

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química e Ingeniería Química



TRABAJO DE DIPLOMA

Trabajo de diploma presentado en opción al título de ingeniero químico

Título: Propuesta de un sistema de enfriamiento para el jugo concentrado de piña en la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”.

Autor: Melissa B. Hernández Castrillo

Tutores:

MSc. Luis A. Olivera Díaz

Ing. Jeniffer Núñez Bouza

Matanzas, Cuba. 2021.

Declaración de autoridad

Yo Melissa B. Hernández Castrillo declaro ser la autora de este trabajo de diploma y autorizo al departamento de Química e Ingeniería Química de la Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos” y a la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón” a utilizarlo de la manera que lo estime conveniente y a todo aquel que necesite su consulta siempre y cuando se respete el nombre del autor.

Para que así conste firma:

Melissa B. Hernández Castrillo

Nota de aceptación:

Institución

Nombre del presidente del tribunal

Firma

Evaluación

Fecha

Pensamiento

... *“La Reina de las Frutas”*...

“Es la más bella y la mejor de todas las que existen en la tierra. Es sin duda por esta razón, que el Rey de Reyes, le ha puesto una corona en la cabeza que es como una marca esencial de su reinado, puesto que a la caída del padre, produce un joven Rey que le sucede en todas en todas sus admirables cualidades”.

R. P. DUTERTE

Dedicatoria

Dedico este trabajo: a mi madre, a mi padre, a mis abuelas y a todas esas personas que de una forma u otra pusieron su granito de arena para que la realización de este proyecto fuese posible.

Agradecimientos

A mi madre y a mi padre que han sido mi guía para poder lograr mis sueños.

A mi abuela por sus consejos y enseñanzas.

A mis amigos por acompañarme ya sea en los malos y buenos momentos en esta experiencia.

A mis profesores por enseñarme no solo a ser ingeniera, sino a ser mejor como persona.

A mis tutores Jeniffer y Olivera por ayudarme, por estar ahí para mí, por su preocupación, dedicación y paciencia, además de todos los trabajadores de la UEB Combinado Industrial "Héroes de Girón".

A todas y cada una de esas personas que estuvieron presente en la elaboración de este proyecto muchas gracias.

Resumen

Este trabajo de investigación está dirigido a evaluar la propuesta del montaje y puesta en marcha de un intercambiador tubular para el enfriamiento de los jugos concentrados congelados de la piña en la línea de envasado de jugos de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón” de Jagüey Grande. Por la inestabilidad en los valores de temperatura, los cuales se presentaban en ocasiones muy elevados, se afectaba con frecuencia el proceso productivo, entonces en este trabajo se realiza un estudio estadístico de los valores de temperatura final del producto en el proceso de evaporación y en el proceso de envasado por su importancia en la calidad del mismo, para hacer la valoración técnica-económica de la propuesta se usan herramientas como: la metodología para evaluar intercambiadores de calor, elementos de mecánica de fluidos, termodinámica y métodos para evaluar económicamente la propuesta basados en el ahorro de divisas que representa el cambio.

Summary

This research work is aimed at evaluating the proposal for the assembly and start-up of a tubular exchanger for the cooling of concentrated frozen pineapple juices in the juice packaging line of the Industrial Combined Héroes de Girón de Jagüey Grande UEB. Due to the instability in the temperature values, which were sometimes very high, the production process was frequently affected, so in this work a statistical study of the final temperature values of the product is carried out in the evaporation process and in the packaging process due to its importance in its quality, to make the technical-economic evaluation of the proposal, tools such as: the methodology to evaluate heat exchangers, elements of fluid mechanics, thermodynamics and methods to evaluate the proposal economically are used based on the foreign exchange savings represented by the change.

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción | 1 |
| Capítulo 1: Análisis bibliográfico..... | 3 |
| 1.1. La Piña y la Industria | 3 |
| 1.1.1 Procesamiento industrial de la Piña..... | 4 |
| 1.2 Teoría del Flujo de fluidos en tuberías, válvulas y accesorios..... | 6 |
| 1.2.1. Flujo de fluidos a través de tuberías | 6 |
| 1.2.2 Flujo de fluidos a través de válvulas y accesorios | 7 |
| 1.2.3 Bombas Hidráulicas | 7 |
| 1.2.4 Tipos de bombas | 8 |
| 1.3 Tipos de transferencia de calor | 10 |
| 1.4 Intercambiadores de Calor | 12 |
| 1.4.1 Tipos más usados de Intercambiadores de Calor | 12 |
| 1.5 Métodos de evaluación de intercambiadores de calor | 17 |
| 1.5.1 Método del Factor de Corrección de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (FT-LMTD):..... | 18 |
| 1.5.2 Método de la Eficiencia y el Número de Unidades de Transferencia . 18 | |
| ($\epsilon - NTU$):..... | 18 |
| 1.5.3 Método $\psi - P$:..... | 19 |
| 1.6 Conservación de alimentos | 19 |
| 1.6.1 Principios en que se basa la conservación de los alimentos..... | 20 |
| 1.6.2 Existen dos formas de conservación a bajas temperaturas..... | 21 |
| 1.6.3 Procedimientos de congelación..... | 22 |
| 1.6.4 Importancia sanitaria de la conservación a bajas temperaturas | 23 |
| 1.7 Tiempo de congelación | 24 |
| Conclusiones parciales del capítulo 1 | 25 |
| Capítulo 2: Materiales y métodos | 26 |
| 2.1 Caracterización de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”..... | 26 |
| 2.2 Descripción tecnológica del proceso productivo | 26 |
| 2.3 Recopilación y procesamiento de datos..... | 32 |
| 2.4 Balance de materiales | 33 |
| 2.5 Balances de energía mecánica y energía calorífica. Evaluación técnica | 33 |

| | |
|---|----|
| 2.5.1 Balances de energía mecánica..... | 33 |
| 2.5.2. Metodología para la evaluación del intercambiador de calor | 37 |
| 2.6 Tiempo necesario para llegar a la temperatura de congelación | 40 |
| 2.7 Factibilidad económica de la propuesta | 42 |
| 2.8 Valoración ambiental de la propuesta..... | 44 |
| Conclusiones parciales del capítulo 2 | 44 |
| Conclusiones..... | 45 |
| Recomendaciones..... | 46 |
| Bibliografía | 47 |
| Anexos | 51 |

Introducción

Aunque lo más común es que la comercialización de la piña sea como fruta fresca, las nuevas tendencias del mercado y las preferencias de los consumidores han promovido la necesidad de que la fruta tenga mayor durabilidad, por lo que a través de diferentes procedimientos es procesada y ofertada con valor agregado. Es uno de los productos que más se elaboran a nivel industrial, para alargar la vida útil de este fruto se realiza el jugo concentrado congelado.

La UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón” procesa la piña que se cultiva en la provincia. Su misión fundamental es producir alimentos de la más alta calidad en completa armonía con el medio ambiente, con honestidad y respeto a los clientes. Su principal producción son los jugos simples, concentrados congelados y asépticos de naranja, toronja y piña.

En la empresa en cuestión a pesar de ser eficiente existen varias secciones del proceso que con pequeñas modificaciones pueden incrementar la eficiencia del mismo y reducir las cantidades de residuos líquidos, disminuir los costos de producción y aumentar las ganancias.

El producto terminado se envasa fundamentalmente en bidones de acero de 200 litros cumpliendo con los requisitos establecidos por los clientes, este se almacena en cámaras refrigeradas en el frigorífico de la empresa hasta su posterior exportación.

La durabilidad de los jugos concentrados cítricos está determinada fundamentalmente, por los cambios químicos, enzimáticos y microbiológicos que pueden afectar adversamente la calidad nutricional, el color y el sabor. Todos estos cambios pueden ser retardados y casi eliminados con la disminución de la temperatura del producto y la durabilidad puede aumentarse considerablemente.

Las temperaturas de proceso y almacenamiento son los principales factores que determinan la calidad de los jugos cítricos concentrados. El mayor efecto de la temperatura en los concentrados se centra en sus características microbiológicas debido a que los microorganismos presentes en el producto crecen a una velocidad exponencial en dependencia de la temperatura por lo que el único medio para detener este crecimiento es el de mantener el producto a temperatura cercanas o inferiores a cero.

Según lo anterior se plantea como **problema científico**:

¿Cómo disminuir la temperatura final en la producción de Jugos Concentrados Congelados de piña en el combinado industrial “Héroes de Girón” que influyen negativamente en la calidad del producto terminado y en el buen desarrollo del proceso productivo?

En cuanto a la solución de dicho problema se plantea la **siguiente hipótesis**:

Si se establece un sistema de enfriamiento para los Jugos Concentrados Congelados de piña en combinado industrial “Héroes de Girón”, se garantiza calidad superior en los productos, menor tiempo de almacenamiento en el frigorífico y ahorro de energía trayendo consigo de forma general mejoras en el proceso productivo.

Objetivo general:

Proponer y evaluar un sistema de enfriamiento para disminuir la temperatura final en los Jugos Concentrados Congelados de Piña en la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón” con el fin de garantizar los requisitos de calidad solicitados por los clientes.

Para ello se siguen los **objetivos específicos**:

1. Diagnosticar la situación actual, empleando métodos teóricos, empíricos y estadísticos, utilizando los valores de temperaturas finales del producto tanto en la evaporación como en el envasado y teniendo en cuenta las condiciones reales existentes en el proceso productivo.
2. Proponer la metodología para evaluar tecnológicamente el sistema de enfriamiento propuesto basados en fundamentos de la mecánica de fluidos y la transferencia de calor.
3. Proponer la metodología para evaluar la propuesta económicamente.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

1.1. La Piña y la Industria

Aunque lo más común es que la comercialización de la piña sea como fruta fresca, las nuevas tendencias del mercado y las preferencias de los consumidores han promovido la necesidad de que la fruta tenga mayor durabilidad, por lo que a través de diferentes procedimientos es procesada y ofertada con valor agregado.

Clasificación de la piña con destino a industria

Según (Rojas, 2008) el procesamiento agroindustrial es una actividad que permite a los productores en las zonas rurales otorgar valor agregado a la producción, especialmente a los frutos que por sus características no son comercializables como producto fresco, la fruta de la piña que se utiliza para procesar se debe cosechar en estado de madurez fisiológica, es decir, cuando el fruto está totalmente maduro. Debe tener su tamaño desarrollado y según la variedad, el color va de verde a amarillo, predominando el verde hinchota. El color de la cáscara no indica el grado de madurez de la fruta y este se detecta tocando la fruta u oliéndola. Se deben considerar las siguientes características:

- Frutos de aspecto sano.
- Ausencia de ataques de insectos.
- Ausencia de daños mecánicos.
- Estado de madurez fisiológica.
- Color y textura uniformes y característicos del fruto.

Las variedades de la piña que se procesan en la industria son: Española Roja, Cayena Lisa e híbridos y Cabezona (Norma Cubana 455: 2015)

Posibilidades de industrialización:

De la fruta de piña se pueden obtener varios productos industriales.

Seguidamente se presenta un listado sobre estas posibilidades.

1. Adición del almíbar: piña en trozos o rodajas.
2. Jugo de piña.
3. Néctar de piña.

4. Salsas de frutas con piña como ingrediente.
5. Cóctel de frutas con piña como ingrediente.
6. Piña deshidratada: rodajas, cuadritos, pulpa.
7. Vino de piña.
8. Yogurt con piña como ingrediente.
9. Helados de piña.
10. Pulpa concentrada congelada.
11. Pulpa aséptica
12. Mermelada de piña.
13. Jalea de piña.
14. Rodajas de piña en almíbar.

El paso básico para la elaboración de la mayoría de los productos anteriormente señalados es la obtención de la pulpa de piña, cuyo proceso de elaboración se describe seguidamente; se incluyen diagramas de flujo, para la elaboración de diversos productos derivados de la piña (Norma Cubana 455: 2015)

1.1.1 Procesamiento industrial de la Piña

El paso básico para la elaboración de la mayoría de los productos anteriormente señalados es la obtención de la pulpa de piña, cuyo proceso se describe seguidamente para la elaboración de diversos productos derivados de la piña:

Recepción de la fruta

Luego de ser transportadas la piña desde el frente de cosecha a través de camiones hasta la industria, se procede a su pesaje en la báscula, continuando hasta el área de recepción donde se descargan, en este sitio es tomado al azar una muestra, para analizar algunos parámetros de calidad de las frutas se determina la cantidad (%) de sólidos solubles (Brix), acidez y contenido de jugo. (Hernandez, 2005)

Requisitos

El contenido mínimo de sólidos solubles totales en la pulpa del fruto deberá ser, como mínimo, de 12° Brix. Para la determinación de los grados Brix deberá tomarse una muestra representativa del jugo del fruto entero. (Norma Cubana 455: 2015)

Según (Hernandez, 2005) la acidez, en % es de 0.60 – 2.50.

Preselección

Desde el área de descargue son transportadas y elevadas por cintas transportadoras y elevadores de cangilones hasta los silos pasando por una mesa de preselección donde son separados las piedras, palos, pedúnculos que puedan traer desde el campo (Hernandez, 2005).

Calidad de agua para la industria

La calidad del agua varía en función de la fuente. La prueba ofrecerá una idea general de la calidad del agua y ayudará a establecer la posible presencia de contaminación. Las pruebas del total de coliformes y de E. coli del agua deben realizarse en un laboratorio acreditado, donde los análisis se efectúan siguiendo estándares equivalentes a ISO 17025. (CANADAGAP, 2017)

Lavado de la fruta

Una lavadora, en este equipo las frutas son lavadas con agua tratada con hipoclorito de sodio, el contenido de cloro en el agua tiene que ser de 0.5 – 1.0 p.p.m para eliminar posibles bacterias o microorganismos presentes en las frutas. (Alfárez *et al*, 2003).

Prensado

Al jugo obtenido en la prensa se le separa la pulpa grosera en los tamizadores, el jugo tamizado se impulsa a través de una centrífuga clarificadora para disminuir el contenido de pulpa hasta un valor deseado y enviado a los evaporadores, equipo en el cual por intercambio con vapor de agua se le extrae al jugo, la esencia y el agua que este contiene. Al evaporarse gran parte del agua que contenía el jugo se obtiene concentrado.

Almacenamiento del jugo

El jugo concentrado congelado se envasa en bidones de acero y almacenados en las cámaras frías a -15 °C. (Hernandez, 2005).

1.2 Teoría del Flujo de fluidos en tuberías, válvulas y accesorios

1.2.1. Flujo de fluidos a través de tuberías

El método más común para transportar fluidos de un punto a otro es impulsado a través de un sistema de tuberías. Las tuberías de sección circular son las más frecuentes, ya que esta forma ofrece no solo mayor resistencia estructural sino también mayor área de sección transversal para el mismo perímetro exterior que cualquier otra forma. La palabra tubería se refiere siempre a un conducto cerrado de sección circular y diámetro interior constante (Pérez, 2002).

A nivel mundial el transporte de líquidos y gases a través de conductos tubulares cerrados es muy común como consecuencia de los adelantos de la tecnología industrial (Ávila *et al.*, 2007). Vega y Rodríguez, (2007) define el término tubería, en tecnología, como el tubo empleado para transportar de un punto a otro líquido, sólidos fragmentados, mezclas de líquidos y sólidos, así como gases.

Streeter *et al.*, (1999) determina que el flujo de fluidos a través de conductos cerrados, involucra pérdidas de energía, debidas principalmente a la naturaleza de las paredes de los tubos (rugosidad), en el caso de secciones rectas de tuberías. Mientras que (Ortiz *et al.*, 2010) expone que la pérdida de energía se debe principalmente a turbulencia y fricción. Dentro de la dinámica de éstos, siempre ocurre fricción de los mismos con la tubería y en diferentes accesorios, ocasionando pérdidas de presión en el flujo a lo largo de su trayectoria (Anaya *et al.*, 2014).

En 1883, fue Osborne Reynolds quien al fin abre el camino al tratamiento científico del problema, al reconocer la existencia del flujo laminar y el turbulento, fijar sus límites y utilizar el análisis dimensional para proponer una fórmula racional para expresar la resistencia al flujo en conductos (Pérez, 2002). Además, Osborne Reynolds desarrolló a través del análisis dimensional una ley racional de resistencia al flujo, basándose en la suposición de que la resistencia dependía del diámetro, la longitud, y la condición de la superficie interior de la tubería; de la viscosidad y densidad del fluido y de la velocidad media del flujo a través de la tubería (Pérez, 2002).

En los casos de corriente fluida laminar analizados comúnmente en los libros de mecánica de fluidos de pre-grado, no se toma absolutamente en consideración el cambio de temperatura del flujo y, por consiguiente, la viscosidad del líquido tanto

en los límites de la sección transversal, como a lo largo del flujo, es decir, se suponía una temperatura constante en todos los puntos del flujo (Amaro y Hernández, 2015).

1.2.2 Flujo de fluidos a través de válvulas y accesorios

Las válvulas son instrumentos utilizados para regular y controlar el flujo de un fluido que puede moverse por una tubería o estar almacenado en un tanque. La variedad en diseños de válvulas dificulta una clasificación completa (Fernández *et al.*, 2006).

Las válvulas se clasifican según su resistencia al flujo, las que presentan un paso directo del flujo, como las válvulas de compuerta, bola, macho y de mariposa pertenecen al grupo de baja resistencia y las que tienen un cambio en la dirección del flujo, como las válvulas de globo y angulares, están en el grupo de alta resistencia

Los acoplamientos o accesorios para conexión se clasifican en: de derivación, reducción, ampliación y desviación. Los accesorios como T, cruces, codos con salida lateral etc., pueden agruparse como accesorios de derivación (Fernández *et al.*, 2006).

1.2.3 Bombas Hidráulicas

Una bomba es una máquina hidráulica que transforma la energía, generalmente energía mecánica con la que es accionada en energía hidráulica del fluido incompresible que mueve. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos como puede ser el hormigón antes de fraguar o la pasta de papel. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud (Fernández *et al.*, 2006).

Existe una ambigüedad en la utilización del término bomba, ya que generalmente es utilizado para referirse a las máquinas de fluido que transfieren energía, o *bombean* fluidos incompresibles, y por lo tanto no alteran la densidad de su fluido de trabajo, a diferencia de otras máquinas como lo son los compresores, cuyo campo de aplicación es la neumática y no la hidráulica. Pero también es común encontrar el

término bomba para referirse a máquinas que bombean otro tipo de fluidos, así como lo son las bombas de vacío o las bombas de aire (Rosabal, 2006).

1.2.4 Tipos de bombas

Vega, (2008) plantea que la principal clasificación de las bombas se realiza atendiendo al principio de funcionamiento en el que se encuentran:

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico: El principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas. En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. A su vez este tipo de bombas pueden subdividirse en:
 - Bombas de émbolo alternativo: En las que existe uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente. Algunos ejemplos de este tipo de bombas son la bomba alternativa de pistón, la bomba rotativa de pistones o la bomba pistones de accionamiento axial.
 - Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas: En las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son la bomba de paletas, la bomba de lóbulos, la bomba de engranajes, la bomba de tornillo o la bomba peristáltica.
- Bombas rotodinámicas: El principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodetes con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo. Estas turbomáquinas hidráulicas generadoras pueden subdividirse en:

- Radiales o centrífugas: En estas el movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor.
- Axiales: El fluido pasa por los canales de los álabes siguiendo una trayectoria contenida en un cilindro.

Vega, (2008) plantea que las bombas se pueden clasificar según su tipo de accionamiento en:

- Electrobombas: Genéricamente, son aquellas accionadas por un motor eléctrico, para distinguirlas de las motobombas, habitualmente accionadas por motores de explosión.
- Bombas neumáticas: Son bombas de desplazamiento positivo en las que la energía de entrada es neumática, normalmente a partir de aire comprimido.
- Bomba peristáltica: Una bomba peristáltica es un tipo de bomba de desplazamiento positivo usada para bombear una variedad de fluidos. El fluido es contenido dentro de un tubo flexible empotrado dentro de una cubierta circular de la bomba (aunque se han hecho bombas peristálticas lineales). Son típicamente usadas para bombear fluidos limpios o estériles porque la bomba no puede contaminar el líquido, o para bombear fluidos agresivos porque el fluido no puede contaminar la bomba.
- Bomba centrífuga: Una bomba centrífuga es un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio llamado rodete en energía cinética y potencial requeridas. Aunque la fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad en la periferia del impulsor como de la densidad del líquido, la energía que se aplica por unidad de masa del líquido es independiente de la densidad del líquido. Las bombas centrífugas tienen un uso muy extenso en la industria ya que son adecuadas casi para cualquier servicio. Las más comunes son las que están construidas bajo normativa DIN 24255 (en formas e hidráulica) con un único rodete, que abarcan capacidades hasta los 500 M³/h y alturas manométricas hasta los 100 metros con motores eléctricos de velocidad estándar. Constituyen no menos del 80 % de la producción mundial de bombas, porque es la más adecuada para manejar más cantidad de líquido que la bomba de desplazamiento positivo (Vega, 2008).

1.3 Tipos de transferencia de calor

Existen tres métodos para la transferencia de calor: Conducción, Convección y Radiación. Conocer cada tipo y saber cómo funciona le permite entender mejor cómo los sistemas de aislamiento y burletes protegen el espacio acondicionado.

Conducción: En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de ordenadores (computadoras) analógicos y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada.

Convección: Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas,

su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Supongamos, por ejemplo, que calentamos desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior — que está más frío— desciende, mientras que al aire cercano al panel interior —más caliente— asciende, lo que produce un movimiento de circulación.

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección, que hacen que el aire caliente suba hacia el techo y el aire frío del resto de la habitación se dirija hacia el radiador. Debido a que el aire caliente tiende a subir y el aire frío a bajar, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural, y del tiro de las chimeneas. La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie.

Radiación: Es la transferencia de calor, en forma de energía electromagnética, por el espacio. La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un

término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. (James R. Welty, 2008).

1.4 Intercambiadores de Calor

Es muy común el uso de los intercambiadores térmicos para lograr los cambios de temperaturas en los productos. El papel de los intercambiadores térmicos ha adquirido una creciente importancia recientemente al empezar a ser conscientes los técnicos de la necesidad de ahorrar energía.

Un intercambiador de calor es un dispositivo que transfiere la energía térmica interna entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas (Arka y Sunnilbhai, 2016)

1.4.1 Tipos más usados de Intercambiadores de Calor

- **Tubo doble:** Es el tipo más sencillo de intercambiador de calor. Está constituido por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes. Uno de los fluidos fluye por el tubo de menor diámetro y el otro fluido fluye por el espacio anular entre los dos tubos. En este tipo de intercambiador son posibles dos configuraciones en cuanto a la dirección del flujo de los fluidos: contraflujo y flujo paralelo. En la configuración en flujo paralelo los dos fluidos entran por el mismo extremo y fluyen en el mismo sentido. En la configuración en contraflujo los fluidos entran por los extremos opuestos y fluyen en sentidos opuestos.
 - En un intercambiador de calor en flujo paralelo la temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente.
 - En un intercambiador de calor en contraflujo la temperatura de salida del fluido frío puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente. El caso límite se tiene cuando la temperatura de salida del fluido frío es igual a la temperatura de entrada del fluido caliente. La temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de entrada del fluido caliente.
- **Compactos.** Son intercambiadores diseñados para lograr una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen. La razón entre el

área superficial de transferencia de calor y su volumen es la densidad de área (**b**). Un intercambiador con $b > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ se clasifica como compacto. Ejemplos de intercambiadores de calor compactos son los radiadores de automóviles, los intercambiadores de calor de cerámica de vidrio de las turbinas de gas, el regenerador del motor Stirling y el pulmón humano.

- En los **intercambiadores compactos** los dos fluidos suelen moverse en direcciones ortogonales entre sí. Esta configuración de flujo recibe el nombre de flujo cruzado. El flujo cruzado se clasifica a su vez en mezclado (uno de los fluidos fluye libremente en dirección ortogonal al otro sin restricciones) y no mezclado (se disponen una placas para guiar el flujo de uno de los fluidos).

- **Coraza y Tubos.** Es el tipo más común de intercambiador de calor en las aplicaciones industriales. Están compuestos por tubos cilíndricos, montados dentro de una carcasa también cilíndrica, con el eje de los tubos paralelos al eje de la carcasa. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por el interior de los tubos mientras que el otro se mueve por fuera de éstos, por la coraza (Benítez, 2020). Este tipo de intercambiadores se clasifican por el número de pasos, por el tipo de coraza y por el número de pasos por los tubos. (Marín, Toro. Felipe, 2008)

Los intercambiadores se clasifican normalmente de acuerdo con el arreglo del flujo y el tipo de construcción.

- **Intercambiador de calor de tubos concéntricos:**

Flujo paralelo. Contraflujo.

- **Intercambiador de calor de flujo cruzado:**

Con aletas y ambos fluidos sin mezclar. Sin aletas con un fluido mezclado y el otro sin mezclar.

- **Intercambiador de calor de tubos y coraza:**

Se utilizan con mayor frecuencia que los de cualquier otro tipo. Por lo común, se extienden más allá del casco y sirven como bridas a alas que se sujetan con pernos los cabezales del lado de los tubos. Utiliza una construcción de tipo de empaque

ciego y éste no es accesible al mantenimiento o el reemplazo, este tipo de unidad se utiliza para condensadores superficiales de vapor, que funcionan en el vacío.

El cabezal del lado de los tubos se puede soldar a la lámina tubular, para cabezales de tipo C y N. Este tipo de construcción es menos costosa que B y M o A y L, y le ofrece de todos modos la ventaja que los tubos se pueden examinar y reemplazar sin tocar las conexiones de tuberías del lado del tubo. No hay limitaciones para el número de pasos del lado de los tubos. Los tubos pueden llenar por completo el casco del intercambiador de calor.

- **Intercambiador de calor de tubo en U:** El haz de tubo consiste en una lámina tubular estacionaria, tubos en U, desviadores o placas de soporte y espaciadores y tirantes apropiados. El haz de tubos se puede retirar del casco del intercambiador. Se proporciona un cabezal de lado de los tubos y un casco con cubiertas integrada, que se suelda al casco mismo. Cada tubo tiene libertad para dilatarse o contraerse, sin limitaciones debidas a la posición de los otros tubos. Tiene la ventaja de proporcionar franqueo mínimo entre el límite exterior y interior del casco, para todas las construcciones de haces de tubos desmontables, reduce el número de juntas. En la construcción para altas presiones, esta característica es muy importante, puesto que reduce tanto el costo inicial como el de mantenimiento.

El calentador de succión de tanque; contiene un haz de tubo en U. Este tipo de diseño se utiliza con frecuencia en tanques de almacenamiento de aire libre, para combustibles pesados, alquitrán, melazas y fluidos similares, cuya viscosidad se debe reducir para permitir el bombeo adecuado. Un extremo del casco del calentador está abierto y el líquido que se calienta pasa por la parte externa de los tubos.

- **Intercambiadores de anillo de cierre hidráulico:** Esta construcción es la menos costosa de los tipos haz de tubos desmontable. Los fluidos del lado del casco y el lado de los tubos se retienen mediante anillos de empaque distintos separados por un anillo de cierre hidráulico y se instalan en la lámina tubular flotante. Este tipo lleva orificio de purga, las fugas en los empaques no darán como resultado la mezcla de los dos fluidos al interior del intercambiador. La anchura de la lámina tubular flotante tiene que ser suficientemente grande para dejar margen para los empaques, el anillo de cierre hidráulico y la dilatación diferencial. El espacio

entre el franqueo entre el límite y la parte interior del casco, es ligeramente mayor para los intercambiadores de tubo en U y el de lámina tubular fija. El uso de un faldón de lámina tubular flotante incrementa este espacio de franqueo. Sin el faldón, el franqueo debe dejar un margen para la distorsión de orificio tubular durante el laminado, cerca del borde exterior de la lámina tubular o para la soldadura del extremo de los tubos en la lámina tubular flotante.

- **Intercambiador de cabezal flotante exterior:** El fluido del casco se retiene mediante anillos de empaque, que se comprimen dentro de un prensaestopas, mediante un anillo seguidor de junta, esta construcción de haz desmontable acomoda la expansión diferencial entre el casco y los tubos y se utiliza para servicio del lado del casco. No hay limitaciones sobre el número de pasos del lado de los tubos o su presión y su temperatura de diseño, este diseño se utiliza con mayor frecuencia en las plantas químicas. El faldón del casco y el tubo flotante, cuando está en contacto con los anillos del empaque, tiene un acabado fino de maquinado. Se inserta un anillo dividido de corte en una ranura de faldón de la lámina tubular flotante. Una brida de respaldo, deslizante que se mantienen en servicio mediante un anillo de corte, se sujeta con pernos en la cubierta exterior del cabezal flotante. La cubierta del cabezal flotante suele ser un disco circular.

- **Intercambiador de cabezal flotante interno:** El diseño del cabezal flotante interno se utiliza mucho en las refinerías petroleras. El haz de tubos es desmontable y la lámina tubular flotante se desplaza para acomodar diferentes dilataciones entre el casco y los tubos. El límite de tubo exterior se acerca al diámetro interno del empaque en la lámina tubular flotante. El anillo dividido de respaldo y un sistema de pernos retienen, por lo común, la cubierta del cabezal flotante en la lámina tubular flotante. Se sitúan más allá del casco y dentro de la cubierta del casco de diámetro mayor. Esta última, el anillo dividido de apoyo y la cubierta del cabezal flotador se deben retirar antes que pueda pasar el haz de tubos por el casco del intercambiador.

- **Intercambiador de cabezal flotante extraíble:** La fabricación es similar al anterior, anillo dividido de respaldo, con la excepción de que la cubierta del cabezal flotador se sujeta directamente con pernos en la lámina tubular flotante. El haz de tubos se puede retirar del casco sin desmontar ni la cubierta ni el casco ni la del cabezal flotador. Esta característica reduce el tiempo de mantenimiento durante la

inspección y las reparaciones. El espacio grande de franqueo entre los tubos y el casco deben dejar un margen tanto para el empaque como para la sujeción con pernos a la cubierta del cabezal flotador. Con frecuencia se utilizan bandas selladoras o tubos falsos para reducir la desviación del haz de tubo.

- **Intercambiador de lámina tubular fija con tubos acodados:** Los tubos se instalan con una ligera curva. La dilatación diferencial afecta la cantidad de acodamiento; pero se eliminan la necesidad de una junta de expansión o una lámina tubular flotante. Las secciones del evaporador se hacen de este modo y se produce el desescamado al flexionarse los tubos.

- **Intercambiador de tubos de bayoneta:** Este tipo de intercambiador es útil cuando hay una diferencia de temperatura considerable entre los fluidos del lado del casco y el de los tubos, puesto que todas las partes sujetas a la dilatación diferencial tienen libertad para moverse independientemente unas de otras. Esta construcción única no sufre fallas debida a la congelación del condensado del vapor, puesto que el vapor en los tubos internos de funcionamiento intermitente. Los costos son relativamente altos, puesto que sólo los tubos de gas exteriores transmiten calor al fluido del lado del casco. Los tubos internos no tienen soportes. Los extremos se apoyan en placas de soporte o desviadores tradicionales.

- **Intercambiadores de tubos en espiral:** Consisten en un grupo de serpientes devanados en espiral, que se conectan en general mediante múltiples. Las características incluyen el flujo a contracorriente, la eliminación de las dificultades provocadas por la dilatación diferencial, un tamaño pequeño y una velocidad constante.

- **Intercambiadores de membrana descendente:** Los intercambiadores de calor de casco y tubo de membrana descendente el fluido entra por la parte superior de los tubos verticales. Los distribuidores o los tubos ranurados ponen el líquido en el flujo de la membrana sobre la superficie de los tubos y la membrana se adhiere a la superficie del tubo, mientras cae al fondo de él. La membrana se puede enfriar, calentar, evaporar o congelar, con el medio apropiado de transferencia de calor fuera de los tubos. Se usan diseños de láminas tubulares fijas, con o sin junta de expansión y de cabezales exteriores empaquetados. Las ventajas, son el índice elevado de transferencia de calor, la falla de caída de presión interna, el tiempo

breve de contacto, la facilidad de acceso a los tubos para su limpieza y, en algunos casos, la prevención de las fugas de un lado al otro.

- **Intercambiadores de calor de teflón:** Existen intercambiadores de calor de casco y tubo de teflón con tubos de resina de fluorocarbono de teflón, químicamente inerte. Los tubos mayores se utilizan primordialmente cuando las limitaciones de caída de presión o las partículas reducen la eficiencia de los tubos menores. En general, estos intercambiadores de calor funcionan con caídas más altas de presión que las unidades tradicionales y son más apropiados para fluidos relativamente limpios. Puesto que son químicamente inertes, los tubos tienen muchas aplicaciones en las que otros materiales se corroen. Los intercambiadores de calor son de paso simple, con diseño de flujo a contracorriente y haces de tubos desmontables. Los haces de tubos se componen de tubos rectos y flexibles de teflón, unidos unos a otros en láminas tubulares integrados en forma de panel. Los tubos individuales se separan mediante bandas de teflón a las que se sueldan. Los haces se sellan dentro de los cascos mediante anillos en O y se pueden desmontar con facilidad del casco.

- **Intercambiadores de tuberías dobles:** Se utilizaron por muchos años, sobre todo para índices de flujos bajos y gamas de temperaturas elevadas. Esas secciones de tuberías dobles están bien adaptadas para aplicaciones a altas temperaturas y presiones elevadas, debido a sus diámetros relativamente pequeños que permiten el empleo de bridas pequeñas y secciones delgadas de paredes, en comparación con los equipos ordinarios de casco y tubo. (E. Torres y J.A. Soto. M.T. Martínez. 2004).

1.5 Métodos de evaluación de intercambiadores de calor

Para predecir el rendimiento de un intercambiador de calor, es esencial relacionar la transferencia total de calor con las temperaturas de entrada y salida del fluido, el coeficiente global de transferencia de calor y el área superficial total para la transferencia (Incropera y DeWitt, 2011).

Los métodos más usados en la evaluación de intercambiadores de calor son:

- Método del Factor de Corrección de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (F_T –LMTD)
- Método de la Eficiencia y el Número de Unidades de Transferencia (ϵ – NTU)
- Método ψ –P

1.5.1 Método del Factor de Corrección de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (FT–LMTD):

Para determinar el flujo de calor transferido es necesario conocer la diferencia de temperaturas entre los dos fluidos. Como el proceso consiste en transferir calor de un fluido caliente a uno frío, es evidente que la diferencia de temperaturas a la entrada en el intercambiador de calor será máxima y que esta se reducirá según los fluidos circulan por el intercambiador, por lo que a la salida se encontrará la menor diferencia de temperatura. Por lo tanto, dicha diferencia es variable. Además, depende de la disposición de los tubos, del número de pasos y de la geometría del equipo (Incropera y DeWitt, 2011; Towler y Sinnott, 2008).

Por otra parte, (McCabe *et al.*1998) e (Incropera y DeWitt, 2011) coinciden al afirmar que la diferencia de temperatura es mayor cuando las corrientes de proceso están en contracorriente, y se aumenta la velocidad de transferencia de calor.

Este método puede ser aplicado si se consideran constantes a lo largo de toda la superficie el coeficiente de transferencia de calor y el calor específico para cada uno de los agentes portadores de calor. En el caso de que estos valores cambien considerablemente a lo largo de la superficie de intercambio de calor, resulta inexacta la aplicación del diferencial logarítmico de temperatura, y para ello la ecuación principal de transferencia de calor se resuelve al emplear el método de integración gráfica (Towler y Sinnott, 2008).

1.5.2 Método de la Eficiencia y el Número de Unidades de Transferencia

(ϵ – NTU):

Este método fue desarrollado por primera vez en detalle por Kays M. y London A. en 1955, y se basa en determinar la cantidad de calor transferido respecto a la máxima cantidad de calor posible a transferir durante el proceso dado. (Imbert y Guillen, 2011).

Se basa además en el concepto de la efectividad del intercambiador de calor, el cual es un parámetro adimensional, definido como la razón de la transferencia de calor real entre la máxima transferencia de calor que puede ser posible si se tratara de un intercambiador de contraflujo.

Es un procedimiento ideal para evaluar el funcionamiento de un intercambiador de calor ya existente, puesto que se emplea cuando el área de transferencia de calor y

los detalles de la construcción son conocidos. Consiste en determinar el intercambio de calor por cada grado de diferencia de temperatura (Izquierdo, 2001); (Towler y Sinnott, 2008).

El Método de la Eficiencia y el Número de Unidades de Transferencias un procedimiento ideal para evaluar el funcionamiento de un intercambiador de calor ya existente, puesto que se emplea cuando el área de transferencia de calor y los detalles de la construcción son conocidos, además la aplicación del método ha crecido y en la actualidad se puede considerar como uno de los procedimientos más aceptados para el diseño y análisis de intercambiadores de calor.

Sin embargo, en algunas circunstancias las temperaturas de los fluidos en las salidas constituyen en sí las incógnitas en un intercambiador de calor dado, por lo que el análisis térmico mediante la diferencia media logarítmica de temperaturas es de naturaleza iterativa y requiere tanteos. En estos casos es más conveniente emplear un método de análisis térmico basado en la efectividad-número de unidades de transferencia que tiene un intercambiador de calor dado para transferir energía.

1.5.3 Método ψ – P:

Según (Towler y Sinnott, 2008) el método ψ – P combina las variables de los métodos F_T -LMTD y ϵ -NTU. El término ψ se introduce como la relación de la diferencia verdadera de temperaturas y la diferencia de temperaturas en el cabezal frío (la diferencia entre las temperaturas a la entrada de los dos fluidos, $T_1 - t_1$).

1.6 Conservación de alimentos

La conservación de los alimentos, es un mecanismo empleado para proteger a los mismos contra los microbios y otros agentes responsables de su deterioro para permitir su futuro consumo. Los alimentos para su consumo deben mantener un aspecto, sabor y textura apetitosos así como su valor nutritivo original.

En general los alimentos son perecederos, por lo que necesitan ciertas condiciones de tratamiento, conservación y manipulación. Su principal causa de deterioro es el ataque por diferentes tipos de microorganismos (bacterias, levaduras y mohos). Esto tiene implicaciones económicas evidentes, tanto para los fabricantes (deterioro de materias primas y productos elaborados antes de su comercialización, pérdida de la imagen de marca, etc.) como para distribuidores y consumidores (deterioro de

productos después de su adquisición y antes de su consumo). Se calcula que más del 20% de todos los alimentos producidos en el mundo se pierden por acción de los microorganismos.

Por otra parte, los alimentos alterados pueden resultar muy perjudiciales para la salud del consumidor. La toxina botulínica, producida por una bacteria, *Clostridium botulinum*, en las conservas mal esterilizadas, embutidos y en otros productos, es una de las sustancias más venenosas que se conocen (miles de veces más tóxica que el cianuro). Otras sustancias producidas por el crecimiento de ciertos mohos son potentes agentes cancerígenos. Existen pues razones poderosas para evitar la alteración de los alimentos. A los métodos físicos, como el calentamiento, deshidratación, irradiación o congelación, pueden asociarse métodos químicos que causen la muerte de los microorganismos o que al menos eviten su crecimiento.

Existen factores causales que intervienen en la descomposición o deterioro de los alimentos, estos son: factores físicos, factores químicos y factores biológicos.

Deterioro por enzimas: Origina cambios individuales en el sabor, color, textura del alimento. Muchas frutas peladas se oscurecen rápidamente en su superficie a causa de la actividad de las enzimas oxidasas y el oxígeno. Las enzimas pectasas le confieren viscosidad al jugo de tomate y otras frutas provocando su rápida sedimentación de la porción sólida lo que lo hace poco alterado.

Deterioro por microorganismos: Principalmente se producen por bacterias, levaduras y mohos. Los alimentos pueden contaminarse por el propio alimento, el hombre y las superficies. (Colectivo de autores, Tomo II, 1987)

1.6.1 Principios en que se basa la conservación de los alimentos

Retraso de la actividad microbiana: Esto se realiza al mantener los alimentos en asepsia, eliminando los microorganismos existentes por filtración, obstaculizando el crecimiento por bajas temperaturas, desecación y destruyendo los microorganismos por calor.

Retraso de la auto descomposición: A través de destruir las enzimas por escaldado, retrasando las reacciones químicas por ejemplo evitando la oxidación.

La congelación impide la multiplicación de los microorganismos (bacterias y hongos microscópicos). Los alimentos congelados tienen las mismas propiedades

nutricionales y organolépticas que los frescos, la congelación sí supone algunas alteraciones físicas, pues la dilatación que experimenta el agua al transformarse en cristales de hielo rompe las estructuras celulares, no obstante esto no afecta la calidad para el consumo. Los alimentos pueden permanecer en un congelador doméstico entre 3 y 12 meses con toda seguridad y sin que su calidad se vea afectada.

1.6.2 Existen dos formas de conservación a bajas temperaturas

Refrigeración:

Mantiene el alimento por debajo de la temperatura de multiplicación bacteriana. Conserva el alimento sólo a corto plazo, ya que la humedad favorece la proliferación de hongos y bacterias. La conservación por refrigeración se lleva a cabo con temperatura por encima de 0°C (generalmente entre 2°C y 5°C en frigoríficos industriales, y entre 8°C y 15°C en frigoríficos domésticos). La temperatura debe mantenerse uniforme durante el periodo de conservación, dentro de los límites de tolerancia admitidos, en su caso, y ser la apropiada para cada tipo de producto. (Orrego, 2020)

Congelación:

La congelación es el proceso de preservación originado por la reducción de la temperatura por debajo de aquella en la que se comienzan a formar cristales en un material alimenticio. Se utiliza en muchos productos. Muchas frutas y las verduras se congelan y se conservan de esa manera hasta justo antes de su consumo. (Orrego, 2020)

La industria de la alimentación ha desarrollado cada vez más las técnicas de congelación para una gran variedad de alimentos, para ello se someten a un enfriamiento muy rápido, a temperaturas del orden de -30°C con el fin de que no se lleguen a formar macrocristales de hielo que romperían la estructura y apariencia del alimento. Con frecuencia envasados al vacío, pueden conservarse durante meses en cámaras de congelación a temperaturas del orden de -18°C a -20°C, manteniendo su aspecto, valor nutritivo y contenido vitamínico. El fundamento de la congelación es someter a los alimentos a temperaturas iguales o inferiores a las necesarias de mantenimiento, para congelar la mayor parte posible del agua que contienen. Durante el período de conservación, la temperatura se

mantendrá uniforme de acuerdo con las exigencias y tolerancias permitidas para cada producto. (Orrego, 2020)

Detiene la vida orgánica, ya que enfría el alimento hasta los -20°C (en congeladores industriales llega hasta -40°C). Es un buen método, aunque la rapidez en el proceso influirá en la calidad de la congelación.

1.6.3 Procedimientos de congelación

Congelación lenta: Se refiere a la congelación en aire circulante, o en algunos casos el aire puede estar movido por ventiladores eléctricos. La temperatura suele ser de -23°C , variando entre -15°C y -29°C , teniendo lugar la congelación entre 3 y 12 horas. Produce cambios de textura y valor nutritivo.

Congelación rápida: Es el proceso en que el producto se va congelando a razón de 0,3 cm por minuto o más rápido o es la congelación que se produce en menos de 90 minutos. Mantiene las características nutritivas y organolépticas.

Congelación rápida: Sistema por contacto directo: Se emplean soluciones incongelables (salmuera, jarabes) que se enfrían a temperaturas muy bajas. En unos casos los alimentos se sumergen en la solución y en otros la solución se pulveriza sobre el alimento. En ambos casos el producto está sin envasar.

Ventajas de la congelación rápida:

- El producto llega más rápidamente a la temperatura en que el desarrollo de los microorganismos deteriorantes es nulo, así como se inhibe la actividad enzimática.
- El producto cuando se descongela, está sujeto a menos pérdida de líquido, en muchos casos se asemeja al producto original.
- El producto permanece menos tiempo en la zona de máxima formación de cristal. Esta zona está situada entre 0°C y $-3,88^{\circ}\text{C}$, y en ellos los cristales de hielo formados sobre la base de la humedad del producto aumentan de tamaño.

Entre la producción y la distribución para el consumo, es vital que nunca se interrumpa la “cadena de frío”. En efecto, la congelación no destruye todas las bacterias, y las que sobreviven se reactivan en cuanto se descongelan y empiezan a desarrollarse muy rápidamente, estas se reaniman en la comida al descongelarse y a menudo se multiplican mucho más rápido que antes de la congelación, por tanto, la más ligera elevación de la temperatura durante el almacenaje o el transporte

hasta el momento de consumir pone en peligro toda la técnica, la calidad del producto y hasta la salud de los consumidores.

Las bajas temperaturas retardan las reacciones químicas, la acción de las enzimas y retrasan o inhiben el crecimiento y actividad de los microorganismos. Cuanto más baja sea la temperatura más lenta serán las reacciones químicas, la acción enzimática y el crecimiento bacteriano.

A medida que la temperatura desciende por debajo de la óptima, el ritmo de crecimiento del microorganismo decrece, siendo mínimo a la temperatura de crecimiento mínimo. Las temperaturas más frías previenen el crecimiento, pero aunque lentamente continúa la actividad metabólica. Por tanto, rebajar la temperatura produce efectos diferentes en los distintos microorganismos. Una disminución de 10°C, puede detener el crecimiento de unos y retrasar el de otros.

1.6.4 Importancia sanitaria de la conservación a bajas temperaturas

Epidemiología: Al imposibilitar el desarrollo de los microorganismos previenen los brotes de intoxicación alimentaria y contribuye a evitar que los alimentos sean mantenidos en condiciones que puedan permitir que una ligera contaminación inicial pudiera incrementarse a niveles que hicieran peligroso su consumo.

Microbiología: La ausencia de brotes de fiebre tifoidea atribuidos a alimentos congelados indica que hay poco peligro de que los alimentos conservados por este procedimiento sean fuente de origen de esta enfermedad, a menos que la contaminación sea masiva. Investigaciones realizadas con cepas de Salmonellas han demostrado que la refrigeración a 5°C o menos debe emplearse para asegurar que estos microorganismos no se desarrollen en los alimentos. Por debajo de esta temperatura estos microorganismos disminuyen rápidamente.

Valor nutritivo: No afecta el valor nutritivo excepto algunas de las vitaminas en cantidades mínimas. Hay ligera pérdida de la humedad en los alimentos congelados.

Medidas de control: Debe vigilarse la temperatura de las neveras, congeladores, transportes, etc, manteniéndola al nivel apropiado y evitando fluctuaciones de estas.

Los alimentos a refrigerar o congelar deben estar en óptimas condiciones de empaque.

-Las neveras deben recibir una limpieza adecuada, las paredes y techos deben pintarse con pinturas a prueba de mohos.
-Deben evitarse la recongelación de alimentos que se hayan descongelado. (Del Puerto Quintana, 2008)

1.7 Tiempo de congelación

Existen varios factores que influyen en el tiempo de congelación que influirán en el diseño del equipo utilizado para la congelación de los alimentos. Uno de estos factores es la temperatura del medio de congelación, de tal manera que los tiempos de congelación disminuirán de manera significativa cuanto menor sea ésta.

La velocidad de congelación es uno de los factores más importante que influencia la calidad de los alimentos. Así, frecuentemente se requiere estimar tiempos de congelación para determinar procedimientos adecuados para la producción o distribución de alimentos congelados. (Cleland, 1997)

El tiempo de congelación se tiene que definir en términos de una posición dada en la distribución de temperatura dentro de la muestra. El "centro térmico", o la posición que se enfría más lentamente se usa comúnmente como la posición de referencia.

Los alimentos no tienen el punto de congelación característico que está asociado con los materiales puros. Una definición de tiempo de congelación requiere una definición del punto de congelación. (Cleland, 1997)

Existen conceptos de que el tiempo de congelación es la duración del periodo del cambio de fase, otros que es la duración del proceso completo de congelación, incluyendo: pre-enfriamiento, cambio de fase y el periodo de sobre enfriamiento.

Los procedimientos para determinar tiempos de congelación, se pueden clasificar en 3 grupos:

1. - Experiencias de transferencia de calor. Se evalúa el tiempo de congelación a través de mediciones de la temperatura del alimento durante la operación de congelación específica.
2. - Fórmulas teóricas: cálculo del tiempo de congelación mediante el uso de fórmulas que se obtienen por resolución de las ecuaciones de transferencia de calor.

3. - Fórmulas semiteóricas: cálculo del tiempo de congelación usando fórmulas que se obtienen a través de la combinación de fórmulas teóricas y datos experimentales.

Conclusiones parciales del capítulo 1

- 1) La industrialización de la piña tiene gran importancia para el desarrollo de disímiles productos industriales por ser uno de los rubros más rentables y de mayor importancia nutricional.
- 2) La forma más frecuente de trasladar un fluido de un punto a otro es a través de un sistema de tuberías circulares las cuales ofrecen una mayor resistencia estructural y presentan además válvulas y accesorios.
- 3) En los procesos industriales y sobre todo en la industria alimenticia la mayoría de las operaciones de enfriamiento se realizan en los intercambiadores de calor, los cuales se presentan de diferentes tipos clasificados en su mayoría por el arreglo del flujo y su construcción.
- 4) El Método de la Eficiencia y el Número de Unidades de Transferencia en la actualidad se puede considerar como uno de los procedimientos más aceptados para el diseño y análisis de intercambiadores de calor conociendo los datos del intercambiador a evaluar.

Capítulo 2: Materiales y métodos

A continuación se describirá la metodología a seguir para la realización de este proyecto, teniendo en cuenta elementos tales como: una caracterización de la UEB “Héroes de Girón” en cuanto a su ubicación, desempeño y principales producciones, además se describe el proceso de producción de jugo concentrado congelado de piña, servicios tecnológicos, el procedimiento utilizado para el análisis estadístico de las temperaturas de llenado del producto, las diferentes alternativas propuestas para dar solución al problema existente, la metodología seguida para el análisis de mecánica de fluidos y para el cálculo del ahorro a partir de la eficiencia en las cámaras, la evaluación ambiental y económica de la modificación.

2.1 Caracterización de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”

La misión fundamental de la empresa es producir alimentos de la más alta calidad en completa armonía con el medio ambiente, con honestidad y respeto a los clientes. Su principal producción son los jugos simples, concentrados congelados y asépticos de naranja, toronja y piña. Además se producen aceites esenciales derivados de la naranja y la toronja, forraje cítrico para alimento animal, pulpas, pastas, néctares y conservas de frutas tropicales (mango, guayaba, y tomate).

2.2 Descripción tecnológica del proceso productivo

Las frutas son transportadas desde el frente de cosecha a través de camiones hasta la industria, luego se procede a su pesaje en la báscula, continuando hasta el área de recepción donde se descargan, en este sitio es tomado al azar una muestra, para analizar algunos parámetros de calidad de las frutas, se determina la cantidad (%) de sólidos solubles (Brix), acidez y contenido de jugo. Desde el área de descargue son transportadas y elevadas por cintas transportadoras y elevadores de cangilones hasta los silos pasando por una mesa de preselección donde son separados las piedras, palos, pedúnculos que puedan traer desde el campo. Después de un almacenamiento temporal en los silos, la fruta es trasladada por canal de agua hasta la línea de trabajo constituida por:

Una lavadora, en este equipo las frutas son lavadas con agua tratada con hipoclorito de sodio, el contenido de cloro en el agua tiene que ser de 0.5 – 1.0 p.p.m para eliminar posibles bacterias o microorganismos presentes en las frutas. El recorrido

continúa, subiendo las frutas por un elevador de cangilones hasta el transportador inclinado que alimenta la prensa.

A partir del jugo extraído se obtienen dos productos mediante procesos diferentes:

- Obtención de jugo concentrado congelado

Jugo Concentrado Congelado: al jugo obtenido en la prensa se le separa la pulpa grosera en los tamizadores, el jugo tamizado se impulsa a través de una centrífuga clarificadora para disminuir el contenido de pulpa hasta un valor deseado y enviado a los evaporadores, equipo en el cual por intercambio con vapor de agua se le extrae al jugo, la esencia y el agua que este contiene. Al evaporarse gran parte del agua que contenía el jugo se obtiene concentrado. Este jugo es enviado a los tanques de ajuste cada uno de 20 000 L y previstos de agitadores con el objetivo de homogenizar el lote. Estos tanques están contruidos de acero inoxidable y presentan un doble forro por donde circula amoníaco como agente refrigerante para mantener su temperatura, ajustado el °Brix, y el lote homogéneo, el jugo concentrado se bombea hacia la llenadora, donde el producto es envasado en dos bolsas de nylon que van dentro de los bidones, una vez llenas las bolsas con el peso requerido, se amarran con un atalazo, posterior a esto es tapado el bidón, asegurada su tapa y almacenados en las cámaras frías a -15 °C, listos para su exportación.(Anexo # 1)

A partir de la descripción tecnológica del proceso se plantea una metodología a seguir para evaluar la propuesta que se muestra en el (Anexo # 2) aplicando los cálculos necesarios para la evaluación del intercambiador de calor.

Descripción de las diferentes etapas tecnológicas de la planta.

Lavado de frutas

La fruta almacenada se somete a un proceso de lavado con agua a temperatura ambiente para eliminar las suciedades u otras sustancias que afectan su limpieza.

Prensa

Las piñas caen por gravedad en la prensa las cuales son prensadas para obtener el jugo, la parte solida va al sinfín de desecho para alimento animal

Tamizado

El jugo bruto procedente de la prensa alimenta por bombeo a los tamizadores, con el objetivo de eliminar las partículas groseras y disminuir el contenido de pulpa.

Centrifugación

El jugo tamizado se impulsa a través de una centrífuga clarificadora cuando es necesario disminuir el contenido de pulpa hasta un valor deseado.

Concentración

El jugo recién extraído se concentra en uno de los tres evaporadores existentes para este fin, según el caudal de jugo a evaporar.

Ajuste

El concentrado obtenido puede ser ajustado, en función de su posterior uso, en ambos casos se requiera que el producto esté en depósitos donde sea posible su homogenización para evitar variaciones en las características físicas y químicas debido a las distintas características de la materia prima. Se utiliza el sistema de enfriamiento para la conservación del producto en caso de sufrir paradas prolongadas.

Rotulado de bidones

Los bidones metálicos se rotulan manualmente declarando la siguiente información:

- Nombre del producto
- Empresa productora
- Empresa exportadora
- Peso neto
- Peso bruto
- Tara
- No. del lote
- No. del bidón
- Sólidos solubles
- Marcas gráficas de identificación

Envasado

El jugo concentrado congelado se envasa en bidones de acero con peso neto de 245 kg con dos bolsas de polietileno para evitar el contacto del producto con otra superficie.

- Las bolsas de polietileno estarán limpias y sin roturas.
- Cada bidón tendrá marcado la información del lote, así como las marcas gráficas acorde a lo establecido en las Instrucciones de Trabajo.

Almacenamiento

Los bidones se colocan en paletas y se conducen a las cámaras de enfriamiento de - 15°C, donde estará hasta tanto no tome la temperatura máxima para poder ser transportado para la exportación.

Transportación

El producto se transportará en vehículos refrigerados. Cuando el tiempo de transportación no excede las 6 horas se podrá transportar en otros vehículos tapando adecuadamente los bidones.

- Caracterización de los principales equipos.

Son varios los equipos que forman parte de la configuración tecnológica de la planta de producción, dentro de los principales se encuentran:

Prensa

Prensa horizontal revestida en acero negro con bandeja y partes en contacto con el producto de acero inoxidable, malla inoxidable de 0.8 mm. Para su buen funcionamiento en general, es importante velar que los parámetros fundamentales de operación estén en los valores adecuados, por ejemplo:

- La presión (6 bar) y caudal de aire (14 l/min)

Sus dimensiones son aproximadamente 1.75 m de ancho, 6.20 m de largo y 1 m de altura. Esta máquina es capaz de procesar 6 - 8 ton de fruta en una hora. Este sistema de extracción garantiza buena calidad en los jugos obtenidos, y está ubicada en el área de extracción. Para la recolección del jugo hay un tanque de almacenamiento de 3000 litros de capacidad de acero inoxidable y el jugo es bombeado a los tamizadores por una bomba centrífuga.

Tamizadores

En cada una de las líneas existe un tubo colector que recoge por gravedad el jugo procedente de las cajas de jugo de los extractores, posteriormente pasa por 4 tamizadores de jugo donde este es filtrado y se elimina la pulpa grosera, construidos de acero inoxidable, lleva incorporado un controlador neumático de salida de pulpa incluyendo controlador y manómetro de 3 Kg./cm² máximo, en esta operación se controla la presión en el tamizador, la fibra rápida (ajuste del tamizador) y la pulpilla (o presencia de pulpa grosera en el jugo) controlando así el normal funcionamiento de los tamizadores.

Centrifuga

En la separación de sólidos y fluidos de diferentes densidades se utiliza la fuerza centrífuga reemplazando la fuerza de gravedad, dando como resultado una más rápida sedimentación. Esta fuerza es la que causa la sedimentación de las partículas más pesadas a través de la película de líquido, y hace que la fase ligera vaya hacia el centro y la fase pesada hacia fuera o sea hacia las paredes.

Clarificación:

Tiene como objetivo obtener un efluente puro, es decir, centrifugación del jugo para obtener uno de menor contenido de pulpa.

La estructura es de hierro fundido y la parte en contacto con el jugo de acero inoxidable AISI 316.

Entre los parámetros de operación para su buen funcionamiento son:

- Presión de agua de maniobra (13 kg/cm²)
- Presión de aire (6 kg/cm²).
- Tiempo de descarga parciales 10 min.
- Tiempo de descargas totales 1 h

Evaporadores

Los evaporadores TASTE (Termo Acceleration Short Time Evaporator), son los encargados de concentrar el jugo obtenido de la fruta, estos aplican el principio de reducción de la temperatura de ebullición por enrarecimiento (vacío) del aire. Se obtienen productos concentrados sin deterioro de sus características organolépticas.

Estos son evaporadores de múltiplo efecto que quiere decir que el vapor se usa más de una vez antes de perderse en la condensación. Están compuestos por varias etapas de evaporación que son cuerpos con un haz de tubos dentro de una coraza.

En estos intercambiadores es importante el control de varios parámetros de operación para su buen funcionamiento como son:

- caudal de vapor (4 500 kg/h)
- presión de vapor (13 kg/cm²)
- presión del vacío (- 0.9 kg/cm²)
- temperatura a la salida (máximo 15 °C).

La estructura de estos equipos es de acero al carbono, las tuberías y accesorios que están en contacto con el producto son de acero inoxidable 316. Para evitar la corrosión en las partes de acero común se prepara la superficie y se recubre con pinturas primarias y secundarias epóxicas cada cierto tiempo.

Las dimensiones aproximadas de estos equipos son:

Largo: 7 m

Ancho: 5 m

Altura aproximada: 30 m

La capacidad de evaporación total es de 150 000 lb/h de agua evaporada. Dos de estos evaporadores son de 40 000 lb/h cada uno, uno de 10 000 lb/h y el otro de 60 000 lb/h.

Llenadora

Después de estandarizado el lote con las características de calidad requeridas el jugo concentrado es bombeado hacia la llenadora, este equipo es semiautomático y es donde se envasa el producto terminado en bidones de 200L, estos pasan a almacenarse en cámaras de congelación para su posterior exportación. Está formada por un sistema de válvulas automáticas que funcionan según la señal de unos sensores o celdas de carga que se encuentran en la báscula para garantizar que cada bidón tenga el peso requerido. Está construida de acero inoxidable AISI 316 resistente a la corrosión. Tiene una capacidad de 15 t/h. Pertenece al área de llenado, solo funciona cuando se envasan los productos terminados.

Caracterización del Sistema de Refrigeración de la industria.

El sistema de refrigeración tiene una capacidad de 500 TR (1 Toneladas de Refrigeración = 3 024 kcal = 12 000 BTU). Está compuesto por cinco cámaras refrigeradas, tres de congelación y dos de conservación, las cámaras de congelación diseñadas para -20 °C tienen cuatro evaporadores con tres ventiladores cada uno, y las cámaras de alta diseñadas para 5 °C tienen tres evaporadores de tres ventiladores. Todos los motores de los ventiladores son consumidores de energía eléctrica. También existen 6 compresores de amoníaco que funcionan en doble etapa de compresión, son del tipo SMC con potencia del motor de 132 kW cada uno (los de alta) y 75 y 110 kW (los de baja).

El condensador es del tipo evaporativo con un motor de 18 kW y una bomba de agua de 5.5 kW.

Todo el trasiego de refrigerante es por tuberías de acero al carbono, extrafuerte sin costuras de diferentes diámetros y la alimentación a cada cámara es por bombeo, una bomba para sistema de alta y una para las cámaras del sistema de baja.

El área del frigorífico cuenta con un metrocontador de energía eléctrica que se lee diariamente y las lecturas corroboran que el 40% del consumo de energía eléctrica de la empresa lo consume esta área. Por tanto la disminución de días de estadía en refrigeración significa ahorro de uno de los más importantes portadores energéticos de la empresa, además del ahorro por concepto de alquiler de cámaras, transportación a otros frigoríficos, movimientos innecesarios de montacargas, etc.

2.3 Recopilación y procesamiento de datos

Para procesar los datos de temperaturas tanto a la salida del evaporador como en la llenadora en el momento del envasado de los lotes, se utilizan métodos estadísticos que ayudan a conocer el comportamiento de esta variable (Programa Statgraphics Plus v. 5.0). Se calcula la temperatura media en cada caso, tomando para la salida de los evaporadores, los valores promedios diario de cada recorrido del analista de turno durante los meses de Marzo y Abril y en el llenado, los valores correspondientes a cada lote de jugo concentrado en el mismo período.

2.4 Balance de materiales

El jugo natural contenido en la fruta y que proviene de la línea de extracción entra a los evaporadores con el fin de concentrar los sólidos hasta valores especificados en los requisitos de calidad.

Dentro de los concentradores, por intercambio con vapor, el agua que acompaña al jugo comienza a evaporar, el caudal de jugo es menor porque ha perdido el agua y la concentración de sus sólidos es mayor. El agua más tarde y dentro del propio equipo se condensa; todo este proceso se rige por la ecuación.

$$JN * {}^{\circ}Bx_{JN} = JC * {}^{\circ}Bx_{JC} \quad (2.1)$$

$$H_2O_{evap} = JN * \left(1 - \frac{{}^{\circ}Bx_{JN}}{{}^{\circ}Bx_{JC}}\right) \quad (2.2)$$

Donde:

H_2O_{evap} : Flujo de agua evaporada (kg/h).

JN: Flujo de jugo natural (kg/h).

JC: Flujo de jugo concentrado (kg/h).

${}^{\circ}Bx_{JC}$: Brix del jugo concentrado.

${}^{\circ}Bx_{JN}$: Brix del jugo natural.

2.5 Balances de energía mecánica y energía calorífica. Evaluación técnica

2.5.1 Balances de energía mecánica

Para implementar la propuesta la UEB solo cuenta con un Intercambiador de calor de tubo y coraza (Intercambiador de calor tubular, Doc No. TeM-1230500-05, Tetra Pak), por lo que es necesario la adquisición del resto de los insumos del sistema. De ahí que se diseñe el sistema de flujo, se seleccione la bomba adecuada que satisfaga los requerimientos del sistema y se evalúe el intercambiador disponible.

Metodología para la selección de la bomba

Cálculo de la carga de la bomba.

Para el cálculo de la carga de la bomba se utiliza la ecuación de balance de energía mecánica, según la metodología que se presenta a continuación (Rosabal, 2006).

$$\frac{P_1}{\rho_1 * g} + Z_1 + \frac{\alpha_1 * (v_1)^2}{2 * g} + Hb_s = \frac{P_2}{\rho_2 * g} + Z_2 + \frac{\alpha_2 * (v_2)^2}{2 * g} + \Sigma Hf \quad (2.3)$$

Donde:

P₁: presión en el punto #1, Pa

P₂: presión en el punto # 2, Pa

ρ₁: densidad del fluido en el punto # 1, kg/m³

ρ₂: densidad del fluido en el punto # 2, kg/m³

Z₁: altura en el punto #1, m

Z₂: altura en el punto #2, m

α: factor de corrección de energía cinética (α = 1 para régimen de flujo turbulento, α = 0,5 para régimen de flujo laminar)

α₁: factor de corrección de energía cinética en el punto # 1

α₂: factor de corrección de energía cinética en el punto # 2

v₁: velocidad del fluido en el punto # 1, m/s

v₂: velocidad de fluido en el punto # 2, m/s

g: valor de la aceleración de la gravedad, m/s²

H_{bs}: carga del sistema, m

ΣH_f: pérdidas por fricción totales, m

A partir de aplicar el balance de energía mecánica (ec 2.3) al sistema de flujo se obtiene la carga de la bomba necesaria para el sistema (H_{bs}).

Cálculo de las pérdidas por fricción totales (ΣH_f)

Para el cálculo de las pérdidas por fricción totales se considera las pérdidas en tuberías, accesorios e intercambiador de calor. Se tiene en cuenta los tramos de tuberías antes y después del intercambiador por la diferencia de temperatura en ambos tramos, lo cual repercute en las propiedades físicas del fluido. En el diseño se considera el mismo diámetro de tubería en todo el sistema

Las pérdidas por fricción totales se determinan por la siguiente expresión:

$$\Sigma Hf = (Hf_t + Hf_{acc})_{1-3} + (Hf_t + Hf_{acc})_{4-2} + Hf_{IC} \quad (2.4)$$

Donde:

ΣHf : Pérdidas por fricción totales de la instalación, m

Hf_{IC} : Pérdidas por fricción en el Intercambiador de calor, m

Hf_t : Pérdidas por fricción en las tuberías, m

Hf_{acc} : Pérdidas por fricción en accesorios, m

Tramo 1: tramo antes del intercambiador de calor (1-3)

Tramo 2: tramo después del intercambiador de calor (4-2)

✓ Tuberías:

$$Hf_t = \frac{f * v^2 * L}{d * 2g} \quad (2.5)$$

Donde:

Hf_t : pérdidas por fricción total en tuberías, m

f: factor de fricción

v: velocidad del fluido en la tubería, m/s

L: longitud de la tubería, m

d: diámetro de la tubería, m

g: valor de la aceleración de la gravedad, m/s²

1. Cálculo del área de la tubería (A_t , m²):

$$A_t = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (2.6)$$

2. Cálculo de la velocidad del fluido en la tubería (v, m/s)

$$v = \frac{q_s}{A_t} \quad (2.7)$$

Donde q_s es el flujo volumétrico (m³/h) del fluido según Departamento de tecnología, 2015

(Condensado)

3. Cálculo del número adimensional de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho * d * v}{\mu} \quad (2.8)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido en tuberías a la temperatura del fluido, kg/m³

μ : viscosidad del fluido en tuberías a la temperatura del fluido, Pa.s

Re - régimen de flujo turbulento ($Re > 4000$), régimen de flujo turbulento ($Re < 2100$)

4. Factor de fricción: Se determina en la figura 3.9 del Rosabal (2006; p89) a partir del número de Reynolds y de la rugosidad relativa (ϵ).

$$\epsilon = \frac{e}{D} \quad (2.9)$$

Donde:

e : Rugosidad absoluta (mm). Este valor depende del tipo de tubería (Tabla 9 Rosabal, 2006; p281)

✓ Intercambiador de calor: El valor de las pérdidas por fricción en el intercambiador de calor siguiendo (Hf_{IC}) se encuentra en el manual del intercambiador de calor A.P.V - IBERICA, S.A, 1980.

✓ Accesorios

5. Cálculo de las pérdidas por fricción en accesorios (Hf_{acc} , m)

$$Hf_{acc} = \Sigma k * \left(\frac{v^2}{2 * g} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

k : coeficientes de resistencias locales de cada accesorio (Rosabal, 2006).

Cálculo del NPSH del sistema

Para comprobar uno de los criterios de selección de la bomba se calcula el NPSH_s por la siguiente ecuación:

$$NPSH_s = \frac{P_5 - P_v}{\rho * g} \quad (2.11)$$

Donde:

NPSH_s: carga neta de succión positiva del sistema.

P₅: presión de succión de la bomba (punto 5), Pa

P_v: presión de vapor de agua a la temperatura del fluido (tabla 16 del Rosabal, 2006, p290), Pa

Para calcular P₅ se realiza un balance de energía mecánica antes de la bomba (1-5) según la metodología anteriormente descrita.

Evaluación del sistema de Bombeo

Para evaluar el adecuado funcionamiento de la bomba se tienen en cuenta los cuatro criterios imprescindibles para validar el funcionamiento de los sistemas de flujo:

- $H_b > H_{bs}$
- $q_b > q_s$
- $NPSH_s > 0$
- $NPSH_b \leq NPSH_s$

Donde:

H_b: Carga de diseño de la bomba para el flujo de operación. Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba

q_b: Flujo máximo de diseño de la bomba. Se determina a partir de los datos brindados por el fabricante (Catálogo).

NPSH_b: Carga neta de succión positiva de la bomba: Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba

Consumo de potencia (N)

$$N = \frac{H_b \cdot q_s \cdot \rho_1 \cdot g}{\eta} \quad (2.12)$$

Donde:

Eficiencia de la bomba. Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba

2.5.2. Metodología para la evaluación del intercambiador de calor

Para la evaluación de los intercambiadores de calor se utiliza el método de la efectividad y el número de unidades de transmisión (ϵ - NTU) ya que, aunque existen varias metodologías, esta es la más sencilla de aplicar y es una de las más utilizadas (Incropera, 2011).

Para este tipo de intercambiador de tubo y coraza el número de unidades de transmisión (NTU) se calcula por (tabla 11.4; Incropera, 2011) (Anexo # 3)

$$NTU = -(1 + Cr^2)^{-\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{E-1}{E+1} \right) \quad (2.13)$$

Donde

C_r : Relación de capacidad calórica

$$E = \frac{\frac{2}{\xi} - (1 + Cr)}{(1 + Cr^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.14)$$

✓ Cálculo de la eficiencia del intercambiador (ξ , %):

$$\xi = \frac{Q}{Q_{m\acute{a}x}} \times 100 = \frac{m_{cond} C_{p_{cond}} (T_{e_{cond}} - T_{s_{cond}})}{C_{min} (T_{e_{cond}} - T_{e_{lodo}})} \times 100 \quad (2.15)$$

$$Q_{m\acute{a}x} = C_{min} (T_{e_{cond}} - T_{e_{lodo}}) \quad (2.16)$$

Donde:

$Q_{m\acute{a}x}$: Máxima cantidad de calor transferido ($kcal/h$)

Q : el calor intercambiado ($kcal/h$)

Q_{ced} : Calor cedido por condensado, ($kcal/h$)

Q_{abs} : calor adsorbido por el lodo, ($kcal/h$)

Considerando despreciables las pérdidas de calor en el intercambiador: $Q_{ced} = Q_{abs}$

$$Q_{ced} = C_h (T_{e_{cond}} - T_{s_{cond}}) \quad (2.17)$$

$$Q_{abs} = C_c (T_{e_{lodo}} - T_{s_{lodo}}) \quad (2.18)$$

$$C_c = m_{lodo} C_{p_{lodo}} \quad (2.19)$$

$$C_h = m_{cond} C_{p_{cond}} \quad (2.20)$$

C_{min} : Es el resultado del valor menor entre la C_c y C_h .

Donde:

C_c : Capacidad térmica de la corriente fría ($kcal/h^{\circ}C$)

C_h : Capacidad térmica de la corriente caliente ($kcal/h^{\circ}C$)

m_{cond} : Flujo másico del condensado (kg/h).

m_{lodo} : Flujo másico de lodo (kg/h).

Cp_{cond} : Capacidad calórica del condensado a presión constante- 1atm ($kcal/kg^{\circ}C$)

Cp_{lodo} : Capacidad calórica de lodo a presión constante- 1atm ($kcal/kg^{\circ}C$)

Te_{cond} : Temperatura de entrada del condensado al intercambiador ($^{\circ}C$)

Ts_{cond} : Temperatura de salida del condensado al intercambiador ($^{\circ}C$)

Te_{lodo} : Temperatura de entrada del lodo al intercambiador ($^{\circ}C$)

Ts_{lodo} : Temperatura de salida del lodo al intercambiador ($^{\circ}C$):

✓ Cálculo de la relación de capacidad calorífica (C_r)

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{máx}} \quad (2.21)$$

C_{max} : Es el resultado del valor mayor entre la C_c y C_h .

✓ Cálculo del área de la sección transversal del Intercambiador de calor (A , m^2)

El área de la sección transversal del Intercambiador de calor se calcula a partir de la siguiente expresión (tabla 11.4; Incropera, 2011):

$$NTU = \frac{U_D A}{C_{min}} \quad (2.22)$$

Donde:

A : área de la sección transversal (m^2).

NTU : Número de unidades de transmisión

U_D : Coeficiente global de transferencia de calor ($kcal/hm^2^{\circ}C$) (tabla 11.2; Incropera y DeWitt, 2011) (Anexo # 4)

Criterio de Evaluación del Intercambiador de calor:

Al calcular el área de la sección transversal del intercambiador se compara con el área del intercambiador de calor existente para evaluar si este satisface los requerimientos del sistema.

2.6 Tiempo necesario para llegar a la temperatura de congelación

El tiempo de congelación de un producto depende de su naturaleza y del procedimiento empleado. El cálculo del tiempo empleado en congelar un producto es muy complejo.

La determinación del tiempo de refrigeración-congelación constituye un elemento de importancia práctica, ya que permite conocer el tiempo necesario para que un producto alcance una temperatura dada en su centro térmico partiendo de una temperatura inicial, una temperatura del medio de enfriamiento, configuración geométrica, tipo de envase, etc.

La predicción del tiempo de congelación puede basarse en métodos numéricos y en métodos aproximados. La primera solución aproximada propuesta corresponde a la ecuación de Plank, la cual toma en consideración una serie de suposiciones. A pesar de sus limitaciones esta ecuación ha sido muy utilizada y muchas de las ecuaciones desarrolladas con posterioridad se basan en la introducción de modificaciones a la misma.

Para congelar un alimento, el producto debe exponerse a un medio de baja temperatura durante el tiempo suficiente para eliminar los calores (latente y sensible) del producto. El proceso de congelación puede lograrse mediante sistemas de contacto directo o indirecto. Existe una gran variedad de circunstancias que hacen prácticamente imposible la utilización de un contacto directo entre el producto y el medio refrigerante.

En el caso de los jugos envasados en bidones su enfriamiento será en cámaras por corriente de aire, el envase supone la barrera para la congelación indirecta siendo la fuente de la refrigeración una corriente de aire frío. Los congeladores por corriente de aire pueden ser de un diseño simple, como es el caso de una habitación refrigerada (cámara). Esta supone una operación discontinua y la habitación refrigerada puede actuar como almacén y como compartimiento de congelación. En esta situación los tiempos de congelación serán altos debido a las bajas velocidades del aire alrededor del producto, la imposibilidad de alcanzar un buen contacto entre el producto y el aire frío y los menores gradientes de temperatura existentes entre el producto y el aire.

Es obvio que el tiempo de congelación aumentará cuando aumente la densidad, por otro lado, el tiempo de congelación disminuirá al aumentar el gradiente de temperatura, el coeficiente de transmisión de calor y la conductividad térmica del producto congelado. Las limitaciones de la ecuación de Plank se deben principalmente al desconocimiento de los valores de los diferentes componentes de la ecuación. Además, no es sencillo encontrar valores precisos de la conductividad térmica, λ , de muchos de los productos.

Ecuación para determinar el tiempo de congelación de Plank

$$t = (\Delta H \cdot m / \Delta T) \cdot (1/N) \cdot D \cdot (D/4 \cdot \lambda + 1/\alpha) \quad (2.23)$$

Donde:

ΔH : reducción de entalpía que sufrirá el producto. (kcal/kg)

m: masa volumétrica del producto congelado (kg/m³)

λ : coeficiente de conductividad térmica en congelación (W/m °C)

D: espesor, medido en paralelo al flujo de calor. (m)

N: coeficiente que caracteriza la forma, siendo N=2 para una placa, N=4 para un cilindro y N=6 para una esfera.

ΔT : incremento de temperatura entre el medio refrigerador y la temperatura de congelación. (°C).

α : coeficiente superficial de transmisión térmica entre el medio refrigerante y el producto, teniendo en cuenta el embalaje. (W/m²°C).

Análisis Dimensional:

$$((\text{kcal/kg}) \cdot (\text{kg/m}^3)) / (\text{°C}) \cdot \text{m} \cdot ((\text{m}) / (\text{kcal/hm}^{\circ}\text{C})) + (1 / (\text{kcal/hm}^{\circ}\text{C}))$$

$$(\text{kcal/m}^3\text{°C}) \cdot \text{m} \cdot ((\text{m}) / (\text{kcal/hm}^{\circ}\text{C})) + (1 / (\text{kcal/hm}^{\circ}\text{C}))$$

$$\text{kcal/m}^2\text{°C} \cdot ((\text{m}) / (\text{kcal/hm}^{\circ}\text{C}))$$

$$\text{kcal/m}^2 \cdot ((\text{mhm}^{\circ}\text{C}) / (\text{kcal}))$$

horas = t (tiempo necesario para llegar a la temperatura de congelación).

De esta ecuación fórmula teórica se pueden extraer las siguientes conclusiones:

-Para un producto determinado, de forma y tamaño determinados, envasados de igual manera, el tiempo de congelación depende solamente de las características del proceso.(temperatura de inicio del proceso, temperatura del medio refrigerante)

-Para un mismo proceso, el tiempo de congelación depende del espesor, forma y volumen del producto y de las características de este.

2.7 Factibilidad económica de la propuesta

Se recomienda utilizar como indicadores económicos para definir la factibilidad económica del sistema de flujo propuesto el Valor Actual Neto (VAN), la Taza interna de rentabilidad (TIR) y el Plazo de Recuperación de la Inversión (PRI) (Peters, 1991).

La inversión inicial se determina a partir del costo de adquisición de los equipos y materiales necesarios para la propuesta:

El costo de producción está referido a la disminución por concepto de la nueva modificación del proceso.

El costo de producción (CP) depende de los elementos de costos que reporta el Departamento de Economía de la UEB, el cual incluye los costos fijos (CF) y los costos variables (CV):

$$CP=CF + CV \quad (2.24)$$

El valor de la producción (VP) se calcula como el precio unitario de cada producto por el volumen de producción.

$$VP = \text{pup} * \text{Volumen de producción} \quad (2.25)$$

El pup (\$/t) es el precio unitario del producto

El volumen de producción está referido al incremento por concepto de la nueva modificación del proceso.

Una vez determinado el costo de producción total y el valor de la producción, se calcula el movimiento de fondos o flujo de caja, que es la diferencia entre los cobros y pagos que se producen como resultado de la inversión. Este movimiento de fondos se hace para cada año del horizonte.

$$\text{Movimiento de fondos} = \text{Cobros} - \text{Pagos} \quad (2.26)$$

El VAN, se determina como la suma del movimiento de fondo actualizado, para un interés dado (i) en el tiempo que enmarca el horizonte (n) y su valor debe ser positivo y en el orden de la inversión. Según este criterio, son aceptadas aquellas inversiones que tengan un VAN positivo, siendo más interesante cuanto mayor sea.

$$VAN = S_0 + \frac{S_1}{(1+i)^1} + \frac{S_2}{(1+i)^2} \dots + \frac{S_n}{(1+i)^n} \quad (2.27)$$

Donde:

VAN: Valor actual neto (\$)

S: Movimiento de fondos (\$)

i : Interés (%)

El TIR, se determina calculando el VAN para diferentes tasas de interés, donde si el $TIR > i$, conviene la realización del proyecto. Se define como aquella tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos netos de efectivo esperados de un proyecto con el desembolso inicial. Se acostumbra a definir la TIR, como aquella tasa de descuento que iguala a cero el VAN.

$$TIR = i_1 - \frac{VAN(P)(i_1 - i_2)}{VAN(P) - VAN(N)} \quad (2.28)$$

Donde:

TIR: Tasa interna de retorno (%)

VAN (P): Valor actual neto positivo (\$)

VAN (N): Valor actual neto negativo (\$)

i_2 : Interés para el cual el VAN se hace negativo (\$)

El PRI, es aquel en donde el movimiento de fondo se hace positivo, lo que quiere decir que ya se pagó la inversión realizada.

$$PRI = \frac{I}{G} \quad (2.29)$$

PRI: plazo de recuperación de la inversión (año)

I: Inversión.

G: Ganancia

Se decide además calcular el retorno de la inversión o rentabilidad porcentual, que se refiere a la relación que existe entre la ganancia y la inversión, este refleja el ritmo con que se recupera la inversión a través de la ganancia.

$$\% \text{ Retorno Inversión} = \frac{G(\text{con Modificación}) - G(\text{sin Modificación})}{I} * 100\% \quad (2.30)$$

2.8 Valoración ambiental de la propuesta

La evaluación del impacto ambiental que trae consigo la propuesta planteada se basa en el ahorro de energía se logra también la reducción de emisiones de CO₂.

$$\text{Reducción de emisiones de CO}_2 = \text{Ahorro de energía eléctrica} * \text{Factor de emisión} \quad (2.31)$$

(MPML)

* Factor de emisión 799 g CO₂/kWh * 10⁻⁶

Conclusiones parciales del capítulo 2

En este capítulo se realiza la caracterización de la empresa objeto de estudio, se describe el proceso productivo en cuestión, el jugo concentrado de piña y se plantean las diversas metodologías tanto para la correcta selección de la bomba y la evaluación del intercambiador de calor por el método de la efectividad y el número de unidades de transmisión ($\epsilon - NTU$). Se plantean además las ecuaciones a utilizar para la evaluación económica de las modificaciones propuestas.

Conclusiones

Una vez terminada la investigación, la cual ha estado dirigida fundamentalmente a la evaluación de una propuesta de un sistema de enfriamiento para el jugo concentrado de piña en la UEB Combinado Industrial "Héroes de Girón", a criterio de la autora se deben destacar las siguientes conclusiones:

1. Esta propuesta de un sistema de enfriamiento para el jugo concentrado de piña, permite solventar el problema científico y dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la investigación.
2. La evaluación energética en el proceso permitirá evaluar los ahorros en los materiales auxiliares (agua, combustible) para así poder demostrar que es factible la nueva modificación.
3. La modificación simboliza una disminución de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y de explotación del manto freático, siendo esto un impacto ambiental positivo.

Recomendaciones

Como resultado de la investigación desarrollada, la autora recomienda:

1. Aplicar la metodología planteada en el proyecto para comprobar si es factible la propuesta de enfriamiento.
2. Mostrar y evaluar la propuesta planteada en el proyecto a la UEB Combinado Industrial "Héroes de Girón", para su posible puesta en marcha.

Bibliografía

- 1) Alfèrez, F., M. Agusti y L. Zacarias, (2003): "Postharvest rind staining in Navel oranges is aggravated by changes in storage relative humidity: effect on respiration, ethylene production and water potential" *Postharvest Biology and Technology*, 28: 143-152.
- 2) Álvarez, G., Orrego, C., (1999) Determinación de coeficientes convectivos y propiedades térmicas en el enfriamiento por inmersión de lulo y tomate de árbol, N° 9. NOOS, Universidad Nacional de Colombia Manizales.
- 3) Amaro, J.; Hernández, O.; Olivencia, J. (2015). *Cálculo del campo de velocidad de un flujo laminar de agua al interior de una tubería, enfriándose con el medio ambiente después del completo desarrollo hidrodinámico*. *Agroindustrial Science* 5(2): 127 – 132.
- 4) Anaya, A.; Cauich, G.; Funabazama, O.; Medrano, V. (2014). *Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías*. *Revista Educación Química* 25(2): 128-134.
- 5) Arka, A.; sunnilbhai, D.D. (2016). Optimization of Shell and tube heat exchanger. *International journal for scientific research & development Vol 3, pp 27-35*.
- 6) Ávila, N.; Becerra, C.; Mustafá, Y.; Sanz, J. (2007). Pérdidas de presión en el transporte hidráulico de café por tubería PVC de 88 mm. *Revista Scientia et Technica* 1(34): 177- 182.
- 7) A.P.V (1996) Fluid * handling components. Planning and production: Boldt & Machon Marketing, Middelfart. Aarhus, Denmark.
- 8) Benitez Roque, A. (2020). *Propuesta metodologica para la evaluacion de intercambiadores de calor de tubo y coraza aplicada a la enseñanza de la asignatura transferencia de calor*. Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.
- 9) CanadaGAP (2020). Is a program developed in Canada to promote Good Agricultural Practices (GAPs) for fruit and vegetable suppliers. Ottawa ON Canada K2H 9E8. <https://www.canadagap.ca/>.
- 10) Cleland, A. C.; EARLE R. L., A comparison of analytical and numerical methods of predicting the freezing times of foods, *J. of Food science* 42, 1390-1397 (1977).

- 11) Cleland, D.; Valentas, K. Prediction of freezing time and design of food freezers, en: Handbook of food engineering practice , Valentas, Rotstein, Singh, Editores. CRC Press, Boca Raton, 1997. Pp: 72 - 124.
- 12) Cleland, A.C. and R.L. Earle. (1979)a. A comparison of methods for predicting the freezing times of cylindrical and spherical foodstuffs. Journal of Food Science 44(4):958-963, 970.
- 13) Cleland, A.C. and R.L. Earle. (1979)b. Prediction of freezing times for foods in rectangular packages. Journal of Food Science 44(4):964-970.
- 14) Colectivo de autores. (1987) Técnicas de Conservación de los alimentos. Tomo I. Ciudad de La Habana, Edición Revolucionaria.
- 15) Colectivo de autores. (1987) Técnicas de Conservación de los alimentos. Tomo II. Ciudad de La Habana, Edición Revolucionaria.
- 16) Comité Ejecutivo del consejo de Ministro. Reglamento para la implantación y consolidación del sistema de dirección y Gestión Empresarial. Artículo 468 pág. 174, 2007.
- 17) Dawson, C. (2015). PIÑA: Perfil de INFOCOMM. CNUCED/UNCTAD, Gienbra. Suiza. p. 3-11 Consultado 10 jun 2018. Disponible en: https://unctad.org/es/PublicationsLibrary/INFOCOMM_cp09_Pineapple_es.pdf
- 18) Del Puerto Quintana C .Métodos de conservación de alimentos. Tratado de Higiene del Medio. La Habana, Pueblo y Educación. (Disponible desde: <http://www.inha.sld.cu/vicedirecciones/conservaciondealimentos.htm>)
- 19) Departamento de tecnología. (2015). Descripción del proceso productivo de la empresa de cítricos Héroes de Girón. Empresa de Cítricos Héroes de Girón. Documento de trabajo.
- 20) E. Torres y J.A. Soto. M.T. Martínez. (2004) Intercambiadores de calor. México.
- 21) Fernández, T.; Toledo, M.; Vásquez, J.(2006). Caída de presión debida a un flujo en torbellino. Revista Científica 10(4): 159- 165.
- 22) Heldman, D.R y Hartel, R.W.(1997) .Capitulo 6 Freezing and frozen-food storage. En principles and food Processing. Chapman & Hall. New York. Pp.113-125.
- 23) Hernandez, A.: Study of three Non-Destructive Techniques Potential for Mandarin and Tomato Fruit Quality Assessment, pp. 6-49, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), College of Biosystems

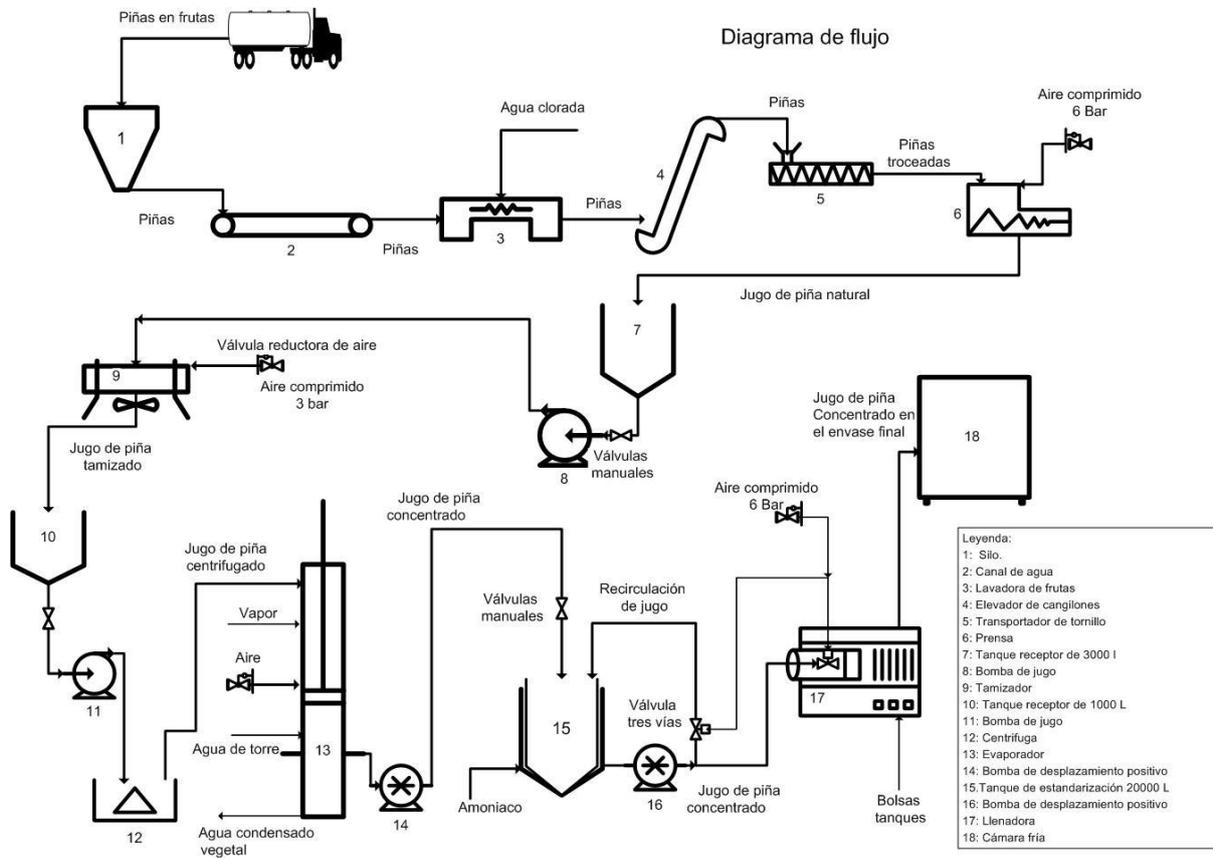
- Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou, P.R. China., 2005.
- 24) Imbert, J.; Guillen, R. (2011). Evaluación de un recuperador de calor en una industria frigorífica. Universidad de Oriente. Centro de Estudios de Refrigeración. Cuba.
 - 25) Incropera, F. P. y DeWitt, D. P. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Editorial Prentice Hall, 7th Ed. USA
 - 26) Izquierdo Millán, Marcelo (2001). Ingeniería térmica y de fluidos. Intercambiadores de calor. Editorial Leganés.
 - 27) James R. Welty. (2008) Transferencias de Calor Aplicada a la Ingeniería. Primera edición. (Disponible desde: <http://www.monografias.com/trabajos27/transferencia-calor/transferencia-calor.shtml>)
 - 28) Marín, Toro. Felipe. (2008) Equipos de transferencia de calor. (Disponible desde: http://www.thermoequipos.com.ve/pdf/articulo_03.pdf)
 - 29) McCabe, W. L.; Smith, J. C. y Harriott, P. (1998). Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Editorial McGraw Hill. Madrid, España.
 - 30) NC 455 (2015). Grados de madurez, para las variedades Española roja, Cayena lisa y sus híbridos (MD2) y la Criolla: (Norma Cubana 455: 2015)
 - 31) Orrego, C. E., Salgado Mayra, N., y Diaz, S. (2020). Productividad y Competitividad Frutícola Andina. Producto 9. Estudio de mercado interno y externo de la fruta fresca y sus derivados. FONTAGRO. <http://www.fontagro.org>.
 - 32) Ortiz, L.; Cabanillas, D.; Fierro, R. (2010). Equilibrio hidráulico en sistemas de bombeo minero: Estudio de caso. Revista Ingeniare 18(3): 335-342.
 - 33) Pérez, D. (2002). Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías. Segunda parte: Desde los trabajos de Darcy hasta los de Stanton. Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental 23(3): 3-8.
 - 34) Peters, M; *et al.* (1991). Plant Design and Economics for Chemical Engineers. Fourth Edition. International Edition. Mc Graw Hill Book. Chemical Engineers Serie.
 - 35) Rojas, Iris. (2008). Alternativas para el procesamiento de la piña descartable. Revista Digital INIA HOY N° 2, mayo-agosto 2008. URL.

http://www.inia.gob.ve/index.php?option=com_content&task=view&id=459&Itemid=151. (Consultado el 9/9/2021)

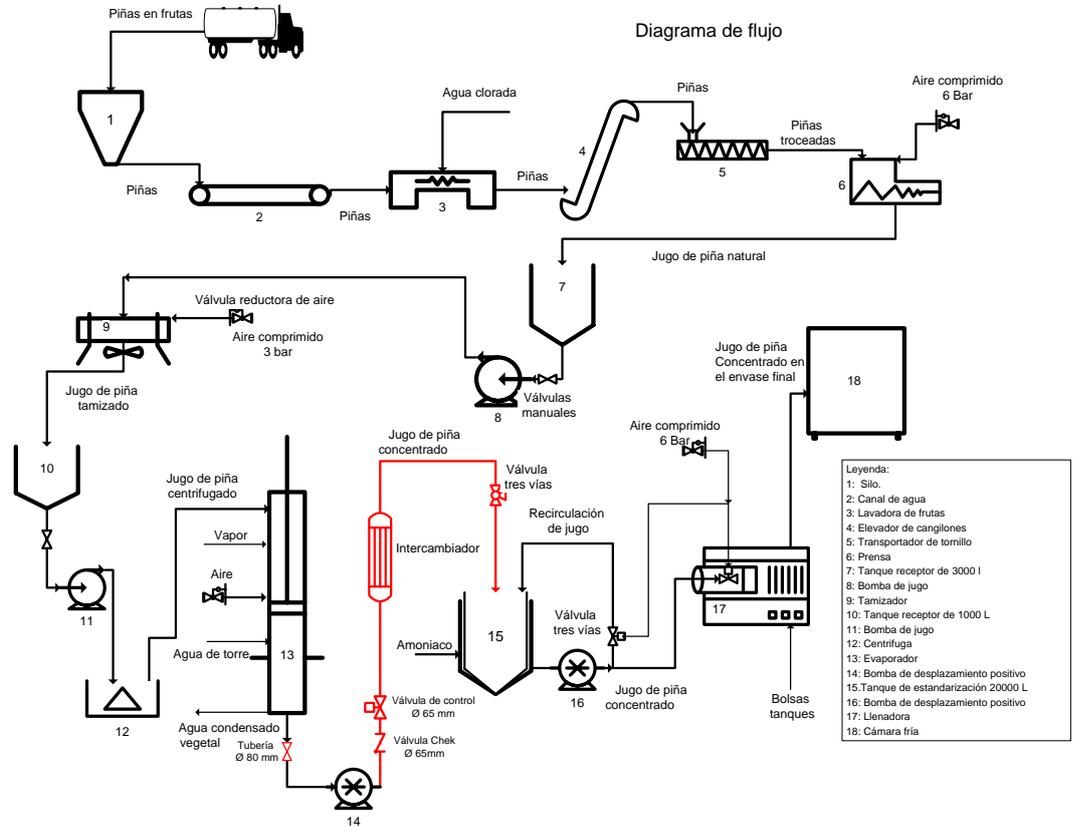
- 36) Rosabal, J.M. (2006). Hidrodinámica y separaciones mecánicas. Ciudad de la Habana. Editorial Félix Varela. 2da edición.
- 37) Stoecker, W.F. (1987). Refrigeración y acondicionamiento de aire. La Habana, Cuba. Edición Revolucionaria.
- 38) Streeter, V.; Benjamin, E.; Bedford, K. (1999). Mecánica de Fluidos. Editorial McGraw-Hill. Santa fe de Bogotá, Colombia
- 39) Tetra Pak (2000) Intercambiador de calor tubular, Doc No. TeM-1230500-05, descripción y datos técnicos. Suecia
- 40) Torres, E.; Soto, J.A.; Martínez, M.T. (2004). Manual de intercambiadores de calor. México.
- 41) Towler, G. y Sinnott, R. (2008). *Chemical Engineering Desing. Principles, Practice and Economics of Plant and Process Desing*. Editorial Butterworth-Heinemann. USA
- 42) Vega, L.; Rodríguez, G. (2007). Perdidas de presión en tuberías de vapor. Revista: Ciencias Holguín 13(3): 1-10.
- 43) Vega González, L. R. (2008). Métodos de Análisis Comparativo Dimensional y de diseño para bombas centrifugas vertical tipo pozo profundo. Ingeniería Revista Académica, Universidad Autónoma de Yucatán México.

Anexos

Anexo # 1: Diagrama de Flujo del proceso



Anexo # 2: Diagrama de flujo de la propuesta de enfriamiento para la elaboración del jugo concentrado de piña.



Anexo # 3: Relaciones de NTU.

TABLE 11.4 Heat Exchanger NTU Relations

| Flow Arrangement | Relation |
|--|--|
| Concentric tube | |
| Parallel flow | $NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r} \quad (11.28b)$ |
| Counterflow | $NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right) \quad (C_r < 1)$ |
| | $NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1) \quad (11.29b)$ |
| Shell-and-tube | |
| One shell pass (2, 4, . . . tube passes) | $(NTU)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1}\right) \quad (11.30b)$ |
| | $E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}} \quad (11.30c)$ |
| n Shell passes ($2n, 4n, . . .$ tube passes) | Use Equations 11.30b and 11.30c with $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n} \quad NTU = n(NTU)_1 \quad (11.31b, c, d)$ |
| Cross-flow (single pass) | |
| C_{\max} (mixed), C_{\min} (unmixed) | $NTU = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right] \quad (11.33b)$ |
| C_{\min} (mixed), C_{\max} (unmixed) | $NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1] \quad (11.34b)$ |
| All exchangers ($C_r = 0$) | $NTU = -\ln(1 - \varepsilon) \quad (11.35b)$ |

Anexo # 4: Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor.

TABLA 11.2 Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor

| Combinación de fluidos | U (W/m ² · K) |
|--|----------------------------|
| Agua con agua | 850-1700 |
| Agua con aceite | 110-350 |
| Condensador de vapor (agua en tubos) | 1000-6000 |
| Condensador de amoníaco (agua en tubos) | 800-1400 |
| Condensador de alcohol (agua en tubos) | 250-700 |
| Intercambiador de calor de tubos con aletas (agua en tubos, aire en flujo cruzado) | 25-50 |