19 |
| 1.3.2.1 Características del Simulador HYSYS.....   | 22 |
| 1.4 Conclusiones parciales del capítulo. ....  | 23 |
| Capítulo 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....  | 25 |
| 2.1 Descripción tecnológica del proceso de producción de queso crema.....                    | 25 |
| 2.2 Descripción del pasteurizador .....  | 26 |
| 2.3 Metodología para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.<br>.....   | 27 |
| 2.4 Cálculo del área efectiva de transferencia de calor del intercambiador de<br>calor. .... | 29 |
| 2.5 Simulación del caso base. ....   | 31 |
| Capítulo 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....  | 33 |
| 3.1 Metodología para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.<br>.....   | 33 |
| 3.2 Cálculo del área efectiva de transferencia de calor del intercambiador de<br>calor. .... | 35 |
| 3.3 Simulación del caso base. ....   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4 Ajuste de modelo al Caso Base. ....          | 37 |
| 3.5 Análisis de sensibilidad del caso base. .... | 38 |
| 3.6 Diseño de experimento. ....                  | 40 |
| 3.7 Análisis económico. ....                     | 43 |
| 3.8 Conclusiones parciales del capítulo. ....    | 44 |
| Conclusiones.....                                | 45 |
| Recomendaciones.....                             | 46 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                               | 47 |
| ANEXOS .....                                     | 53 |

## INTRODUCCIÓN

La industria láctea tiene como materia prima principal la leche procedente de los animales de abasto (diferentes razas vacunas). Se trata de uno de los alimentos más básicos de la humanidad. El progreso de esta industria ha mejorado en la actualidad a la alimentación cotidiana, aumentando el número de posibles alimentos disponibles en la dieta diaria de los niños y ancianos, entre los cuales los de mayor consumo son los quesos, yogurt, crema, mantequilla, dulce de leche, postres saborizados, helados, entre otros(Álvarez S, 2016).

El aumento de la producción ha ido unido con un esfuerzo progresivo en la vigilancia de la higiene y de las leyes alimentarias de los países intentando regular y unificar los procesos y los productos. (Proyectos Secured-Sica, 2017)

Según Ramos.M et al., (2004) y Gako. W, (2009) en la industria láctea, el proceso de elaboración de queso crema es bastante delicado y uno de los más complicados en relación a los aspectos técnicos de la calidad, como las diversas causas de variación en sus características y riesgos de contaminación que incurren en forma negativa sobre la inocuidad, calidad y valor nutricional del producto que por consecuencia afectan de gran manera en la salud del consumidor.

Debido a las dificultades por las que se afronta el país hace aproximadamente dos años surgió la necesidad de fusionar la planta de queso crema en la UEB de Productos Lácteos de Cárdenas “Germán Hernández Salas” y la planta de helados Nevada. La empresa naciente se nombra Combinado Lácteo de Cárdenas “Germán Hernández Salas”.

En el combinado lácteo el queso de crema se elabora a partir de leche fresca, leche entera en polvo (LEP) y aceite vegetal hasta normalizar los sólidos no grasos (aproximadamente 7 %) y la grasa (aproximadamente 10 %) y así obtener un producto terminado que cumpla con las especificaciones establecidas.

**Problemática:** En el Combinado Lácteo “Germán Hernández Salas” el sistema de pasteurización de la masa estandarizada en la producción de queso crema está formado por un intercambiador de calor de placas que está compuesto por tres zonas: calentamiento, recuperación y enfriamiento. Por roturas u otras razones se le han retirado algunas placas que lo forman. La masa homogenizada que se utiliza para obtener queso crema, cuando pasa a la primera pasteurización debe alcanzar 21°C a la su salida del pasteurizador y no lo está alcanzando.

**Problema:** ¿Cómo modificar el sistema de pasteurización de producción de queso crema para que cada una de las etapas de pasteurización alcance las temperaturas necesarias?

**Hipótesis:** Si se modifican los flujos de utilidades y/o las áreas relativas a cada intercambiador del sistema de pasteurización de la obtención de queso crema se podrá lograr que cada una de las pasteurizaciones alcance las temperaturas de diseño.

**Objetivo general:** Determinar las condiciones de operación y diseño del sistema de pasteurización que garanticen las temperaturas de trabajo, mediante la evaluación simulada de diferentes casos de estudio.

**Objetivos específicos:**

1. Evaluar el sistema de pasteurización actual.
2. Proponer diferentes alternativas de flujo de utilidades y áreas de transferencia de calor mediante un diseño experimental.
3. Evaluar técnica y económicamente, mediante simulación, las diferentes alternativas propuestas.

## **CAPÍTULO 1: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica para describir el estado actual de la temática de investigación, haciendo uso de investigaciones realizadas en los últimos años, sobre pasteurización, los equipos utilizados para la pasteurización, los intercambiadores de placas utilizados en la industria láctea como pasteurizadores y el uso de la simulación en la industria química y en particular en la industria láctea.

### **1.1 Pasteurización**

El término pasteurización se deriva de mediados del siglo XIX cuando un químico francés llamado Luis Pasteur lo determinó mediante experimentos; pero no fue hasta finales de ese siglo que este proceso se empezó a llevar a cabo en la leche. Desde entonces la pasteurización juega un papel importante en la seguridad alimentaria.(Gako. W, 2009)

Según varios autores Galván M. (2005), González M (2007), Pelayo (2010), Feliz D (2010), Lezama (2012), Vela (2013), Martínez M et al, (2013), Zamorán (2013), Olodoño Y (2014), Peng et.al (2016), Cabrera (2016), Gimferrer N 2018, Rubino (2018) la pasteurización, a veces denominada pasterización, es el proceso térmico que se realizan a alimentos líquidos, generalmente productos lácteos, para eliminar microorganismos patógenos como: bacterias, protozoos, mohos o levaduras, o para desactivar las enzimas que modifican los sabores de ciertos alimentos, para de esta forma extender la vida útil de los productos varios días.

Según Pelayo (2010) y Vela (2013) no obstante, en la pasteurización se emplean generalmente temperaturas por debajo del punto de ebullición (en cualquier tipo de alimento). La pasteurización es muy efectiva en los zumos debido a que son medios ácidos y evitan la proliferación de microorganismos esporulados, los más resistentes a las altas temperaturas

El tiempo de pasteurización es un limitante importante, ya que si el tratamiento térmico es excesivo el producto pierde su valor nutritivo y puede incluso contraer características desagradables en su gusto, aroma, color y textura. La duración del

proceso debe ser la óptima, ya que si es breve no se alcanza a destruir el número suficiente de microorganismos y, por lo tanto, podría volver a aumentar su número hasta niveles que pongan en riesgo la salud de los consumidores (Martínez M, et al, 2013).

### **1.1.1 Objetivo principal de la pasteurización**

Según diversos publicistas Feliz D (2010), Crossier (2016) y Villacrés (2018) uno de los objetivos del tratamiento térmico es la "esterilización parcial" de los alimentos líquidos, alterando lo menos posible el valor nutricional de los alimentos, la estructura física, los componentes químicos y las propiedades organolépticas de éstos; evitando así cualquier riesgo de transmisión de enfermedades al consumidor. Tras la operación de pasteurización, los productos tratados se enfrían rápidamente y se sellan herméticamente con fines de seguridad alimentaria; por esta razón, es básico en la pasteurización el conocimiento del mecanismo de la transferencia de calor en los alimentos. A diferencia de la esterilización, la pasteurización no destruye las esporas de los microorganismos, ni elimina todas las células de microorganismos termofílicos.

En la leche el objetivo principal es eliminar el microorganismo *Coxiella burnetti*, el cual causa la fiebre Q, la cual puede causar neumonía y hepatitis, la tasa de mortalidad de esta es de 1 a 2 % (Feliz D 2010).

En alimentos de baja acidez ( $\text{pH} > 4,6$ ) como la leche, se utiliza para eliminar microorganismos patógenos que no producen esporas, inactivar enzimas y extender la vida útil del producto por varios días en condiciones de refrigeración (Feliz.D, 2010).

En la cerveza el objetivo es la eliminación de microorganismos deteriorantes como *Lactobacillus* y *Saccharomyces* ( Feliz D, 2011).

En los alimentos ácidos ( $\text{pH} \leq 4,6$ ) la pasteurización es diseñada para destruir microorganismos de descomposición que son resistentes a medios ácidos, regularmente se extiende la vida útil del producto por varios meses (Feliz.D, 2010).

Según Feliz.D, (2011) y Crossier (2016) en jugos el objetivo es la destrucción de pectinasas y el control de microorganismos deteriorantes

En el huevo el objetivo es la destrucción de patógenos como la Salmonella y la eliminación de microorganismos deteriorantes ( Feliz.D, 2011).

En el helado es la destrucción de microorganismos patógenos y deteriorantes (Feliz.D, 2011).

### **1.1.2 Tipos de pasteurización**

Según diferentes literatos Chávez (2006); Ángel et.al (2010); Feliz. D (2010); Lezama (2012); Vela (2013); Olodoño Y (2014), Loarte et.al (2015), Abarca (2018) y Gimferrer N (2018) existen tres tipos de procesos bien diferenciados: pasteurización VAT o lenta, pasteurización a altas temperaturas durante un breve periodo (HTST – *High Temperature / Short Time*) y el proceso a ultra-altas temperaturas (UHT – *Ultra – High Temperature*).

#### **Proceso VAT**

Este fue el primer método de pasteurización, aunque se ha ido renovando por sistemas más eficaces. Este proceso consiste en calentar grandes volúmenes de leche en un recipiente estanco a 63 °C durante 30 minutos, para luego dejar enfriar lentamente. Luego debe pasar mucho tiempo para continuar con el proceso de envasado del producto, a veces más de 24 horas.

Luego de los 30 minutos, la leche es enfriada a temperaturas entre 4 y 10 °C según la conveniencia. Para efectuar este enfriamiento se puede usar el mismo recipiente haciendo circular por la camisa de doble fondo agua helada hasta que la leche tenga la temperatura deseada. Otra manera, es enfriar utilizando el enfriador de superficie (o cortina de enfriamiento). El uso de la pasteurización lenta es adecuada para procesar pequeñas cantidades de leche hasta aproximadamente 2000 litros diarios, de lo contrario no es aconsejable.

## Ventajas

- Evita la proliferación de los microorganismos.

## Desventajas

- La leche se tiene que dejar enfriar lentamente.
- Tiene un gran tiempo de residencia para poder continuar con el proceso de envasado del producto, a veces más de 24 horas.

## **Proceso HTST**

Este método es empleado en los líquidos a granel, como la leche, los zumos de fruta, cerveza, etc. Por regla general es el más conveniente, ya que expone al alimento a grandes temperaturas durante un periodo breve y además se necesita poco equipamiento industrial para realizar este proceso.

Existen dos métodos distintos bajo la categoría de pasteurización *HTST*:

- Proceso “batch”: una gran cantidad de leche se calienta en un recipiente estanco (autoclave). Es un método aplicado hoy en día, sobre todo por los pequeños productores debido a que es un proceso sencillo.
- Proceso de “flujo continuo”: el alimento se mantiene entre dos placas de metal, también denominadas intercambiador de calor de placas (PHE) o un intercambiador de calor de forma tubular. Este método es el más aplicado por las industrias alimenticias a una mayor escala, ya que el método permite realizar la pasteurización de grandes cantidades de alimento en poco tiempo.

Esta pasteurización se realiza en intercambiadores de calor de placas, el recorrido que hace la leche en este proceso es el siguiente:

- La leche llega al equipo intercambiador a 4 °C aproximadamente, proveniente de un tanque regulador; en el primer tramo se calienta por regeneración.

- En esta sección de regeneración o precalentamiento, la leche cruda se calienta a 58 °C aproximadamente por medio de la leche ya pasteurizada cuya temperatura se aprovecha en esta zona de regeneración.
- Al salir de la sección de regeneración, la leche pasa a través de un filtro que elimina impurezas que pueda obtener, luego la leche pasa a los intercambiadores de calor de la zona donde se le calienta hasta la temperatura de pasteurización, esta es 72 – 73 °C por medio de agua caliente.
- Alcanzada esta temperatura la leche pasa a la sección de retención de temperatura; esta sección puede estar constituida por un tubo externo o un retardador incluido en el propio intercambiador; el más común es el tubo de retención; donde la leche es retenida por 15 a 20 segundos.
- A la salida de la zona de retención, la leche pasa por una válvula de desviación; en esta válvula, si la leche no alcanza la temperatura de 72 – 73 °C, automáticamente la hace regresar al tanque regulador para ser luego reprocesada, pero si la leche alcanza la temperatura de 72 – 73 °C, pasa entonces a la zona de regeneración o precalentamiento, donde es enfriada por la leche cruda hasta los 18 °C.
- De aquí la leche pasa a la sección de enfriamiento en donde se distinguen dos zonas: una por donde se hace circular agua fría y la otra en donde circula agua helada, para terminar de esta manera el recorrido de la leche, saliendo del intercambiador a una temperatura de 4 °C.

### Ventajas

- Pueden procesarse en forma continua grandes volúmenes de leche.
- Expone al alimento a altas temperaturas durante un breve período de tiempo.
- Se necesita de poco equipamiento industrial para realizar el proceso, reduciendo de esta manera los costes de mantenimientos de equipos.

- La automatización del proceso asegura una mejor pasteurización.
- Por ser de sistema cerrado se evitan contaminantes.

### Desventajas

- No pueden adaptarse al procesamiento de pequeñas cantidades de leche.
- Necesita de personal altamente calificado para la realización de este trabajo.
- Necesita controles estrictos durante todo el proceso de producción.
- Es difícil un drenaje o desagote completo.

### Proceso UHT

El fundamento de la ultra pasteurización (UHT: *Ultra High Temperature*), o temperatura ultra-alta, es la esterilización del alimento antes de empaquetar, es de flujo continuo y mantiene la leche a una temperatura superior que la empleada en el proceso de HTST, y puede rondar los 138 °C durante un período de al menos 2 o 5 segundos. Debido a este período de exposición, aunque breve, se produce, una mínima degradación del alimento. La leche cuando se etiqueta como “PASTEURIZADA” generalmente se ha tratado con el proceso HTST, mientras que para la leche etiquetada como “ULTRAPASTEURIZADA” o simplemente “UHT”, se debe entender que ha sido tratada por el método “UHT”.

Este método es empleado en productos líquidos como leches, jugos, cremas, yogurt, vinos, aderezos, alimentos con partículas discretas, alimentos para bebé, derivados del tomate, jugos de fruta y verduras, sopas.

Estas plantas de tratamiento de producto trabajan de acuerdo al calentamiento indirecto. Su gran beneficio es que utilizando este método la planta provee una alta seguridad de producción. Este tipo de tecnología ha sido utilizada de manera exitosa por muchos años. Las plantas *UHT* poseen condiciones optimizadas de

flujo que producen un producto de buena calidad y un proceso de alta eficiencia, con una recuperación del calor de hasta 90 %.

### Ventajas

- Alta calidad.
- Vida en estante del producto más larga: pueden esperarse una vida útil superior a 6 meses, sin refrigeración.
- Empaquetamiento más barato: tanto el costo del paquete, almacenamiento y transporte (no se requiere vehículos refrigerados para su transporte).

### Desventajas

- Se necesita un equipo complejo y una planta para empaque aséptico (materiales de empaque, tanques, las bombas, etc.).
- Operarios más experimentados, debe mantenerse esterilidad en el empaque aséptico.
- Mantenimiento de la calidad: las lipasas termo resistentes o proteasas pueden conducir a un deterioro del sabor, envejecimiento de la leche.

### **1.1.3 Equipos utilizados en la pasteurización**

Una instalación de pasteurización se compone de un equipo de calentamiento y un equipo de refrigeración. El conjunto puede complementarse con un intercambiador-recuperador de calor y una sección de mantenimiento. Estos equipos pueden estar montados separadamente o construir un solo bloque. A veces, un solo elemento permite efectuar sucesivamente el calentamiento y la refrigeración, como sucede en la pasteurización baja (González M, 2007).

En todos los tipos de equipos de pasteurización, el calentamiento o la refrigeración se efectúan por intercambio de calor, a través de una pared metálica, entre la

mezcla a pasteurizar, por una parte, y un fluido refrigerante o calefactor por otra. Los equipos de pasteurización se distinguen esencialmente por la extensión, la forma y la disposición de las superficies a través de las que tiene lugar el intercambio de calor. La cantidad de calor transmitida por la pared metálica está en función del coeficiente de transmisión de calor de esta pared, de su superficie y de la diferencia de temperatura entre la mezcla y el fluido. El coeficiente de transmisión de calor de la pared depende también de su grado de limpieza (González M, 2007).

Según Cano (2013), Crossier (2016) y Gana, et.al (2017) los equipos pasteurizadores son intercambiadores de calor que pueden ser de placas o de tipo tubular. Estos equipos calientan y enfrían la leche mediante un adecuado balance de materia y energía.

Pasteurizadores tubulares: Existen numerosos modelos constituidos fundamentalmente por un haz de tubos cuyos elementos se unen boca a boca por medio de codos. La mezcla circula por los tubos donde es calentada desde una o dos superficies, según los modelos, por agua que discurre en contracorriente. (Moncada, 2018)

La homogeneidad de la pasteurización es perfecta a causa del pequeño espesor de la corriente de mezcla (5 a 6 mm de media). El trabajo se realiza aislado del aire, y el calentamiento se realiza con agua con unos grados más que la temperatura de pasteurización de la mezcla (González. M, 2007).

La limpieza es una operación prolongada e incómoda y, en algunos modelos, es preciso efectuarla desmontándolos diariamente. Por el contrario, los equipos actuales, de acero inoxidable, permiten una limpieza en circuito, haciendo circular por ellos soluciones detergentes y antisépticas (Cano, 2013).

Los pasteurizadores tubulares son más caros, pero su rendimiento calórico es excelente. Fueron muy utilizados, pero en los últimos años están siendo sustituidos por intercambiadores de placas, menos difíciles de mantener. También

suelen emplearse pasteurizadores tubulares de serpentín, cuyas diferentes partes (recuperador, pasteurizador, sección de mantenimiento y refrigerador de agua) se disponen concéntricamente rodeadas por una cubierta vertical de acero inoxidable. De esta manera se reduce el espacio ocupado por el aparato (Jaramillo, 2007).

#### Pasteurizadores de placas:

Según González M (2007), Jaramillo (2007) y Moncada (2018) los modelos de placas son los más utilizados en la actualidad debido a sus numerosas ventajas frente cualquier otro tipo de equipo. Son los pasteurizadores más perfectos; habitualmente funcionan con los mismos límites de temperatura que los indicados para los modelos tubulares modernos. Son excelentes intercambiadores de calor, el efecto bactericida es intenso y la mezcla resulta muy poco modificada. Además, la limpieza puede efectuarse fácilmente en circuito cerrado, aunque tampoco son difíciles de desmontar. Ocupan un espacio comparativamente reducido.

Según los autores Feliz D (2011) y Rubino (2018) los equipos utilizados en la pasteurización dependen del tipo de producto:

-Si el producto es no envasado:

- discontinuo: utilizas cuba-tinas.
- continuo: puedes utilizar placas, tubulares o superficie rascada.

-Si el producto es envasado:

- discontinuo: utilizas retortas a presión atmosférica.
- continuo: utilizas túneles.

## **1.2 Intercambiadores de Placas**

Según Trujillo (2017) y Moncada (2018) la importancia de la transferencia de calor en el procesado de alimentos es obvio, la aplicación de calor logra importantes

cambios en seguridad y en palatabilidad del alimento. Es por esto que muchos de los productos se desarrollan basados en la transferencia de calor.

Según Gut et al. (2017), Crossier (2016), Trujillo (2017) y Moncada (2018) el uso de los intercambiadores de placas es muy popular en la industria de alimentos y bebidas, particularmente para cubrir los exigentes requerimientos higiénicos propios de la industria láctea.

Según Kuppam (2013), Branam (2002) y Moncada (2018) el intercambiador de calor de placas fue inventado hace más de 50 años y actualmente es de gran importancia en la industria láctea y de bebidas. Este tipo de equipo consiste en una serie de placas muy delgadas. Estas placas se colocan paralelas, mínimamente separadas y prensadas en un armazón. Las placas se cierran por sus perímetros mediante juntas de goma (sintética o natural). Las funciones de las juntas son prevenir la mezcla de líquidos y dirigir las corrientes de enfriamiento o calentamiento a seguir su respectiva ruta.

Los intercambiadores de placas tienen muchas aplicaciones en la industria moderna, hasta el punto de desplazar a segundo plano a los intercambiadores de tubo y coraza (Salazar, 2018).

Según Maldonado, et al (2017) y Moncada (2018) el uso de intercambio de calor por medio de placas, es la operación de uso preponderante en la Industria Láctea, ampliamente aplicado en procesos de conservación, tales como la pasteurización y esterilización.

Según Jaramillo (2007), Bellido A (2016) y Moncada (2018) Actualmente, existen diferentes tipos de intercambiadores cuyo diseño y características térmicas distan muchísimos de unos a otros. El uso de los intercambiadores de placas (*PTHEs*, *Plate Heat Exchangers*) ha aumentado en los últimos años, debido a sus múltiples ventajas que ofrecen frente a otro tipo de intercambiadores. Los intercambiadores de placas son elementos compactos, es decir, precisan de pequeños volumen de

espacio y favorecen el desarrollo de elevadas turbulencias en su interior, evitando de este modo la deposición de suciedad.

### **1.2.1 Tipos de intercambiadores de placas**

Según Cheremisinoff (2000), Cengel (2002), Jaramillo (2007), Bellido. A (2016), Crossier (2016), Moncada (2018) y Salazar (2018) existen varios tipos de intercambiadores de calor de placas que se pueden clasificar de la siguiente forma.

- **Según la forma de unión de las placas**

- Mediante juntas: Las placas se unen ejerciendo presión entre ellas mediante las barras del bastidor e interponiendo entre ellas juntas para garantizar la estanqueidad. Se desmonta fácilmente desatornillando las barras de unión, con lo que las operaciones de mantenimiento y limpieza se pueden efectuar rápidamente.

- Soldado: Las placas se unen por medio de soldaduras de manera que no se necesitan juntas para garantizar la estanqueidad. La ventaja principal de este tipo es que pueden utilizarse en aplicaciones donde la presión es un obstáculo para las juntas. Pueden trabajar hasta presiones de unos 30 hasta 32 bares. Por el contrario, presentan el inconveniente principal de que no pueden ser desmontados para su limpieza. Además, ante un cambio en las necesidades del proceso no es posible modificar el número de placas.

- Semisoldado: Los intercambiadores semisoldados combinan la flexibilidad y servicio de los intercambiadores de junta con la seguridad contra rotura de los soldados. Este tipo de intercambiadores consisten en un número par de placas en los que se alternan los canales soldados con los tradicionales canales delimitados por juntas. Uno de los fluidos circula por los canales soldados mientras que el otro lo hace por el sellado con las juntas. De esta manera tenemos que los canales soldados permiten una mayor presión en su interior mientras que los de junta destacan por su facilidad de desmontaje, mantenimiento y limpieza.

- **Según el flujo de los fluidos**

- Flujo contracorriente: el sentido de circulación de un fluido es el contrario al del otro. Son los que se utilizan normalmente. La transferencia de calor en este intercambiador es más efectiva que la del anterior.

- Flujo paralelo: ambos fluidos se desplazan en el mismo sentido. Se utilizan poco.

- **Según el número de pasos**

A diferencia de los intercambiadores de carcasa y tubos, en los intercambiadores de placas es posible manejar los flujos en diferentes arreglos y efectuar la transferencia de calor en múltiples corrientes.

Existen tres configuraciones posibles con un solo equipo:

- Un paso: es el más usado.

- Varios pasos (por lo general dos): pueden ser de dos pasos para cada fluido o tan solo de un paso para uno de ellos y dos para el otro.

Estas configuraciones nos permiten obtener parámetros de operación que sólo serían posibles con la compra de nuevos aparatos.

- **Según el número de circuitos de refrigeración**

- Simple: el refrigerante circula por un solo circuito.

- Doble: el refrigerante se distribuye a través de dos circuitos independientes. Las ventajas que se consiguen con esta distribución son la simplicidad y mejor control de la temperatura de los fluidos de trabajo.

La importancia del intercambiador de placa se debe a tres aspectos:

- Las placas ultra delgadas ofrecen un alto coeficiente de intercambio térmico, por lo que son más eficientes.
- Requieren poco espacio para su montaje, frente a los intercambiadores de calor de carcasa y tubo.

- El mantenimiento es sencillo, ya que en caso de incrustaciones su desmontaje y limpieza es fácil.

### **1.2.2 Aplicaciones de los intercambiadores de placas**

Según Moncada (2018) y Salazar, (2018) actualmente los intercambiadores de placas se desenvuelven en numerosas aplicaciones industriales. Por sus ventajas son ampliamente utilizados, salvo en aquellas aplicaciones en las que la temperatura, la presión o los caudales son muy elevados. A continuación, se exponen diversos ejemplos de aplicaciones:

- Industria alimentaria. Su facilidad de limpieza y el breve tiempo de residencia de los fluidos en su interior los hace adecuados para cumplir con el requisito de sanidad, básico para esta industria. Ej.: pasteurización de alimentos líquidos, enfriamiento de bebidas para embotellado.
- Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Circuitos cerrados de enfriamiento, máquinas frigoríficas, aislamiento de torres de enfriamiento, etc.
- Refrigeración. Enfriamiento de producto por evaporación de refrigerante, condensación del refrigerante.
- Recuperación de calor.
- Industria minera. Utilizados para enfriamiento de soluciones de ácido sulfúrico.
- Industria del acero. Enfriamiento de coladas continuas.
- Industria petrolera. Condensación de hidrocarburos.
- Industria azucarera. Evaporación de jugo de caña.
- Industria petroquímica. Enfriamiento y calentamiento, condensación.
- Industria química. Como condensadores y/o evaporadores.
- Industria aceitera. Enfriamiento y calentamiento de aceite vegetal.
- Industria ligera: enfriamiento de aceite hidráulico, enfriamiento de motores de combustión, enfriamiento de tinas de templado, enfriamiento de líneas de pintura automotriz, etc.

### **1.2.3 Ventajas y limitaciones de los intercambiadores de placas**

Según Vilches K (2013), Bellido. A (2016) y Salazar (2018) los intercambiadores de placas tienen diversas ventajas y limitaciones:

#### **Ventajas**

Los intercambiadores de calor de placas presentan las siguientes ventajas:

- Coeficientes de transferencia de calor elevados que hacen que el área de transferencia necesaria sea pequeña. Para el mismo calor intercambiado, el área necesaria es menor de la mitad que para un intercambiador de carcasa y tubos.
- Fácil montaje y desmontaje: las operaciones de mantenimiento y limpieza se efectúan de manera más fácil y rápida. Todas las superficies se pueden limpiar fácilmente ya sea por métodos manuales o químicos.
- Las roturas o fugas se detectan fácilmente y es sencillo cambiar las juntas.
- Bajo ensuciamiento, ya que se obtiene una turbulencia muy elevada.
- Las temperaturas obtenidas se ajustan mucho a las deseadas.
- Alta compacidad por lo que el volumen que ocupan es muy pequeño.
- En la práctica, las pérdidas de carga son menores en un intercambiador de placas debido a que las velocidades también son menores.

#### **Limitaciones**

- La chapa de metal, esté o no esté ondulada, no es el elemento adecuado para soportar presiones elevadas, de modo que las presiones máximas para los modelos más comunes son de 10 a 15 bar, aunque existen modelos capaces de soportar presiones algo mayores. Este problema no es tan acusado en el caso de los intercambiadores termo-soldados que pueden llegar a soportar presiones que rondan los 30-32 bar. Esto es así gracias a que no tenemos el riesgo de rotura de la junta. Esta es la principal limitación que presenta este intercambiador.

- No puede ser utilizado para líquidos de alta viscosidad ni para aquellos en los que la viscosidad cambia radicalmente a lo largo de su circulación, debido a que se produce una mala distribución del fluido.
- Los intercambiadores de placas no funcionan correctamente con líquidos que tengan sólidos de gran tamaño, debido a la pequeña distancia de separación entre las placas.
- No se utilizan para gases.
- No son convenientes para el uso con líquidos tóxicos o altamente inflamables debido a la posibilidad de rotura de las juntas. Los termosoldados no presentan este problema y pueden utilizarse para este tipo de líquidos siempre y cuando el material sea el adecuado.

### **1.3 Simulación.**

Según Posada et,al (2016) y Gutiérrez (2017) simulación es la imitación de la operación de un proceso del mundo real o de un sistema en el tiempo”, o definido de otra forma; es una técnica, donde un modelo es iterado con diferentes valores de entrada, con la intención de conseguir una completa representación de todos los escenarios que podrían ocurrir en una situación incierta. La simulación es considerada una poderosa herramienta para mejorar el diseño de ingeniería, reducir la inversión de capital, reducir costos u optimizar niveles de producción. La simulación en estado estacionario representa la operación continua sin perturbaciones mientras que la simulación dinámica permite medir el efecto del cambio de variables con el tiempo. Esta última es útil para analizar estrategias de arranques, paros y cambios en el proceso.

La industria química se diferencia de otras industrias fundamentalmente porque sus procesos son de estructura compleja, conformada por muchas etapas cada una de las cuales contiene varios componentes. Esto hace que las ecuaciones que describen las relaciones entre las variables de importancia en el proceso puedan ser desde muy simples hasta muy complejas. Por otra parte, en general se trabajan grandes flujos y cuando estos tienen un alto valor económico cualquier pequeño cambio en las características del diseño o la operación puede tener una

importancia considerable. Otra característica es que en ocasiones las propiedades de los componentes que se procesan no son perfectamente conocidas (Vicente, 2008).

Todo lo anterior y aún otras razones no mencionadas hacen que el ingeniero no deba solamente basarse en la teoría para la ejecución de sus dos tareas más importantes: la operación de las instalaciones existentes y el diseño de nuevas plantas o modificaciones importantes a las existentes; sino que para ser efectiva su labor debe conducir un análisis de carácter complejo el cuál se manifiesta por la multiplicidad y diversidad de las variables y sus relaciones y a la vez realizarlo de forma tal, que esa complejidad no impida llegar a conclusiones claras (Gutiérrez , 2017).

Antes de que pudieran desarrollarse programas generales para la simulación de procesos en computadora fue necesario construir programas específicos para cada problema de procesos a tratar. En la actualidad gran parte del trabajo preciso para desarrollar una simulación puede aliviarse con la ayuda de los lenguajes de simulación que permiten “escribir” el problema para que el ordenador pueda elaborarlo. Estos programas ejecutivos se diseñan para proporcionar (Vicente, 2008).

1. Una estructura generalizada para producir modelos de simulación.
2. Una forma conveniente para transformar un modelo de simulación en un programa de computadora.
3. Un procedimiento rápido para efectuar cambio en el modelo.
4. Un sistema flexible para obtener datos útiles de la simulación.

Según Montes de Oca (2007) y Facultad de Ciencias Químicas (2015) los primeros estudios de simulación en sistemas de procesos químicos fueron realizados en los comienzos de la década de los 50, mediante el uso de computadoras analógicas. Hoy en día un problema de simulación puede ser resuelto:

- Utilizando un lenguaje de programación general.

- Utilizando hojas de cálculo electrónicas.
- Utilizando programas matemáticos.
- Utilizando un simulador de procesos industriales.

La simulación de procesos ya sea a través de simuladores comerciales (Aspen Plus, Hysys, Chemcad, PROII/PROVISION, etc.) o la programación en Excel, MathCAD, MatLab, Visual Basic o cualquier otro lenguaje de programación, es una herramienta que proporciona innumerables facilidades a la industria química, petrolera, energética y demás, contribuyendo a convertir los objetivos de una compañía en realidad, esto ya que una “planta virtual” construida con simuladores es según Broussard, (2002) la mejor forma de ahorrar dinero y tiempo, y de proteger el medio ambiente y las vidas humanas de quienes trabajan en las plantas, esto se consigue puesto que es posible plantear escenarios “what if” y de este modo evitar problemas y consecuencias desastrosas( Posada et,al, 2016).

### **1.3.1 Ventajas y desventajas de la simulación de procesos.**

#### **Ventajas**

Según varios autores Bank (1998), Fogler et, al (2002), Wankat (2002) y Posada et,al (2016) las siguientes ventajas son del uso de simuladores dentro del proceso educativo y dentro de la práctica profesional:

- Los simuladores de procesos permiten acceder a amplias bases de datos termodinámicos útiles en el desarrollo y análisis de experimentos, resolución de problemas, diseño de procesos, etc. Esta cualidad puede ser usada como una fuente de consulta permanente.
- Algunos problemas que necesitan una gran cantidad de cálculos, pueden volverse complejos, consumiendo mucho tiempo y finalmente haciendo que el tiempo dedicado para el análisis no sea suficiente. La simulación de procesos permite resolver problemas de este tipo en forma rápida, proporcionando más tiempo y herramientas para el análisis del problema.
- Varios simuladores de proceso permiten realizar optimizaciones de procesos, estimaciones de costos y estudio de los factores ambientales de

un proceso con el fin de establecer comparaciones entre alternativas para seleccionar la que mejor se acomode a las especificaciones técnicas, económicas y ambientales de un proceso.

- Los simuladores de proceso permiten desarrollar competencias relacionadas con la “habilidad para usar las herramientas modernas de la ingeniería para la práctica de ésta. Por medio del uso de los simuladores, se desarrollan competencias para resolver balances de materia y energía, crear diagramas de flujo, interpretar resultados y gráficos, seleccionar equipos y dispositivos de ingeniería, definir restricciones del sistema, emplear datos y ecuaciones de la heurística, realizar evaluaciones económicas y ambientales, y demás elementos que hacen parte del diseño de procesos y que son necesarios para diseñar desde una unidad de proceso, hasta una planta de procesos químicos o biotecnológicos.
- La simulación de procesos es una práctica integradora de las diferentes asignaturas de la carrera ingeniería química, lo cual ayuda a que los estudiantes tengan la capacidad de resolver y definir problemas de ingeniería reales.
- Mejor comprensión de los procesos: con la simulación de procesos es posible responder preguntas del tipo “Por qué” reconstruyendo la escena y examinando “microscópicamente” el sistema para determinar el por qué ocurren los fenómenos.
- La simulación de procesos da a los estudiantes una prueba de ingeniería real y los prepara para la práctica en el mundo laboral.
- Es posible contrarrestar métodos y cálculos vistos en clase y comparar con el simulador problemas cuya solución fue previamente encontrada en forma manual. Si los resultados son similares, se puede proceder a variar con el simulador las condiciones del sistema y con esto responder preguntas del tipo “What if” (qué pasaría si se varía la presión,...), y de este modo ayudar a una mayor comprensión de los conceptos. Si las soluciones no concuerdan, se ayuda a entender que los simuladores no son perfectos. Este tipo de análisis “What if” son muy usados en la industria para el diseño

y el rediseño de sistemas, por tanto se convierte en una herramienta muy importante para el Ingeniero de Procesos.

- Dentro de la industria, los simuladores son útiles en investigación y desarrollo al agilizar los ensayos en laboratorios y en plantas piloto porque permite predecir resultados o rangos de trabajo óptimo lo cual ahorra mucho tiempo en la experimentación; y en la etapa de diseño, al ofrecer una manera rápida de diseñar un proceso para establecer comparaciones entre diferentes alternativas.
- Experimentación rápida y económica aún en condiciones extremas (estudios paramétricos). El costo típico de una simulación es menos del 1% del costo total de la implementación de un diseño o de un rediseño.
- Los simuladores son muy útiles en el entrenamiento de personal. Los operadores de las plantas pueden aprender de sus errores y de este modo, aprender a operar mejor.

### **Desventajas**

Según varios autores Bank (1998), Fogler et.al (2002), Wankat (2002) y Posada et,al (2016) a pesar de la gran acogida de los simuladores, se debe tener en cuenta que se corren algunos peligros en el empleo de éstos. A continuación se citan algunas desventajas dentro del proceso educativo y dentro de la práctica como profesional:

- Para principiantes, la simulación de procesos les puede parecer muy difícil y tienden a desanimarse cuando no obtienen los resultados esperados.
- El simulador de procesos tiende a ser visto como una caja negra si no se conocen los modelos de cálculos que el simulador utiliza y si no se estudian previamente a su uso los conceptos y algoritmos necesarios para resolver el problema en cuestión.
- En la solución de problemas, no hay siempre una interacción detallada con el problema tal como se hace en la solución manual en donde el que resuelve el problema es forzado a pensar profundamente en éste, a

encontrar aproximaciones para resolverlo, y a evaluar y reevaluar las suposiciones hechas. Muchas veces la simulación esconde la complejidad del problema y por tanto, esconde también aspectos importantes de su entendimiento.

- Los resultados que arrojan los simuladores pueden ser en ocasiones difíciles de interpretar, esto ya que muchas salidas son esencialmente variables aleatorias basadas usualmente en entradas aleatorias, por tanto puede ser difícil determinar cuándo una observación es un resultado de las interrelaciones del sistema o cuándo es aleatoriedad.
- Se puede caer en optar por la simulación en casos donde una solución analítica es posible o incluso preferible.

#### **1.3.2.1 Características del Simulador HYSYS.**

Este software ha venido siendo y es, junto con ASPEN, uno de los dos mayores programas de Simulación en Ingeniería Química. Este programa tan sólo puede compararse con ASPEN (Vicente, 2008).

Según Vicente (2008) y Posada et al (2016), sus principales características:

- Presenta una enorme base de datos de propiedades de sustancias.
- Contiene una enorme base de datos de modelos termodinámicos, incluyendo parámetros para muchas mezclas.
- Gran cantidad de operaciones disponibles.
- Numerosos parámetros disponibles.
- Se incluye un optimizador.
- Módulos adicionales disponibles (Economix, Distil, Optimización RTO, etc...).
- Integración progresiva en el estándar CAPE.
- Filosofía de cálculo con propagación de variables hacia delante y atrás.

Pero como todo software también presenta ventajas y desventajas.

Según Vicente (2008), sus **principales ventajas:**

- Es utilizado en las grandes compañías, sobre todo en la Industria del Petróleo, para la que dispone de potentes módulos. Considerado como un simulador "serio".
- Más económico que ASPEN (Aproximadamente la mitad).
- El método de cálculo de propagación hacia delante y hacia atrás de variables permite ir conociendo el estado de cálculo y los posibles problemas de convergencia de algunas unidades antes de completar el diagrama de flujo.

Según Vicente (2008), **principales desventajas:**

- Optimizador menos depurado y eficaz que ASPEN.
- Filosofía de cálculo distinta a la del resto de los simuladores. El método de propagación de variables causa a veces problemas de convergencia si no se apaga el motor de cálculo cuando se está completando el diagrama de flujo. Esto obliga a llevar un control sobre los grados de libertad disponibles.
- Presenta menos módulos disponibles que el ASPEN.
- Necesidad definir las corrientes de corte y reciclos.
- Interfaz menos amigable que ASPEN.
- Entorno de trabajo sensiblemente menos organizado que en ASPEN.
- No está desarrollando la Resolución Orientada a Ecuaciones (EO - *Equation Oriented*).

#### **1.4 Conclusiones parciales del capítulo.**

Después de la exhaustiva búsqueda bibliográfica para la realización de este capítulo, se puede concluir que

- Existen tres tipos de pasteurización: pasteurización lenta o *VAT*, la pasteurización a altas temperaturas en un breve período de tiempo o *HTST* y la pasteurización a ultra-altas temperaturas o *UHT*. De ellas la que más se utiliza es la *HTST*.
- De los equipos que se utiliza para la pasteurización el que más se utiliza es el intercambiador de calor de placas, ya que es el intercambiador por

defecto para el intercambio líquido-líquido a bajas presiones. Este tipo de intercambiador es el más utilizado en la industria láctea para llevar a cabo el proceso de pasteurización.

- La simulación de procesos permite resolver problemas iterativos de gran complejidad en forma rápida, proporcionando más tiempo y herramientas para el análisis del problema.

## **Capítulo 2: MATERIALES Y MÉTODOS.**

En este capítulo se realiza la descripción tecnológica del proceso de producción de queso crema y la descripción detallada del pasteurizador instalado actualmente en la fábrica. Además se aplica la metodología de Kern, modificada por Haslego y Polley (2002), para determinar los coeficientes de transferencia de calor actuales del pasteurizador instalado en la planta. También se determina el área efectiva de transferencia de calor del pasteurizador y se realiza la simulación del caso base utilizando el software *HYSYS*.

### **2.1 Descripción tecnológica del proceso de producción de queso crema.**

El proceso de producción de queso crema (anexo 1) comienza con la llegada de la leche (materia prima principal) a la fábrica, la misma es abastecida en pipa, llega a una temperatura entre 15 a 20 °C. Luego pasa a la cortina de enfriamiento hasta alcanzar una temperatura entre 4 a 6 °C. Después pasa a ser almacenada en el tanque guarda (tanque de almacenamiento enchaquetado con un sistema de enfriamiento, serpentín, en la camisa), donde la leche se estandariza con la grasa vegetal la cual llega al tanque con una temperatura de 65 °C, lo que garantiza que la leche a la salida del tanque se encuentre entre 12 y 13 °C. Posteriormente comienza el proceso simultáneo de homogenización y pasterización. Para esto se emplea un intercambiador de placas dividido en tres secciones: una de calentamiento, una de recuperación y otra de enfriamiento. Primeramente, pasa por la zona de recuperación donde se eleva la temperatura de la mezcla normalizada hasta el valor apropiado para su homogenización (65 °C), posteriormente pasa al homogeneizador con el objetivo de distribuir uniformemente los glóbulos de grasa en la mezcla normalizada.

A su regreso comienza la primera pasterización en la sección de calentamiento con la intención de disminuir las poblaciones patógenas de microorganismos y desactivar las enzimas que modifican el sabor. La masa homogenizada se somete a un tratamiento térmico a una temperatura promedio de 75 °C con un tiempo de retención de 16 a 20 segundos. De ahí pasa a la zona de recuperación para bajar su temperatura a través su intercambio térmico con la mezcla proveniente del

tanque guarda. La masa homogenizada se enfría hasta 57 °C aproximadamente y la mezcla normalizada incrementa su temperatura hasta el valor apropiado para su homogenización. Posteriormente pasa a la sección de frío hasta alcanzar la temperatura de inoculación del cultivo industrial (23 °C).

La masa estandarizada y pasteurizada pasa al tanque de maduración donde es inoculada con cultivo industrial. Las bacterias producen fermentación láctea en la que transforman los azúcares de la leche en ácidos lácticos, efectuando la coagulación de la mezcla. La masa se deja en completo reposo por un período de 18 horas para obtener una acidez entre 70 y 74 %.

Al día siguiente se adiciona salmuera. La sal además de aportar un sabor salado, se emplea para mejorar la conservación, y para afirmar la textura con su interacción con las proteínas. La masa con salmuera sufre una segunda pasteurización, pasando igualmente por las tres secciones del intercambiador de placas. A la salida de la sección de enfriamiento la masa salada alcanza 11 °C y una acidez entre 60 y 65 %. Se adiciona sorbato de potasio como conservante alimentario, para reducir el desarrollo de levaduras y mohos, mejorando así la vida de mercado del alimento. El proceso continúa con el autoprensado en los volteadores para extraerle el suero. Por último, tiene lugar el proceso de prensado con hielo frappé para mantener el frío y evitar aumento de acidez. Con este proceso se acaba de extraer el suero. Al día siguiente se comienza con el envase del producto terminado.

## **2.2 Descripción del pasteurizador**

El pasteurizador es un intercambiador de placas el cual procesa 3000 L/h, el mismo se encuentra dividido en tres secciones: sección de calentamiento, sección de recuperación y sección de enfriamiento. La zona de calentamiento está formada por 30 placas, la zona de recuperación por 78 y la zona de enfriamiento por 34. Las placas son corrugadas de diseño diagonal, cada placa tiene 0,3 m de ancho, 1,2 m de alto y 0,0007 m de espesor. La zona de calentamiento utiliza 0,94 t/h de vapor para obtener agua saturada como medio de calentamiento, la cual se logra al mezclar agua en condiciones atmosféricas de presión y 30 °C con

el vapor proveniente del generador de vapor a 6 bar de presión. En la zona de enfriamiento se utilizan 55 t/h de agua helada como medio de enfriamiento a 4 °C y 1 bar. El área total de transferencia de calor del pasteurizador es de 51,12 m<sup>2</sup> y el de cada placa es de 0,36 m<sup>2</sup>.

**Tabla 2.1: Datos de temperaturas de entrada y salida por zona de cada fluido.**

| Intercambiadores | Fluido frío |            | Fluido caliente |            |
|------------------|-------------|------------|-----------------|------------|
|                  | T in (°C)   | T out (°C) | T in (°C)       | T out (°C) |
| Calentador       | 65          |            |                 |            |
| Recuperador      | 12          | 65         |                 |            |
| Enfriador        | 4           |            |                 | 23         |

### 2.3 Metodología para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

Para la determinación del coeficiente global de transferencia de calor del pasteurizador, primeramente se consideró cada sección del pasteurizador como tres intercambiadores de calor independientes, de ahí se puso en práctica la metodología expuesta por Haslego y Polley, (2002). Esta metodología se basa en la obtención gráfica del coeficiente individual de transferencia de calor del fluido frío y del fluido caliente, lo que permite determinar el coeficiente global.

1. Cálculo del LMTD en cada una de las zonas de intercambio, mediante la ecuación 2.1:

$$LMTD = \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,out}) - (T_{hot,out} - T_{cold,in})}{\ln \left[ \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,out})}{(T_{hot,out} - T_{cold,in})} \right]} \quad (2.1)$$

Dónde:

LMTD: media logarítmica de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos.

$T_{hot,in}$ : temperatura de entrada del fluido caliente, [°C].

$T_{cold,out}$ : temperatura de salida del fluido frío, [°C].

$T_{hot,out}$ : temperatura de salida del fluido caliente, [°C].

$T_{\text{cold,in}}$ : temperatura de entrada del fluido frío, [°C].

2. Cálculo del NTU para el fluido frío y el fluido caliente,  $NTU_{\text{cold}}$  y  $NTU_{\text{hot}}$ , mediante las ecuaciones 2.2 y 2.3:

$$NTU_{\text{hot}} = \frac{T_{\text{hot,in}} - T_{\text{hot,out}}}{LMTD} \quad (2.2)$$

$$NTU_{\text{cold}} = \frac{T_{\text{cold,out}} - T_{\text{cold,in}}}{LMTD} \quad (2.3)$$

Dónde:

$NTU_{\text{hot}}$ : número de unidades de transferencia para el fluido caliente.

$NTU_{\text{cold}}$ : número de unidades de transferencia para el fluido frío

3. Determinación gráfica del coeficiente individual de transferencia de calor para el fluido frío y el fluido caliente,  $h_{\text{cold}}$  y  $h_{\text{hot}}$ .

Par determinar el coeficiente individual de cada fluido Haslego y Polley (2002) incluye seis gráficas (2-7), las tres primeras para el intercambio de fluidos en base agua (2-4) y las otras (5-7) para el intercambio de hidrocarburos. Cada una de estas gráficas ofrece el rango de los valores de NTU que ellas admiten trabajar, además es necesario tener para entrar en el gráfico: la caída de presión del intercambiador y la viscosidad del fluido; con estos datos el gráfico devuelve un valor de  $h$ .

4. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor,  $U$ .

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{\text{hot}}} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_{\text{cold}}} \quad (2.4)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{hot}}} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_{\text{cold}}}} \quad (2.5)$$

Donde:

$\frac{1}{U}$ : inverso del coeficiente global de transferencia de calor.

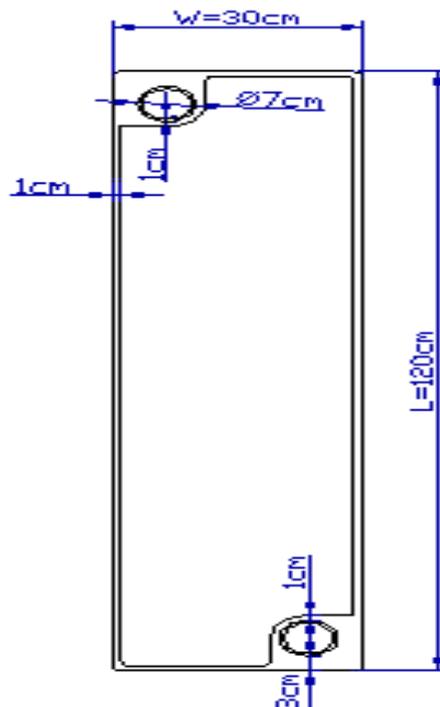
U: coeficiente global de transferencia de calor.

$\Delta x$ : espesor de la placa.

k: conductividad térmica del material de construcción del intercambiador de calor.

#### 2.4 Cálculo del área efectiva de transferencia de calor del intercambiador de calor.

El área efectiva es el área real dónde ocurre la transferencia de calor (Camaraza, 2017). Para determinar el área efectiva del pasteurizador, primeramente se determina el área efectiva de una placa. Las placas son de acero inoxidable de arreglo perpendicular, tiene dos agujeros ubicados en diagonal de 7 cm cada uno de diámetro y presenta las siguientes dimensiones: 120 cm x 30 cm y 0.7 mm de espesor. La placa a su alrededor tiene una junta de 1cm, esta junta también se encuentra en los agujeros como se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1: Dimensiones de una placa del pasteurizador.**

1. Cálculo del área del agujero por dónde circula el fluido.

En la figura 2.1 se observa que la junta también rodea el agujero, se consideró que la figura que se forma es una circunferencia para facilitar el cálculo.

$$A_H = 2 \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (2.6)$$

Donde:

$A_H$ : área que representa los agujeros de la placa, [m<sup>2</sup>].

$D$ : diámetro de la circunferencia que se forma, [m].

2. Cálculo del área una placa sin la junta.

$$A_J = L_1 \cdot W_1 \quad (2.7)$$

Dónde:

$A_J$ : área de una placa sin junta, [m<sup>2</sup>].

$L_1$ : largo de la placa sin la junta, [m<sup>2</sup>].

$W_1$ : ancho de la placa sin la junta, [m<sup>2</sup>].

3. Cálculo del área efectiva de una placa

$$A_{Ep} = A_J - A_H \quad (2.8)$$

Donde:

$A_{Ep}$ : área efectiva de una placa, [m<sup>2</sup>].

4. Cálculo del área efectiva del pasteurizador.

Para calcular el área efectiva del pasteurizador se debe multiplicar el área efectiva de una placa por la cantidad de placas que hay en el pasteurizador. También se puede saber el área efectiva de cada zona del pasteurizador multiplicando el área efectiva de una placa por la cantidad de placas que hay en cada zona.

$$A_E = N \cdot A_{Ep} \quad (2.9)$$

Donde:

$A_E$ : área efectiva del intercambiador de calor, [m<sup>2</sup>].

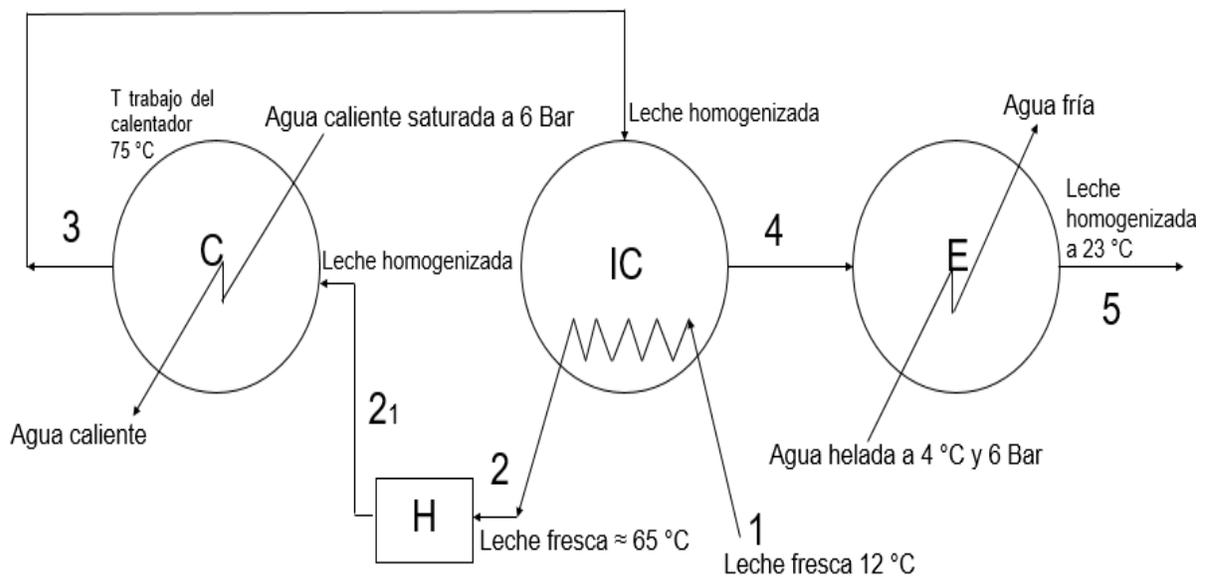
N: número de placas de transferencia de calor.

## 2.5 Simulación del caso base.

Para la simulación del caso base se utiliza el *software* HYSYS. Este *software* como cualquier otro simulador requiere de un diagrama de flujo de información (DFI), un árbol de Stewart y un orden de cálculo.

### Diagrama de flujo de información (DFI)

Para la realización del DFI, se decide descomponer el pasteurizador como: calentador, intercambiador de calor y enfriador; como se muestra a continuación.



**Figura 2.2: Diagrama de flujo de información del proceso.**

Donde:

**C:** Calentador.

**IC:** Intercambiador de calor.

**E:** Enfriador.

**H:** Homogenizador.

## Capítulo 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se determina los coeficientes globales de transferencia de calor en cada una de las áreas del pasteurizador y el área efectiva de transferencia de calor del pasteurizador. Se realiza un ajuste del modelo al caso base y un análisis de sensibilidad. Además se realiza el rediseño del sistema actual proponiendo diferentes casos de estudios donde se modifican las diferentes áreas relativas; y se selecciona mediante simulación la variante más adecuada; y se realiza el análisis económico de la propuesta.

### 3.1 Metodología para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

1. Cálculo del LMTD en cada una de las zonas de intercambio.

A continuación se muestra una tabla con los datos de temperaturas de entrada y de salida por cada zona de cada fluido.

**Tabla 3.1: Datos de temperaturas de entrada y salida por zona de cada fluido.**

| Intercambiadores | Fluido frío |            | Fluido caliente |            |
|------------------|-------------|------------|-----------------|------------|
|                  | T in (°C)   | T out (°C) | T in (°C)       | T out (°C) |
| Calentador       | 63,62       | 100,3      | 156,2           | 132,3      |
| Recuperador      | 12          | 63,67      | 100,3           | 48,54      |
| Enfriador        | 4           | 5,44       | 48,54           | 23,64      |

En la zona de calentamiento, el intercambio ocurre entre agua y leche homogenizada utilizando como fluido caliente el agua y como fluido frío la leche homogenizada. En la zona de recuperación, el intercambio ocurre leche con leche por lo que se utiliza como fluido caliente leche homogenizada y como fluido frío la leche fresca. En la zona de enfriamiento el intercambio, al igual que en la zona de calentamiento ocurre entre agua y leche homogenizada utilizando como fluido caliente la leche homogenizada y como fluido frío agua helada.

**Tabla 3.2: Resultados de LMTD por cada zona.**

| Intercambiadores | LMTD    |
|------------------|---------|
| Calentador       | 62,0709 |
| Recuperador      | 36,585  |
| Enfriador        | 29,849  |

2. Cálculo del NTU para el fluido frío y el fluido caliente,  $NTU_{cold}$  y  $NTU_{hot}$ .

**Tabla 3.3: Resultados de NTU por cada zona.**

| Intercambiadores | NTU cold | NTU hot |
|------------------|----------|---------|
| Calentador       | 0,59094  | 0,38504 |
| Recuperador      | 1,41233  | 1,41479 |
| Enfriador        | 0,04824  | 0,8342  |

3. Determinación gráfica del coeficiente individual de transferencia de calor para el fluido frío y el fluido caliente,  $h_{cold}$  y  $h_{hot}$ .

Como los valores de NTU están en el rango de 0,25 a 2, se utiliza la figura 2 representada por Haslego y Polley (2002) (anexo 2). También es necesario conocer la caída de presión que, según la reportada por la empresa es  $\Delta P = 15$  PSIA, además es necesario tener las viscosidades de los fluidos que intercambian en cada una de las secciones. Estos datos de viscosidad fueron tomadas de Engeneering Toolbox (2019), viscosidad del agua fría 1,55 cP, agua caliente 0,33 cP y leche homogenizada 1,4 cP.

**Tabla 3.4: Resultados de los coeficiente individuales de transferencia de calor para cada uno de los fluidos en cada zona.**

| Intercambiadores | h W/m <sup>2</sup> °K |        |
|------------------|-----------------------|--------|
|                  | h cold                | h hot  |
| Calentador       | 132,92                | 100,06 |
| Recuperador      | 468,9                 | 376,84 |
| Enfriador        | 146,5                 | 136,64 |

4. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, U.

**Tabla 3.5: Resultados de los coeficientes globales de transferencia de calor para cada una de los zona.**

| Intercambiadores | U (W/m <sup>2</sup> °C) |
|------------------|-------------------------|
| Calentador       | 235,2                   |
| Recuperador      | 847,9                   |
| Enfriador        | 285,3                   |

### 3.2 Cálculo del área efectiva de transferencia de calor del intercambiador de calor.

1. Cálculo del área del agujero por dónde circula el fluido.

Para el cálculo del agujero primeramente se debe determinar el diámetro de la circunferencia, el diámetro  $D = 0,1$  m, para determinar este valor se tuvo en cuenta la distancia de separación del agujero con respecto al borde superior de la placa más el diámetro del agujero por dónde circula el fluido.

$$A_H = 1,57 \text{ m}^2$$

2. Cálculo del área de una placa sin la junta.

Para determinar el área de una placa sin junta se le quitó de las dimensiones reales de la placa, 120 cm x 30 cm, 2cm ya que la junta está ubicada a 1 cm de cada borde. Por lo que las nuevas dimensiones serían 118 cm x 28 cm. Dónde  $L_1 = 1,18$  m y  $W_1 = 0,28$  m.

$$A_J = 0,3304 \text{ m}^2$$

3. Cálculo del área efectiva de una placa.

$$A_{Ep} = 0,3147 \text{ m}^2$$

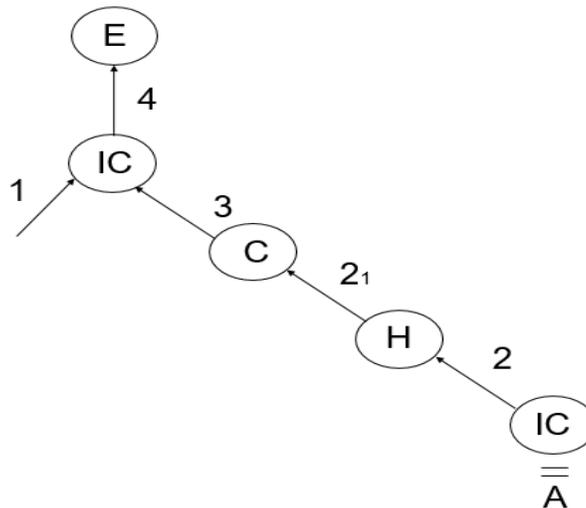
4. Cálculo del área efectiva del pasteurizador.

**Tabla 3.5: Área efectiva por cada zona del pasteurizador.**

| Zonas         | Cantidad de placas | Área efectiva (m <sup>2</sup> ) |
|---------------|--------------------|---------------------------------|
| Calentamiento | 30                 | 9,45                            |
| Recuperación  | 78                 | 24,57                           |
| Enfriamiento  | 34                 | 10,71                           |
| <b>Total</b>  | <b>142</b>         | <b>44,73</b>                    |

### 3.3 Simulación del caso base.

#### Árbol de Stewart.



**Figura 2.3: Árbol de Stewart para la simulación del caso base.**

#### Matriz de ciclos y corrientes.

| Ciclo/Matriz | 1 | 2 | 2 <sub>1</sub> | 3 | 4 |
|--------------|---|---|----------------|---|---|
| A            | 1 | 1 | 1              | 1 | 1 |
| Total        | 1 | 1 | 1              | 1 | 1 |

frecuencia → 1 } frecuencia máxima por tanto hay una  
 cantidad de ciclos → 1 } corriente de corte

Posibles corrientes de corte: 1, 2, 2<sub>1</sub>, 3 y 4.

Se escoge 2 como corriente de corte porque es la entrada al homogenizador.

**Orden de cálculo:** asumir 2a, H, C, IC, chequear convergencia 2a con 2, E.

### 3.4 Ajuste de modelo al Caso Base.

El ajuste del modelo se realiza para conocer cuán cerca están los datos de la simulación de la realidad. Para esto se determina un error el cual según Sarget, (2009) no debe ser mayor de un 10 %. Este error máximo permisible se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{valor real} - \text{valor simulación}|}{\text{valor real}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Para realizar esta prueba se tienen en cuenta los siguientes parámetros: temperatura de la leche fresca a la salida de la zona de recuperación ( $T_{LF}$  salida del recuperador), temperatura de la leche homogenizada a la salida de la zona de enfriamiento ( $T_{LH}$  salida de enfriamiento) y la temperatura media de trabajo de la zona de calentamiento ( $T_m$  zona de calentamiento).

$$T_m = \frac{T_{LH \text{ salida calentador}} + T_{LF \text{ salida recuperador}}}{2} \quad (3.2)$$

**Tabla 3.6: Ajuste de modelo al caso base.**

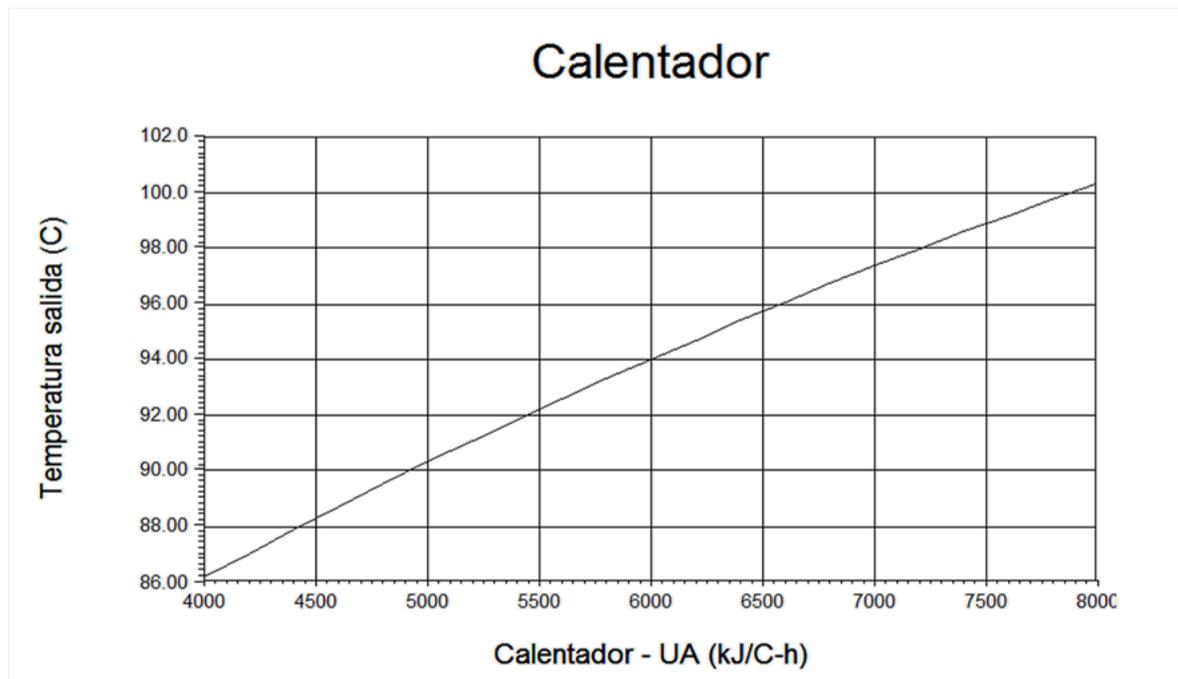
| Parámetros                      | Valor real | Valor simulación | Error  |
|---------------------------------|------------|------------------|--------|
| $T_{LF}$ salida del recuperador | 65 °C      | 64 °C            | 1,54 % |
| $T_{LH}$ salida de enfriamiento | 23 °C      | 24 °C            | 4,35 % |
| $T_m$ zona de calentamiento     | 75 °C      | 82 °C            | 9,33 % |

Como se puede apreciar en la tabla 3.6 todos los errores se encuentran en el rango permisible, lo que garantiza un buen ajuste del modelo.

### 3.5 Análisis de sensibilidad del caso base.

El análisis de sensibilidad se realiza para conocer cómo responde el software a diferentes cambios de variables de diseño. En este caso se analiza los cambios de la temperatura frente a cambios de área efectiva dentro de cada una de las zonas del pasteurizador.

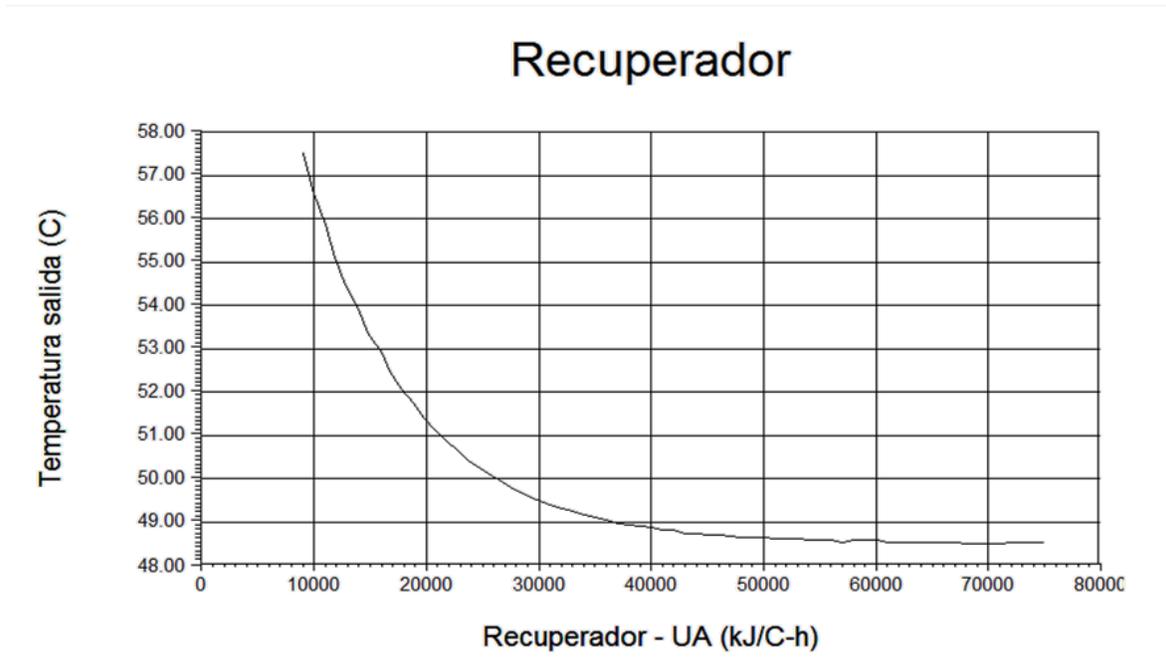
Análisis 1: Cambio de la temperatura de salida de la leche homogenizada en la zona de calentamiento al variar el dato de UA en la zona de calentamiento.



**Figura 3.1: Análisis de sensibilidad en la zona de calentamiento.**

Como se observa en la figura 3.1, al aumentar el coeficiente UA aumenta la temperatura de salida en la zona de calentamiento. El comportamiento de la variable temperatura es lógico, ya que al aumentar el área efectiva de intercambio dentro de la zona aumenta la transferencia de calor entre los fluidos lo que conlleva al aumento de la temperatura de salida de la leche homogenizada dentro de la zona.

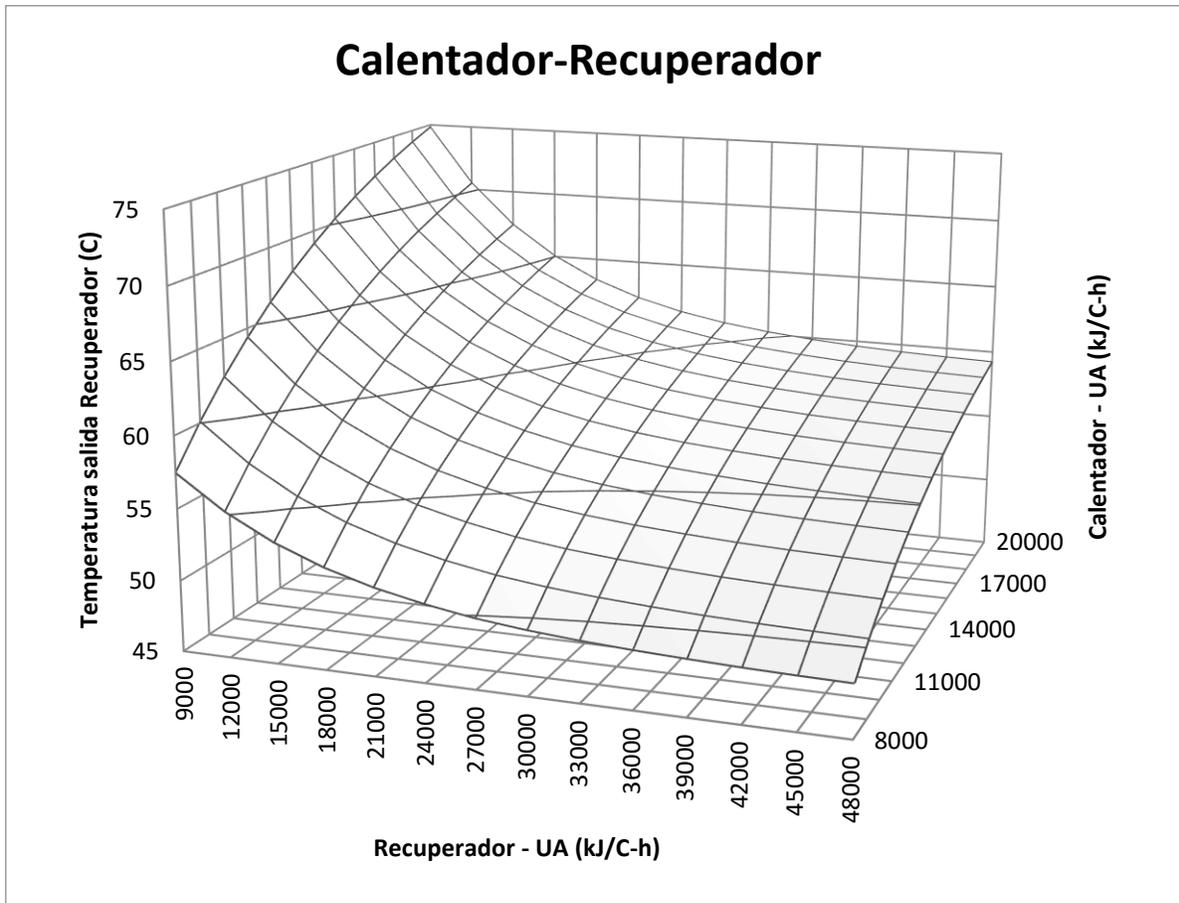
Análisis 2: Cambio de la temperatura de salida de la leche homogenizada en la zona de recuperación al variar el dato de UA en la zona de recuperación.



**Figura 3.2: Análisis de sensibilidad en la zona de recuperación.**

Como se observa en la figura 3.2, en este caso la zona de recuperación funciona como un enfriador. Al aumentar el coeficiente UA disminuye la temperatura de salida en la zona de recuperación. El comportamiento de la variable temperatura es lógico, ya que al aumentar el área efectiva de intercambio dentro de la zona de recuperación aumenta la transferencia de calor entre los fluidos lo que conlleva a la disminución de la temperatura de salida de la leche homogenizada dentro de la zona de recuperación.

Análisis 3: Cambio de la temperatura de salida de la leche homogenizada en zona de recuperación al variar el dato de UA en la zona de recuperación y calentamiento.



**Figura 3.3: Análisis de sensibilidad en la zona de recuperación y calentamiento.**

Como se observa en la figura 3.3, cuando la zona de recuperación se encuentra trabajando a su valor máximo de UA y la zona de calentamiento en su mínimo valor se obtiene una menor temperatura a la salida de la leche homogenizada en la zona de recuperación. Sin embargo cuando la zona de recuperación se encuentra trabajando a su valor mínimo de UA y la zona de calentamiento en su máximo valor se obtiene una mayor temperatura a la salida de la leche homogenizada en la zona de recuperación. El comportamiento de la variable temperatura es lógico.

### **3.6 Diseño de experimento.**

El diseño de experimento se utiliza para organizar diferentes soluciones de un problema o situación dada, y escoger a partir de un análisis minucioso la más

aceptada, o sea, la más cercana a las condiciones reales. En este caso el diseño experimento se utiliza para distribuir uniformemente las placas del pasteurizador. Mediante el software *Statgraphics* se realiza un diseño para mezcla tipo centroide simple. En la tabla 3.7 se muestra la distribución actual de placas del pasteurizador, mientras en la tabla 3.8 se muestra las diferentes alternativas para el diseño de experimento dado por el software.

**Tabla 3.7: Cantidad de placas actuales instaladas en el pasteurizador.**

| Calentador | Recuperador | Enfriador |
|------------|-------------|-----------|
| 30         | 78          | 34        |

**Tabla 3.8: Alternativas para el diseño de experimento.**

|                  | Calentador | Recuperador | Enfriador |
|------------------|------------|-------------|-----------|
| DE <sub>1</sub>  | 71         | 71          | 0         |
| DE <sub>2</sub>  | 71         | 0           | 71        |
| DE <sub>3</sub>  | 0          | 71          | 71        |
| DE <sub>4</sub>  | 47         | 48          | 47        |
| DE <sub>5</sub>  | 48         | 47          | 47        |
| DE <sub>6</sub>  | 47         | 47          | 48        |
| DE <sub>7</sub>  | 46         | 50          | 46        |
| DE <sub>8</sub>  | 40         | 62          | 40        |
| DE <sub>9</sub>  | 35         | 67          | 40        |
| DE <sub>10</sub> | 31         | 69          | 42        |

Para conocer los resultados de estas alternativas se introdujo los datos en el *software* utilizado para la simulación del caso base HYSYS, para poder analizar los diferentes cambios que sufre la temperatura de la leche homogenizada a la salida de cada una de las zonas y la temperatura de la leche fresca antes de la homogenización, es decir, se comprueba si cada una de estas alternativas permite que la leche fresca alcance la temperatura para ser homogenizada ( $\geq 65$  °C), si se

cumple el principio de la pasteurización (elevar y disminuir la temperatura del fluido) y si a la salida de la zona de enfriamiento cumple con la temperatura de calidad del producto final. Obteniéndose los siguientes resultados que se muestran a continuación en la tabla.

**Tabla 3.9: Valores de temperatura obtenidos del software para diferentes puntos del proceso.**

|                  | T <sub>LF</sub> entrada calentador | T <sub>LH</sub> entrada recuperador | T <sub>LH</sub> salida recuperador | T <sub>LH</sub> salida Enfriador |
|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| DE <sub>1</sub>  | 77,82 °C                           | 124,5 °C                            | 58,58 °C                           | 58,60 °C                         |
| DE <sub>2</sub>  | 12,02 °C                           | 97,71 °C                            | 97,73 °C                           | 22,11 °C                         |
| DE <sub>3</sub>  | 42,28 °C                           | 42,30 °C                            | -                                  | -                                |
| DE <sub>4</sub>  | 71,60 °C                           | 114,4 °C                            | 54,69 °C                           | 20,67 °C                         |
| DE <sub>5</sub>  | 71,89 °C                           | 115 °C                              | 54,96 °C                           | 20,76 °C                         |
| DE <sub>6</sub>  | 71,55 °C                           | 114,4 °C                            | 54,72 °C                           | 20,30 °C                         |
| DE <sub>7</sub>  | 71,33 °C                           | 113,9 °C                            | 54,39 °C                           | 20,95 °C                         |
| DE <sub>8</sub>  | 69,17 °C                           | 109,8 °C                            | 52,53 °C                           | 22,73 °C                         |
| DE <sub>9</sub>  | 66,76 °C                           | 105,6 °C                            | 50,75 °C                           | 22,04 °C                         |
| DE <sub>10</sub> | 64,33 °C                           | 101,5 °C                            | 49,04 °C                           | 20,60 °C                         |
| caso base        | 63,62 °C                           | 100,3 °C                            | 48,54 °C                           | 23,64 °C                         |

El diseño de experimento 1 (DE<sub>1</sub>) cumple con la temperatura de homogenización pero no cumple con el principio básico de la pasteurización. El diseño de experimento 2 (DE<sub>2</sub>) cumple con las temperaturas de pasteurización pero no alcanza la temperatura para que la leche sea homogenizada. El diseño de experimento 3 (DE<sub>3</sub>) no arroja resultados positivos en cuanto a la homogenización ni en cuanto a la pasteurización. A partir del diseño de experimento 4 (DE<sub>4</sub>) hasta el diseño de experimento 7 (DE<sub>7</sub>) se empezó a lograr los resultados que se esperaban, pero con un inconveniente, a pesar de lograrse la homogenización y la pasteurización, la temperatura de la homogenización es muy alta (> 71 °C) y en la fábrica se homogeniza alrededor de los 65 °C. Los diseños de experimentos 8 (DE

8) y 9 (DE 9) ya arrojaron resultados más cercanos a los que se esperaba, además de pasteurizar y homogenizar correctamente, logra temperaturas para la homogenización más cerca de 65 °C (< 70 °C) y además alcanza la temperatura deseada para el producto final a la salida de la zona de enfriamiento. El diseño de experimento 10 (DE 10) arrojó los resultados esperados, cumple con la homogenización y la pasteurización, además se obtiene la temperatura de homogenización que se utiliza en la fábrica y además se obtiene a la salida de la zona de enfriamiento un producto con las especificaciones de calidad con respecto a la temperatura. Por esta razón, se escoge la distribución de placas del experimento 10 (DE 10) como solución a los problemas a los que se enfrenta la fábrica actualmente.

### **3.7 Análisis económico.**

El rediseño del sistema que se propone no conlleva la compra de ningún accesorio nuevo. Lo que se propone es disminuir el área efectiva de transferencia de calor de la zona de recuperación, aumentando el área efectiva de la zona de enfriamiento y manteniendo el área efectiva de la zona de calentamiento. Esta nueva propuesta aunque no exige la compra de nuevos accesorios garantiza:

1. La temperatura óptima de inoculación de la masa estandarizada (22 °C).
2. La formación del coágulo y la obtención de acidez de la masa estandarizada (70 – 74 %) en las 18 horas mínimas de reposo después de la inoculación como está normado.
3. El tiempo óptimo de proceso (2 días) para la obtención de queso crema.
4. La calidad del producto terminado, si no ocurre problemas en la segunda pasteurización, dígame: rendimiento 25 %, acidez entre 90 y 100 % y grasa mínima 32 %.

Además de lo expuesto anteriormente, la nueva propuesta garantiza que no existan gastos adicionales de materias primas en la elaboración del queso crema. Actualmente en la fábrica, se utiliza materias primas para elaboración de 1 T de queso, sin embargo se obtiene 900 kg de queso crema. Esto constituye una

pérdida de 1438,00 CUP ya que el queso tiene un costo de venta de 14,38 CUP/kg.

### **3.8 Conclusiones parciales del capítulo.**

Luego de obtener todos los resultados se puede concluir que:

- Al determinar los coeficientes globales de transferencia de calor se obtuvo: zona de calentamiento  $235,2 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , zona de recuperación  $847,9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  y zona de enfriamiento  $285,3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .
- Al determinar el área efectiva del pasteurizador se obtiene un valor de  $44,73 \text{ m}^2$ , dividida en las tres zonas:  $9,45 \text{ m}^2$  en la zona de calentamiento,  $24,57 \text{ m}^2$  en la zona de recuperación y  $10,71$  en la zona de enfriamiento.
- Al realizar el ajuste del modelo al caso base, se obtiene que todos los parámetros que se tuvieron en cuenta para la comparación de los datos de la simulación y la realidad, se encuentran por debajo del error máximo permisible, 10 %.
- Al realizar el análisis de sensibilidad se obtiene que el modelo responde correctamente a todos los cambios de variables de diseños
- De los casos de estudios obtenidos por el diseño experimental, se selecciona la distribución de placas del experimento 10 como solución a los problemas existentes en la fábrica actualmente, es decir, disminuir el área efectiva de transferencia de calor de la zona de recuperación, aumentando el área efectiva de la zona de enfriamiento y manteniendo el área efectiva de la zona de calentamiento.

## Conclusiones

- Al mover diez placas de la sección de recuperación a la de enfriamiento, se logra que cada una de las zonas alcance las temperaturas de diseño.
- Al evaluar el sistema de pasteurización se obtuvo que el área efectiva de transferencia de calor de una placa es de  $0,32 \text{ m}^2$ .
- Mediante el diseño experimental se analizaron diez alternativas como caso de estudio simulado, lográndose que tres alternativas alcancen la temperatura de pasteurización deseada y una la temperatura de diseño.
- La nueva distribución de placas garantiza que no existan pérdidas por calidad del producto, aumentando el rendimiento.

## Recomendaciones

- Proponer a la empresa implementar en la fábrica, la distribución de placas obtenida mediante el diseño de experimento diez.
- Comprobar que la distribución de placas propuesta garantiza las temperaturas de diseño de la segunda pasteurización.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Abaraca O. Romina, Carrillo L. Bernardo, Riquelme A. Gabriela, 2018, "Definiciones, efecto de los tratamientos térmicos y parámetros que pueden indicar origen de la leche", Tesis de Doctorado, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
2. Álvarez LLoret, Silvana Ximena. 2016, "Caracterización físico química y bromatológica del lactosuero ácido, y la obtención de una bebida proteinizada", Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca, Ecuador.
3. Bank, Jerry, 1998. "Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications and practice", New York: Jhon Wiley and Sons, p 849, ( classics in applied mathematics), ISBN 0471134031.
4. Bellido Ribes, Alba, 2016, "Estudio del comportamiento del refrigerante R-744 en procesos de Transferencia de Calor realizados en Intercambiadores de Placas montados en una instalación de refrigeración", Tesis de Grado, Universidad Jaume.
5. Branan Carl, 2002, "Rules of thumb for chemical engineers", Marcel Dekker, New York.
6. Broussard, M, 2002, "Maximizing Simulation's Reach, Chemical Engineering", Marcel Dekker, New York.
7. Cabrera Gutiérrez Leonel. 2016, "Evaluación del comportamiento de la disciplina tecnológica en el proceso de obtención de queso de la Pasterizadora "Germán Hernández Salas" de Cárdenas", Tesis de Grado, Universidad de Matanzas, Matanzas.
8. Camaraza Medina Yanan, 2017, "Introducción a la termotransferencia", La Habana: Editorial Universitaria, ISBN 978-959-16- 3286-9.
9. Cano, Jesús J. 2013. "Proyecto de Cooperación de Seguimiento para el mejoramiento Tecnológico de la producción Láctea en las Micros y Pequeñas Empresas de los Departamentos de Boaco, Chontales y Matagalpa", Manual de Procesamiento Lácteo, Instituto Nicaraguense de

apoyo a la pequeña y mediana empresa INPYME, Agencia de cooperación internacional de Japón, Guatemala.

10. Cengel Yunus A, 2002, "Complite Solution Manual to Accompany: Heat transfer", McGraw-Hills Sales, New York.
11. Chávez Lemus, Mario Roberto Stuardo. 2006. "Planta Procesadora de Lácteos en San José Pinula", Tesis de Maestría, Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
12. Cheremisinoff, Nicholas P. 2002, "Handbook of chemical processing equipment", Butterworth Heinemann, Boston.
13. Crossier Guach Adduel, 2016, "Determinación del tiempo óptimo de limpieza de un pasteurizador de jugos y concentrados del Combinado de cítricos "Héroes de Girón"", Tesis de Grado, Universidad de Matanzas: Sede "Camilo Cienfuegos", Matanzas, Cuba.
14. Engeneering Toolbox, 2019, "Tools and basic information for engeneering and desingn of technical applications", on line: [https://www.engineeringtoolbox.com/absolute-dynamic-viscosity-water-d\\_575.html](https://www.engineeringtoolbox.com/absolute-dynamic-viscosity-water-d_575.html).
15. Facultad de Ciencias Química, "Guía docente: Simulación y Control de procesos", 2015, Folleto para la distribución de la asignatura, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
16. Feliz Danis, 2010, "Pasteurización y esterilización en los alimentos", Manual de Ciencias de los Alimentos, <http://pasteurizacionyesterilizacion.blogspot.com/2010/04/pasteurizacion-la-pasteurizacion-es-un.html>.
17. Feliz Danis, 2011, "Tratamientos térmicos por aplicación de Calor", Manual de Ciencias de los Alimentos, <http://procesamientolacteo.blogspot.com/2011/ventajas-y-desventajas-de-la.html>.
18. Fogler, H. scout, Gurmen, Nihat M, 2002, "Aspen Plus workshop for reaction engineering and design", Ann Arbor MI, University of Michigan, Departement oh Chemical Engineering.

19. Gako Castillo, Wendy Edith, 2009. "Proceso de elaboración de queso crema para extender su vida de anaquel en una industria procesadora de lácteos", Tesis de Grado, Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, Guatemala.
20. Galván Díaz María del Pilar, 2005, "Proceso básico de la leche y el queso" Revista Digital Universitaria, Volumen 6 Número 9, ISSN: 1067-6079, <http://www.revista.unam.mx/vol.6/num9/art87/int87.htm>.
21. Gana I. M and Gbabo A., 2017, "Desing of mini plant for soya milk production and pasteurization", Agricultural Engineering International: CIGR Journal, Vol.19.No 4, disponible en <http://www.cigrjournal.org>.
22. Gimferrer Morató Natália, 2018, "Pasteurización de Alimentos", Ciencia y Tecnología de los Alimentos: Seguridad Alimentaria, Volumen 5, No 2.
23. González Márquez María José. 2007, "Diseño de un pasteurizador para helados", Tesis de Grado, Universidad de Cádiz, España.
24. Gut Jorge A. W; Pinito José M; Gabas, Ana L and Romero Telis Javier, 2017. "Pasteurization of egg yolk in plate heat exchange: thermophysical properties and process simulation", Presentation at the Annual Meeting San Francisco, University of Sao Paulo, Polystechinc University, Universidad de Estadual Paulista, Sao Paulo, Brazil.
25. Gutiérrez Salado Pedro Enrique, 2017, "Módulos de usuarios para ASPEN con modelos rigurosos de reactores de lecho empacado en fase gaseosa", Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya.
26. Haslego, Christopher and Polley Graham, 2002, "Designing plate and frame heat exchangers", Compact heat exchanger-part 1, Alfa Laval.
27. Jaramillo O. A., 2007, "Intercambiadores de Calor", Tesis de Maestría, Universidad nacional Autónoma de México, México.
28. Lezama Sergio, 2012, "Pasteurizacion y Esterilización", Milk Journal, Volumen 3, No 1, <http://www.youtube.com/watch?v=qMbr1B2J90&feature=g-upl>.
29. Loarte Villarreal Maliuska Rocío y Yali Jara Sheyla Johanna, 2015, "Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de

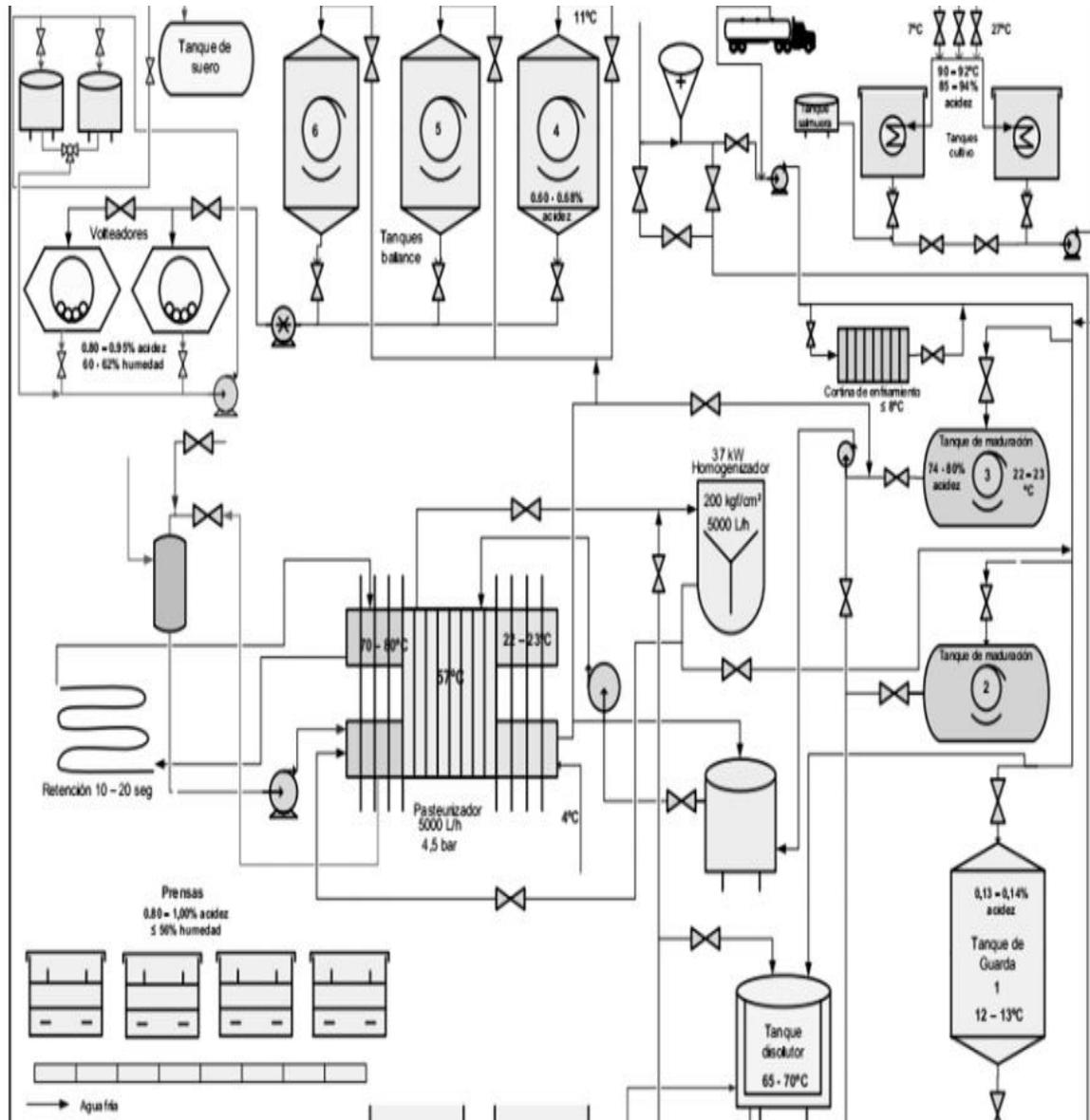
- procesamiento de pulpas de frutas para el mercado estadounidense'', Tesis de Grado, Universidad Agraria La Molina, Lima, Perú.
30. Maldonado C, Juan Carlos. y Castillo Priscila. 2017, "Aplicación de modelo matemático predictivo para la determinación de incrustaciones en pasteurizadores a placas en la Industria Láctea", Revista Tecnológica ESPOL, Volumen 5, Número 9, Ecuador, disponible en: [pcastil@espol.edu.ec](mailto:pcastil@espol.edu.ec).
  31. Martínez, Ana M.; Rosenberger, Mario R.; García Garino, Carlos G.; Mirasso, Aníbal E.; Storti, Mario A.; Tornello, Miguel E.; 2013, "Modelo numérico de pasteurización artesanal de leche y jugos naturales" Mecánica Computacional Vol XXXII, No XX, págs. 2485-2501 (artículo completo) (Eds.)Mendoza, Argentina.
  32. Moncada Albitres Luis, 2018, "Intercambiadores de Calor'', Tesis de Doctorado, Universidad nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
  33. Montes de Oca Rodríguez, Leiby, 2007, "Desarrollo de un modelo de simulación para la evaluación de una caldera recuperadora de calor usando un simulador de procesos'', Tesis de Maestría, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.
  34. Olodoño Yuliana, 2014, "Esterilización, Pasteurización y Ultrapasteurización'', Manual de Ciencias de los Alimentos, Houston.
  35. Pelayo Victorio Adolfo Ángel, 2010, "Tratamientos térmicos de la leche: esterilización y pasteurización''. San Andres Tuxtla, Veracruz, México.
  36. Peng Jing, Tang Juming, Barrett Diane M., Sablani Shyam S., Anderson Nathan and Powers Joseph R., 2015, "Thermal Pasteurization of Vegetables: Critical Factors for Process Design and Effects on Quality'', Critical Reviews in Food Science and Nutrition, DOI: 10.1080/10408398.2015.1082126, disponible en <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2015.1082126>.
  37. Posada Mejía, Marcela María y Zapata Zapata, Natalia. 2016, " Propuesta metodológica para la aplicación de simuladores de proceso en las

- asignaturas de Ingeniería de Procesos'', Tesis de Grado, Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, Medellín, Colombia.
38. Proyecto Secured-Sica, 2017. ''Productos Lacteos'', Journal Milk, Vol 5, No 3, Ecuador.
  39. Ramos Díaz; Laura Margarita ;Gallardo Navarro; Yoja ;' Váldez Fraga, Lourdes. 2004, ''Elaboración y caracterización de queso crema unttable bajo en grasa adicionado con inulina'', Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia, La Lisa. Habana, Cuba.
  40. Rubino, Guillermo. 2018, '' Pasteurizadores de leche. Principios básicos para su correcto diseño, uso y mantenimiento'', Presentación Anual para la reunión del Ministerio de Industria para al presidencia de la Nación, INTI Rafaela, disponible en : [grubino@inti.gob.ar](mailto:grubino@inti.gob.ar).
  41. Salazar Quispe José Brayan, 2018, '' Design and simulation of plates heat exchanger to produce HSW'', Tesis de Grado, Universidad de Cantabria: Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicaciones.
  42. Sarget, Robert G. 2009, ''Verification and validation of simulation models'', L. C. Smith College of Engineering and Computer Science, Theses Grade, Syracuse University, Syracuse, N.Y. 13244, U.S.A.
  43. Thulukkanam Kuppan, 2013, ''Heat exchanger design handbook'', Tylar and Francis Group, New York.
  44. Trujillo Mesa Antonio José, 2017. ''Estudio de la formación de costra en un intercambiador de calor de placas'', Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España.
  45. Vela Pasmíño Fernando Gustavo, 2013, ''Aplicación de Transferencia de Calor en el procesamiento de alimentos'', Tesis de Grado, Universidad Nacional de la Amazona Peruana, Quito, Perú.
  46. Vicente Morales Yenier Omar, 2008, ''Aplicación del Aspen Plus en el análisis de la integración energética en la papelera Damují'', Tesis de Grado, Universidad Central de las Villas ''Marta Abreu'', Villa Clara, Cuba.

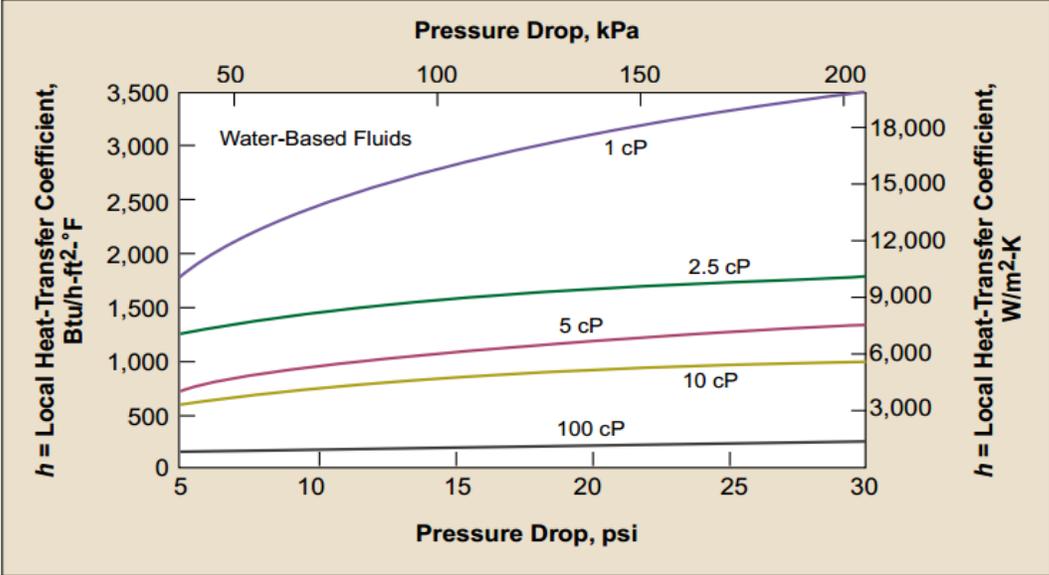
47. Vilches Orrego Karina Andrea, 2013, "Actualización de parámetros de diseño de intercambiadores de calor", Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
48. Villacrés C. Patricio, 2018, "La Pasteurización y sus Beneficios", Tesis de Grado, Universidad Nacional de la Amazona Peruana, Quito, Perú.
49. Wankat, P, 2002, "Integrating the use of commercial simulators into lecture course", Purdue University. Journal of Engineering Education.

# ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de flujo del proceso de producción de queso de crema



**Anexo 2:** Gráfica para la determinación del NTU.



■ Figure 2. Heat-transfer correlations for water-based fluids, 0.25 < NTU < 2.0.