

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



Determinación del tiempo óptimo de limpieza de un pasteurizador de jugos y concentrados del Combinado de cítricos “Héroes de Girón”.

Trabajo de Diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico

Autor: Addiel Crossier Guach

Tutores: Ing. Luis Alberto Olivera Díaz

Dr.C. Yoney López Hervis

Matanzas

2016

*El pueblo más feliz es aquel que tiene educado a sus hijos en la
instrucción de su pensamiento y en la dirección de sus sentimientos.*

“José Martí”

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Calificación

Ciudad, fecha

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Addiel Crossier Guach, declaro ser el único autor de esta investigación realizada en la Sede Universitaria de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada Institución como material de consulta. Para que así conste, firma:

Nombre y Apellidos

Firma

Dedicatoria

Deseo dedicar este trabajo a:

Mi querida y hermosa madre que es todo para mí en la vida.

Mi abuela Celita, que llevaba años soñando con este resultado.

Al resto de mi familia.

A todos mis amigos y esas personas que siempre quieren lo mejor para mí a diario.

Agradecimientos

- ❖ Gracias a Dios.
- ❖ Agradecer a mi mamá Zaida por haberme guiado hasta aquí, y hacerme crecer como un hombre de bien en la vida, por darme la fuerza y la fe de luchar y no perder nunca las esperanzas.
- ❖ A mi abuela Celita por siempre estar pendiente a mis resultados.
- ❖ Agradecer al esposo de mi mamá Osmin que siempre me apoyo desde que lo conocí.
- ❖ Agradecer al resto de mi familia por su apoyo y preocupación.
- ❖ Gracias a mis tutores Yoney y Luis Olivera, que cuando más perdido me veía, apostaron por mí y me extendieron la mano hasta que me sacaron afuera.
- ❖ Gracias a mis compañeros de aula que siempre me apoyaron y estuvieron a mi lado, en todo momento.
- ❖ Gracias a mis amigos y todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad.

Síntesis

El objetivo de este trabajo es determinar el ciclo óptimo de limpieza del pasteurizador de jugos y concentrados de frutas naturales del Combinado de cítricos “Héroes de Girón”. Este se logra a partir de la evaluación de la eficiencia del equipo y el análisis dimensional para describir la transferencia de calor con respecto al concentrado de mango. Se caracteriza estadísticamente la operación actual del intercambiador con respecto a las temperaturas de entrada y salida del concentrado. La eficiencia del intercambiador oscila alrededor de 58,45%, donde a partir de cálculos se puede proponer un aislante (Magnesia 85% de 185 kg/m³) con un espesor de 0,14 m. El modelo matemático obtenido reproduce el coeficiente pelicular de transferencia de calor del concentrado de mango con errores menores que 5% en el 100% de los datos analizados. El tiempo óptimo de limpieza del intercambiador debe ser entre dos y cuatro días de trabajo.

Abstract

The aim of this study is to determine the optimal cleaning cycle for a juices and natural fruit concentrates pasteurizer at the "Heroes de Girón" Citric Company. This is accomplished from the evaluation of the efficiency of the application equipment and dimensional analysis to establish relationships describing the dimensionless heat transfer relative to mango juice concentrate. Furthermore, the efficiency of the current operation for the pasteurizer was evaluated, and the outlet temperature of the concentrate juice was statistically characterized. The evaluation of the efficiency of the heat exchanger resulted in 58, 45%. From this result it can be propose insulation (Magnesia 85% with density of 185 kg/m^3) with a thickness of 0, 14 m. The obtained model reproduces the heat transfer film coefficient for mango juice concentrate with relative percent difference less than 5% in 100% of the analyzed data. To determine the optimal cleaning time for the heat exchanger this mathematical model was use. The resulting optimal cleaning time should be between two and four working days.

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1: Análisis Bibliográfico	5
1.1 La pasteurización de jugos y concentrados de frutas naturales.....	5
1.1.1 Las pulpas de frutas. Especificaciones para el mango y la guayaba	5
1.1.2 Objetivos de la pasteurización	7
1.1.3 Tipos de pasteurizadores y sus aplicaciones.....	8
1.2 Intercambiadores de calor.....	8
1.2.1 Clasificación de los intercambiadores de calor	9
1.2.2 Métodos de análisis de la transferencia de calor en los intercambiadores	11
1.2.3 Métodos de evaluación de intercambiadores de calor.....	12
1.2.4 Caída de presión en los intercambiadores de calor	14
1.4 Análisis dimensional.....	14
1.5 Métodos para determinar el tiempo óptimo de limpieza.....	16
1.5.1 Mantenimiento	17
1.5.2 Optimización gráfica	18
Conclusiones parciales del capítulo 1	19
Capítulo 2: Materiales y métodos	20
2.1. Ubicación de la UEB “Héroes de Girón”.....	20
2.2 Descripción del proceso tecnológico producción de jugo concentrado de mango	21
2.2.1. Descripción detallada del caso de estudio.....	23
2.3. Metodología empleada para el tratamiento estadístico.....	24
2.4. Metodología empleada para la evaluación del intercambiador de calor de tubos concéntricos	25
2.4.1 Evaluación de los intercambiadores de calor según el método de ϵ -NTU	25
2.5. Metodología para la obtención del coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección forzada del jugo concentrado de mango	28
2.6. Metodología empleada para establecer los ciclos óptimos de limpieza en el pasteurizador	29
Capítulo 3. Análisis de los Resultados	31

3.1 Resultados y análisis de la evaluación estadística de las temperaturas de entrada y salida al pasteurizador	31
3.2 Resultados de la evaluación del intercambiador	33
3.3 Resultados y análisis de la modelación matemática de la ecuación del coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección forzada del jugo concentrado	35
3.4 Resultados de la determinación del número de Nusselt por el modelo matemático obtenido.....	35
3.5 Validación del modelo matemático obtenido.....	36
3.5.1 Calibración del modelo con los parámetros experimentales.....	36
3.5.2 Análisis de sensibilidad del modelo matemático	37
3.6 Resultados y análisis del cálculo del factor de ensuciamiento.....	40
3.7 Determinación del tiempo óptimo de limpieza.....	41
Conclusiones parciales del capítulo 3	43
Conclusiones.....	44
Recomendaciones.....	45
Bibliografía:	46
Anexos	52

Introducción

Los alimentos por lo general 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) y enzimas. Esto tiene implicaciones económicas evidentes, tanto para los fabricantes como para distribuidores y consumidores. Se calcula que más del 20% de todos los alimentos producidos en el mundo se pierden por acción de los microorganismos. El deterioro de estos se define como toda modificación del mismo que, según la conformidad con los hábitos, costumbres y diferencias individuales, hace que no resulte apropiado para el consumo humano. Este es un concepto relativo y está ligado a hábitos y costumbres de los pueblos (Encina y Bernal, 2013).

Muchos alimentos deteriorados no dañan a la salud, pero sus características organolépticas pueden estar alteradas y no ser apetecibles para los consumidores. Por otra parte, algunos pueden resultar muy perjudiciales para la salud del consumidor. Existen por ello razones para evitar la alteración de los alimentos (Hernández, 2014).

Según Silva y Gibbs (2012), la tecnología de la conservación de alimentos ha avanzado en el desarrollo de una serie de innovaciones y tendencias, buscando métodos de conservación eficiente, obtención de alimentos seguros, nutritivos y con calidad sensorial. Todas estas tecnologías presentan ventajas y limitaciones en su aplicación industrial además de requerir un marco legal que regule su uso. Por ello, el uso del método de conservación por tratamientos térmicos, sigue siendo el proceso usado por la mayoría de las industrias procesadoras, tanto por su eficiencia como por su sencillez.

Alvarado (2013) plantea que los zumos de frutas existen factores causales físicos, químicos y biológicos que intervienen en su descomposición o deterioro. Entre los más destacados se encuentra el deterioro por enzimas, que origina cambios en el sabor, color y textura del mismo. Los tratamientos térmicos aplicados para la inactivación de enzimas producen, en mayor o menor extensión, la inactivación de

microorganismos que, además, se encuentran en un medio ácido que limita su crecimiento.

Hernández (2014) plantea también que la aplicación sistemática de estos tratamientos en alimentos supuso, en su momento, un enorme avance en la lucha contra muchas enfermedades de transmisión alimentaria. No obstante, los tratamientos térmicos no son buenos aliados de las propiedades sensoriales y nutritivas de los alimentos. Si aumentamos la intensidad del tratamiento térmico sea utilizando mayores temperaturas o tiempos de aplicación más largos, se puede esperar una mayor destrucción de los enzimas y microorganismos presentes, pero también una mayor alteración del aroma, del sabor y de algunos nutrientes del alimento. Por ello, cuando se establecen los tratamientos térmicos para un determinado producto se busca siempre un compromiso entre la inactivación enzimática, microbiológica y la calidad organoléptica nutritiva del mismo.

Por otro lado, una de las cualidades beneficiosas de las frutas cada vez más valorada por los consumidores es su actividad o propiedades antioxidantes. Generalmente, un antioxidante se puede definir como aquella sustancia natural o artificial con capacidad para neutralizar y proteger a un sistema biológico frente a radicales libres, tales como los radicales de oxígeno, los de nitrógeno y los radicales lipídicos (Cañizares, 2010).

En este sentido, en la medida en que los tratamientos térmicos afecten a los compuestos responsables de su actividad antioxidante, el beneficio del alimento para la salud del consumidor va a verse también comprometido. En el caso de las frutas, la vitamina C y los fenoles parecen ser los compuestos que más contribuyen a su actividad antioxidante.

La UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón” es una industria que procesa naranjas y toronjas para obtener jugos naturales, concentrados y otros subproductos de estas frutas, pulpas concentradas (principalmente mango y guayaba), las que se incrementan con variedades de ciclo corto y de gran demanda en el mercado nacional e internacional.

En esta entidad todos los procesos de producción se sustentan en la garantía de la materia prima, el equipamiento tecnológico y los recursos humanos, además juegan un papel importante los servicios que se necesitan como vapor, aire comprimido, electricidad, agua tratada o suave, agua de enfriamiento, entre otros.

En esta industria el buen funcionamiento del sistema de pasteurización está determinado fundamentalmente por la correcta operación del sistema de bombeo y los intercambiadores de calor, los cuales no solo dependen de una buena capacitación de los operadores, sino también de los flujos que se manejan, el tiempo programado de mantenimiento y el seguimiento sistemático al deterioro de estos.

El sistema de pasteurización cuenta con una tecnología de control automático, de manera que si el producto a la salida del pasteurizador no cumple con la temperatura establecida, este se recircula hasta alcanzar la misma.

En productos muy viscosos se instalan agitadores estáticos que crean una alta turbulencia e impiden que se adhiera a la pared de los intercambiadores, lo que evita que se quemé y conserva sus cualidades de sabor intactas.

En esta empresa la línea de pasteurización de jugos y concentrados se ha instalado recientemente, por lo que no se reportan trabajos relacionados con la evaluación de esta; sin embargo, por inspecciones y controles realizados por parte del personal calificado y el Ministerio de la Industria Nacional Alimentaria (MINAL), se han detectado problemas tales como incumplimiento con la calidad del producto terminado y atraso del proceso de producción de jugos y concentrados de mango y guayaba (Olivera, 2015).

La propuesta de este trabajo surge a partir de la disminución del volumen de producción de jugos y concentrados de frutas tropicales, debido al aumento de la recirculación para alcanzar la temperatura establecida a la salida del pasteurizador. Esto implica un mayor tiempo de residencia del producto en la línea con el riesgo de disminución de la calidad, reducción de la producción, aumento del consumo de los recursos materiales y energéticos y, por ende, aumento de los costos de producción de la entidad.

Tecnólogos de la planta y técnicos de experiencia laboral, proponen el desarrollo del trabajo en el equipo con respecto al concentrado de mango, por ser el más viscoso y a la vez el de mayor problema en la operación.

Según lo planteado anteriormente se define como **problema de la investigación**:

¿Cómo se podría eliminar la recirculación en el pasteurizador sin afectar la temperatura de salida establecida en el proceso?

Para dar solución a este, se presenta como **hipótesis**:

Si se determina el ciclo óptimo de limpieza del pasteurizador mediante análisis dimensional, es posible eliminar la recirculación de productos.

Objetivo general:

Determinar el ciclo óptimo de limpieza del pasteurizador de jugos y concentrados de frutas naturales del Combinado de cítricos “Héroes de Girón”.

Objetivos específicos:

1. Realizar un análisis bibliográfico sobre la pasterización de jugos y concentrados de frutas naturales.
2. Caracterizar estadísticamente la operación actual del pasteurizador
3. Evaluar la eficiencia del pasteurizador.
4. Obtener un modelo matemático que describa la transferencia de calor por convección de jugo en un intercambiador de doubles tubos concéntricos.
5. Determinar el ciclo de limpieza del pasteurizador utilizando el modelo obtenido.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico

En este capítulo se desarrolla un análisis que fundamenta lo previsto en la presente investigación, sobre la pasteurización de jugos y concentrados de frutas naturales, Intercambiadores de calor y sus clasificaciones, métodos de evaluación de los mismos, métodos para determinar el tiempo óptimo de limpieza,

1.1 La pasteurización de jugos y concentrados de frutas naturales

La aplicación industrial de conservación de alimentos por calor comenzó tras la investigación de Nicolas Appert, quien demostró la posibilidad de conservar durante un largo período de tiempo diferentes tipos de alimentos tras calentarlos en recipientes herméticamente cerrados. Posteriormente, tras conocer que el deterioro de los alimentos era de origen microbiano, empezaron los estudios cinéticos como base para el diseño de los tratamientos térmicos. El calor se utiliza para frenar la actividad enzimática y bacteriana, de modo que reduce el deterioro del alimento y previene su pérdida de calidad. En la pasteurización, el alimento se somete a temperaturas entre 70 y 100°C durante el tiempo necesario para destruir microorganismos y enzimas específicos (Hernández, 2014).

Según Silva y Gibbs (2012), la pasteurización es un tratamiento efectivo en la inactivación de microorganismos como la salmonella. De igual forma, Rawson *et al.* (2011) observan cómo la pasteurización conduce a una disminución del contenido en bioactivos carotenoides, compuestos polifenólicos y actividad antioxidante de algunas frutas y verduras tales como: mangos, extracto de fruta de mora, zumo de piña y zumo de manzana y anacardo.

Por lo planteado anteriormente, se infiere que este proceso no es más que someter al producto, ya sea lácteos y derivados, cremas, zumos, concentrados, sopas, huevo y derivados o cualquier otro alimento fluido, a un tratamiento térmico controlado seguido de un enfriamiento, de manera que se consigue una esterilización óptima del producto sin perder sus cualidades organolépticas, ni su riqueza vitamínica, nutritiva y proteica.

1.1.1 Las pulpas de frutas. Especificaciones para el mango y la guayaba

Las pulpas de frutas han alcanzado una gran importancia económica en la industria alimentaria actual, y muestra un gran futuro comercial, pues son la base a partir de la cual se elabora una amplia gama de productos finales como son:

- zumos de frutas con pulpa y los néctares de frutas
- mermeladas
- alimentos infantiles

El uso de las pulpas o purés como base para la elaboración de los productos mencionados anteriormente presenta una serie de ventajas bien definidas (Valeriani, 2003) frente al método tradicional de utilizar la fruta como materia prima, ya que permite:

- ampliar el tiempo de conservación, ya que puede ser tratado a fin de reducir las posibles causas de alteración
- reducir costos de almacenamiento, por reducción de volumen
- reducir costos de transporte

El mango común, *Mangifera indica L.*, es reconocido como un fruto con excelentes propiedades organolépticas, gracias a su contenido de azúcares, ácidos, aromas y pigmentos que lo hacen atractivo para todo tipo de consumidor. Puede consumirse, comercializarse y transportarse en estado verde o maduro, según las necesidades del mercado y del consumidor final (Quintero y Vasco, 2013).

Este fruto carnoso, sabroso y refrescante, es también conocido como "melocotón de los trópicos". Está reconocido en la actualidad como uno de los frutos tropicales más finos (Carvajal, 2014).

El mango es consumido en gran parte en estado fresco, pero también puede ser utilizado para preparar mermeladas y confituras. Actualmente se emplea bastante en la industria farmacéutica (Carvajal, 2014).

La guayaba, *Psidium guajava L.*, es una fruta tropical perteneciente a la familia *Myrtaceae* consumida tanto fresca como procesada en forma de pulpas, jugos, mermeladas y conservas, de gran aceptación en el mundo. El procesamiento

tecnológico de esta ofrece opciones de conservación de la fruta fresca para extender su vida útil (Marquina, 2008).

Según Hernández (2014), el consumo local es mayormente como fruta fresca, además es industrializada para la elaboración de mermelada, pasta y cascós. Bustos (2013), plantea que es la única fruta hasta hoy descubierta que contiene 16 vitaminas. Para Carvajal y Cedeño (2013), es esencial para que los tejidos utilicen en forma adecuada el oxígeno como combustible.

En la sección caso de estudio se procesan ambas frutas, pero para la evaluación del pasteurizador se toma como referencia el concentrado de mango, ya que además de ser el producto con el que se presenta la mayor recirculación, es el de más interés para la empresa debido a su alta demanda tanto en el mercado nacional como internacional.

1.1.2 Objetivos de la pasteurización

Alvarado (2013) plantea que la actividad microbiana y enzimática de los zumos y purés de frutas son los principales responsables de su deterioro. Por lo tanto, la aplicación de tratamientos térmicos tendrá como objetivo reducir y controlar ambas actividades. No obstante, tratamientos térmicos muy intensos pueden dar lugar al desarrollo de aromas y sabores extraños, así como al deterioro del color y valor nutritivo y funcional del producto. En este sentido, últimamente aparecen en el mercado zumos de frutas pasteurizados por tratamientos a altas temperaturas a corto tiempo que, aunque requieren del almacenamiento del producto en refrigeración para garantizar su estabilidad y seguridad durante aproximadamente dos meses, mantienen mejores características sensoriales.

La pasteurización se usa en un sentido amplio en tecnología de alimentos para designar cualquier tratamiento térmico cuyo objetivo sea la destrucción de la mayor parte de las formas vegetativas de los microorganismos capaces de alterar los alimentos o de interferir con el desarrollo de fermentaciones indeseables. Según Silva y Gibbs (2012), normalmente se aplican temperaturas que oscilan entre 55 y 90°C, y se varían los tiempos de exposición para conseguir el objetivo deseado (destrucción de microorganismos y enzimas que afecten a la seguridad y calidad del

alimento en el tiempo de vida útil), de manera que se modifique lo menos posible la composición, el sabor y el valor nutritivo del líquido.

1.1.3 Tipos de pasteurizadores y sus aplicaciones

1. Pasteurizadores de placas: generalmente se utilizan para la pasteurización de zumos con bajo contenido en fibras, tales como zumos de manzana, mostos, naranja, néctares de frutas, todo tipo de refrescos, leche, productos lácteos, y cerveza.

2. Pasteurizadores tubulares:

- Monotubulares: esterilizan productos de bajo pH (menor que 5), con alto grado de partículas, fibras y trozos de gran tamaño, ejemplo: pulpas de frutas, cubitos de frutas y de verduras.

- Piro-tubulares: se procesan líquidos, zumos de frutas con alto contenido en fibras y pulpas (naranja con celdillas, zumo de melocotón, zumos tropicales, piña con celdilla), gazpachos, sopas (calabacín, verduras, carne).

- Anulares: cualquier producto aplicable a un monotubular donde las cantidades de trabajo sean de gran demanda, cremas de alta viscosidad, cubitos de tomate, concentrado de frutas y verduras (Gemina, 2015)

1.2 Intercambiadores de calor

Según establece la literatura clásica, un intercambiador de calor es un sistema mecánico construido para transferir calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas, que están separados por una pared que puede ser metálica. Muchos autores coinciden en afirmar que esta transferencia de calor ocurre fundamentalmente a causa de los mecanismos de conducción y convección Jaramillo (2008) (Incropera y DeWitt, 2011).

Los intercambiadores se clasifican de acuerdo a la disposición del flujo relativo entre los dos fluidos y por sus características constructivas. Los más simples son aquellos en los que los fluidos se mueven en la misma dirección (flujo paralelo) o en la contraria (flujo a contracorriente) (Pérez, 2011).

1.2.1 Clasificación de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar (Jones, 2003) según:

1. Arreglo del flujo

- Flujo paralelo: los dos fluidos entran por el mismo extremo y fluyen en el mismo sentido. La temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente.
- Contraflujo: los flujos entran por los extremos opuestos y fluyen en sentidos opuestos. 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.
- Flujo cruzado: se utilizan generalmente en el intercambio líquido-gas.

2. Algunos intercambiadores según el tipo de construcción

a) Tubo y coraza: están compuestos por tubos cilíndricos, montados dentro de una carcasa también cilíndrica, con el eje de los tubos paralelos al eje de la carcasa. Un fluido circula por dentro de los tubos, y el otro por el exterior (fluido del lado de la carcasa). Son el tipo de intercambiadores de calor más usado en la industria. Los componentes básicos de este intercambiador son: el haz de tubos (o banco de tubos), coraza, cabezal fijo, cabezal removible (o trasero), deflectores, y la placa tubular. Se usa una amplia variedad de configuraciones en los intercambiadores de calor de coraza y tubos, según el desempeño deseado de transferencia de calor, caída de presión y los métodos empleados para reducir los esfuerzos térmicos, prevenir fugas, fácil mantenimiento, soportar las presiones y temperaturas de operación, y la corrosión. Estos intercambiadores se construyen de acuerdo a las normas de la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores de Calor Tubulares (TEMA), con algunas modificaciones, en dependencia del país. Estos deben ser de dimensiones apropiadas, para no dificultar así su mantenimiento, el cual incrementa los costos de la planta (Jaramillo, 2008).

b) Doble tubo o tubos concéntricos: consta de dos tuberías concéntricas, una en el interior de la otra, de forma que circulen los dos fluidos por el espacio anular y por la tubería interior. Los flujos pueden ser en el mismo sentido (corrientes paralelas) o en sentido contrario (contracorriente). 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. (Torres *et al.* 2004).

En este caso de estudio el pasteurizador al que se hace referencia en el proceso, es un intercambiador de triple tubos concéntricos, siendo estos muy utilizados en las industrias alimentarias, ya que son de bajos costes de mantenimiento debido a la ausencia de juntas, altas presiones de trabajo, proceso de productos con partículas o fibras, alta seguridad en procesos asépticos.

c) Intercambiadores de calor a placas: la industria alimenticia presenta varios casos donde se requiere operar con saltos térmicos reducidos, a bajas temperaturas y con tiempos mínimos de contacto, por lo que se requiere equipos especiales de transferencia de calor. Estos equipos especiales capaces de cumplir con los requisitos antes mencionados son los llamados intercambiadores de calor de placas. Estos son equipos muy difundidos en la Industria de procesos y cubren una amplia gama de aplicaciones, por lo que utilizados con frecuencia como pasteurizadores. Presentan características muy especiales tanto en su diseño como en la operación que los hace motivo de un estudio particular. Comparado con otro tipo de intercambiadores, los de placas tienen una alta relación de transferencia de calor respecto al tamaño. El coeficiente de transferencia de calor es considerablemente mayor que el alcanzado por un intercambiador tradicional de carcasa y tubos. Los intercambiadores de calor de placas son ideales para aplicaciones en las que los fluidos tienen una viscosidad relativamente baja y no contienen partículas. Además son una elección ideal donde existe un pequeño salto térmico entre la temperatura de salida del producto y la temperatura de entrada del servicio. Estos intercambiadores consisten en delgadas planchas corrugadas, empaquetadas o bien

soldadas con cobre. Las placas son apretadas unas contra otras de modo que formen el paquete de placas dentro de un bastidor, en el que el flujo de producto se encuentra en canales alternos y el servicio entre los canales del producto (Gemina, 2015).

1.2.2 Métodos de análisis de la transferencia de calor en los intercambiadores

Según Hernández y Lesino (2010), el diseño térmico de intercambiadores de calor se dirige a calcular el área de la superficie adecuada de transferencia de calor para un servicio dado, y se considera que el análisis hidráulico determina la caída de presión de los fluidos que fluyen en el sistema y, por consiguiente, la potencia de bombeo o el trabajo necesario para mantener el flujo. Los problemas más comunes de cálculo en intercambiadores de calor son la evaluación y el diseño o dimensionado.

El problema de la evaluación se determina según el funcionamiento termohidráulico de un intercambiador del que se conocen todas las especificaciones. Esto quiere decir que la evaluación determina el flujo de calor transferido, las temperaturas de salida y la caída de presión de las corrientes para un intercambiador de calor existente con un flujo establecido, con las temperaturas de entrada y, por consiguiente, el área de transferencia de calor y las dimensiones del equipo disponibles.

El dimensionado, sin embargo, se ocupa de la determinación del tamaño del intercambiador de calor. Aquí, se determinan el área y demás especificaciones de un intercambiador de calor apropiado para lograr el intercambio entre las corrientes caliente y fría, según los requerimientos de temperatura, el flujo de calor y las caídas de presión (Díaz, 2014).

El cálculo de intercambiadores de calor se basa en la definición del coeficiente global de transferencia de calor (U), que representa la velocidad de la transferencia de calor entre los fluidos. Este depende de los coeficientes peliculares de transferencia de calor (h_{i0}) en las dos caras de la superficie que separa los fluidos, de las propiedades físicas de los fluidos y de cómo estas dependen de la temperatura, además de la geometría de la pared y de sus propiedades físicas (Shilling, 2000; Incropera y DeWitt, 2011). Tiene en cuenta las resistencias individuales y globales a la

transferencia, incluida la de la pared (R_w) (Branan, 2002). La resistencia de la pared depende de la conductividad térmica del material, y los coeficientes individuales de las propiedades físicas de los fluidos (Díaz, 2014).

No se puede dejar de mencionar que en un intercambiador de calor, además de la transferencia de calor entre los dos fluidos, existe transferencia de calor con el medio circundante, a la cual se le denomina pérdidas de calor. Aunque en general este flujo de calor hay que tenerlo en cuenta, la práctica habitual es minimizarlo por recubrimiento de la superficie exterior con aislamiento térmico. Para el cálculo del flujo de calor entre ambos fluidos, y el área de intercambio que los separa, no se suelen incluir estas pérdidas (Rizo, 2008).

1.2.3 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. Método del Factor de Corrección de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (F_T -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).

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; Tower y Sinnott, 2008).

3. Método ψ – P:

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, $T_1 - t_1$).

1.2.4 Caída de presión en los intercambiadores de calor

Los cálculos hidráulicos en los intercambiadores de calor son imprescindibles, para poder definir el consumo de energía necesario para garantizar el movimiento de los fluidos en el equipo. La caída de presión es función del tipo de fluido, de las características del agente calefactor, en caso de que exista cambio de fase (condensación de vapores) y de la geometría y dimensiones constructivas de los mismos (Perry, 2008 y Incropera, 2011).

Según Kern (1999) la caída de presión permitida en un intercambiador es la presión estática del fluido que debe disiparse para mover el fluido a través del intercambiador. Cuando se ha designado una caída de presión definida para un intercambiador como parte de un circuito de bombeo, deberá siempre utilizarse tan completamente como sea posible en el intercambiador, pues de otra forma deberá disiparse mediante un reductor de presión.

En general, la caída de presión es una restricción importante en el diseño de intercambiadores de calor compactos; si el fluido es gaseoso, los intercambiadores tienden a presentar una gran área frontal. Según London y Kays (1984), la caída de presión total entre la entrada y la salida dependen de la caída de presión por contracción, de la caída de presión en el núcleo, y de la presión recuperada por expansión.

1.4 Análisis dimensional

El análisis dimensional es una técnica matemática que permite correlacionar empíricamente una variable dependiente con otras variables independientes. A diferencia de las otras técnicas de modelación empírica (análisis de regresión, polinomios de interpolación, *spline*, redes neuronales) en que la correlación es solo matemática; en los modelos dimensionales las variables independientes están organizadas de manera que la ecuación tiene un significado físico. Esto no significa que la ecuación deducida por análisis dimensional pueda ser considerada como un modelo fenomenológico, sino que la relación entre todas las variables es

dimensionalmente consistente y por tanto puede utilizarse con diferentes sistemas de unidades (Bambill, 2004).

El análisis dimensional tiene dos usos fundamentales en la modelación matemática:

- proporcionarle al análisis de regresión modelos dimensionalmente consistentes.
- crear grupos adimensionales.

Esta técnica de modelación no brinda herramientas para el ajuste final de los coeficientes empíricos del modelo. Generalmente un análisis dimensional concluye con un análisis de regresión no lineal con el que se ajustan estos coeficientes empíricos.

Para aplicar cualesquiera de los métodos de modelación dimensional (Rayleigh o Buckingham) se debe seleccionar un sistema de unidades y ser consecuente con las dimensiones del sistema seleccionado.

Un análisis dimensional no se puede realizar si no se tiene un conocimiento suficiente acerca de la situación física para decidir qué variables son importantes en el problema y qué leyes físicas básicas deberán intervenir en una solución matemática si es que existe alguna. Estas leyes son importantes debido a que introducen constantes dimensionales que es preciso considerar conjuntamente con las variables (McCabe *et al.*, 1998).

En general, la aplicación del análisis dimensional consiste en la obtención de los grupos adimensionales independientes que pueden formarse con las variables que intervienen en el proceso. Se pueden usar los métodos de Rayleigh, Buckingham (Teorema de π) y Hunsaker (Cruz y Pons, 1985).

a) Método de Rayleigh:

El Método de Rayleigh se basa en las suposiciones siguientes expuestas por Cruz y Pons (1985):

- la relación entre las variables es dimensionalmente consistente.
- cada variable tiene una fórmula dimensional de acuerdo con el sistema de unidades usado.

Además se basa en la identificación de la variable dependiente y la independiente. A continuación se escoge el sistema internacional de unidades y se escribe el modelo base en función de sus dimensiones. Luego se agrupan estas dimensiones para crear un sistema de ecuaciones para cada una, los coeficientes obtenidos se sustituyen en el modelo base y se forman los grupos adimensionales correspondientes. El número de grupos adimensionales puede determinarse sumando uno a la diferencia entre el número de incógnitas y el de ecuaciones independientes (Perry, 2008).

b) Método de Buckingham (Teorema de π):

Según Cruz y Pons (1985) este método se basa en el teorema de Buckingham, el cual expresa que toda ecuación dimensionalmente consistente donde las variables y contantes dimensionales estén igualadas a cero, pueden ser llevadas a grupos adimensionales, los cuales dependen del número mínimo de variables en términos de cuyas dimensiones se pueden expresar las dimensiones de las restantes variables (es igual o menor que el número de unidades fundamentales en el sistema usado).

El número de grupos adimensionales independientes se determina mediante la diferencia entre el número mínimo de variables y el número total de variables y contantes dimensionales.

1.5 Métodos para determinar el tiempo óptimo de limpieza

El funcionamiento normal de los equipos y las máquinas provoca su desgaste y afecta el rendimiento, lo que trae consigo la generación de productos fuera de especificaciones, fugas y derrames. Todo esto genera una contaminación considerable, por lo que aplicar el mantenimiento adecuado a cada equipo y en el momento preciso garantiza su máximo rendimiento.

1.5.1 Mantenimiento

Según autores como Oliva (1988) y Rodríguez (2005), el mantenimiento se puede definir como el conjunto de actividades cuyo objetivo es conservar todo bien capital en condiciones de eficiencia funcional que le permitan el más alto grado de fiabilidad.

El inadecuado mantenimiento de los equipos industriales puede ocasionar fallos operativos que provoquen paradas de la planta con sus respectivos inconvenientes económicos y ambientales.

Existen dos tipos de mantenimiento que se aplican en la actualidad en Cuba:

- Mantenimiento preventivo planificado (M.P.P)
- Mantenimiento por diagnóstico (M.D)

a. Mantenimiento preventivo planificado:

Se define como aquellas acciones de mantenimiento que se realizan a intervalos predeterminados, con la intención de reducir la posibilidad de que disminuya el nivel de aceptabilidad del equipo por debajo de lo establecido. Establece distintas categorías de mantenimiento en función de su contenido y duración. Entre ellas se encuentran: el mantenimiento profiláctico, ligero, parcial, parcial ampliado y general.

b. Mantenimiento por diagnóstico:

El avance de la tecnología y su vasto campo de aplicación han contribuido a que la tendencia actual sea hacia la aplicación de este tipo de mantenimiento. Entre los objetivos del diagnóstico aplicado al mantenimiento figura la determinación de los volúmenes de trabajo verdaderamente necesarios que garanticen la máxima disponibilidad del equipo con una óptima eficiencia y confiabilidad, y el establecimiento del momento más adecuado para su ejecución.

1.5.2 Optimización gráfica

La optimización puede definirse como el proceso de encontrar el valor máximo o mínimo de una función en condiciones de operación (Rao, 1996). Una de sus aplicaciones consiste en poder establecer el tiempo de mantenimiento y el reemplazo de cualquier equipo para así reducir los costos.

Según Sánchez (1990) y Rodríguez (1990) existen diversos métodos para determinar el tiempo óptimo de limpieza, entre los que se destacan por su aplicación en la práctica los métodos basados en pronóstico técnico y los basados en criterios económicos.

El pronóstico del estado técnico se encarga de determinar el tiempo óptimo en que debe realizarse el mantenimiento a cierto elemento o sistema, una vez aplicado el método de diagnóstico, a fin de evitar una falla que interrumpa un proceso productivo, con la consecuente afectación económica y humana.

Existen varios métodos de pronósticos reportados en la literatura (Rodríguez, 2005), siendo uno de los más usados el método analítico basado en el índice de pronóstico para la degradación del equipo (A), el cual se determina en función de la relación adimensional de la variable de pronóstico (DIF). Para intercambiadores de calor el parámetro A puede ser calculado en función del coeficiente global de transferencia de calor o de la caída de presión en el equipo.

El factor A límite se fija por el valor mínimo permisible para la operación del intercambiador de calor.

También está el método basado en las tangentes según (Rodríguez, 2005). En este se grafica la relación entre los coeficientes globales de transferencia de calor sucio y limpio en función del tiempo. Aquí se aprovecha la tendencia decreciente en función del grado de ensuciamiento que tenga el equipo, donde sí se trazan tangentes a esta curva de degradación se puede encontrar el tiempo óptimo de limpieza donde se corten ambas tangentes.

Los métodos basados en criterios económicos tienen en cuenta los costos de operación y los costos de mantenimiento y limpieza de los equipos.

Conclusiones parciales del capítulo 1

1. La pasteurización constituye una etapa esencial en el proceso, y específicamente en el tratamiento de pulpas donde los pasteurizadores tubulares son los más utilizados.

2. De los métodos de evaluación de intercambiadores de calor, el de la eficiencia y el Número de Unidades de Transferencia ($\epsilon - NTU$) es el ideal para la evaluación de los intercambiadores en el sistema de pasteurización, teniendo en cuenta que es un método sencillo y fácilmente programable.

3. Para la formulación matemática de la ecuación para el coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección forzada del jugo concentrado dentro del pasteurizador se utilizará el método de Rayleigh por ser de fácil aplicación y el más conocido por el autor.

4. La determinación del ciclo de limpieza del pasteurizador se realizará según las técnicas de mantenimiento por diagnóstico utilizando la optimización gráfica por el método de las tangentes por ser un método sencillo y práctico para la industria.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En este capítulo se caracteriza la UEB “Héroes de Girón”, con respecto a su ubicación, desempeño básico y principales producciones. Se describe la parte del proceso caso de estudio, y se plantean los métodos, técnicas, instrumentos y procedimientos utilizados en la recopilación, procesamiento, análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la presente investigación.

2.1. Ubicación de la UEB “Héroes de Girón”

La empresa se encuentra ubicada en el centro Sur de la Provincia de Matanzas, aproximadamente a 900 m de la Autopista Nacional.

• Desempeño básico de la entidad

La UEB “Héroes de Girón” produce jugos simples y concentrados congelados de frutas cítricas así como sus derivados, de manera que éstos satisfagan las necesidades siempre crecientes del cliente, con el sabor, color y aroma exclusivos de Jagüey Grande.

La empresa se consolida como una organización altamente eficiente y competitiva, capaz de procesar con eficiencia los volúmenes de fruta a recibir, los productos son referencia en el mercado nacional y en el exterior por su calidad, color y sabor, así como por el beneficio que reporta a los clientes. Sus niveles de ventas crecen y con ello las utilidades, todo basado en una empresa moderna, diversificada y solvente.

Las buenas prácticas de producción están bien establecidas y se llevan a cabo por parte del personal. Todos los procesos y actividades de la empresa se encuentran descritos en los procedimientos normalizados de organización siendo este sistema comprobado en auditorias trimestrales.

• Principales Producciones

- Jugos concentrados de toronja y naranja.
- Jugos naturales de toronja y naranjas.
- Jugos asépticos de toronja y naranja.
- Aceites esenciales de toronja y naranja.
- Celdillas cítricas de toronja y naranjas.

- Jugos concentrados de Piña
- Pulpa concentrada de frutas tropicales.
- Pasta de tomate.
- Puré de tomate.
- Conservas y mermeladas de frutas tropicales.
- Hollejo húmedo.

2.2 Descripción del proceso tecnológico producción de jugo concentrado de mango

Las frutas son transportadas desde las áreas de cosecha a través de camiones hasta la industria. Al llegar estas se pesan en el basculador antes de pasar al área de recepción donde se descargan. Aquí se toman al azar una muestra de tres unidades independientemente del volumen y la especie, para analizar algunos parámetros de calidad de las frutas, se determina el contenido de sólidos solubles (Brix), índice de madurez, acidez, distribución de calibre y contenido de jugo.

Desde esta área son transportadas y por cintas transportadoras y elevadores de cangilones hasta los silos, a través de una mesa de preselección donde son separadas todas las materias extrañas (palos, piedras, pedúnculos, ramas con hojas, o alguna otra).

Después de un almacenamiento temporal en los silos, la fruta es trasladada por cintas transportadoras hasta las tres líneas de trabajo, cada una lavadora de frutas. En este equipo las frutas son lavadas con agua tratada e hipoclorito de sodio, donde el contenido de cloro en el agua tiene que ser de 0,5 – 1,0 mg/L para eliminar posibles bacterias o microorganismos presentes en las frutas.

Estas frutas son transportadas por un elevador de cangilones hasta la tolva de alimentación a la mesa de selección donde son separadas las no aptas para el procesamiento, ya sea por estar en mal estado o muy sucias. Después pasan por una máquina de calibración que está acoplada a la mesa de selección. Esta operación se realiza con el fin de separar la fruta en tres calibres o tamaños y así facilitar la correcta extracción del jugo.

Los grupos de frutas calibradas se distribuyen en las cintas que alimentan los extractores. Estos están divididos longitudinalmente de acuerdo al diámetro de las copas, que coinciden con el calibre de las frutas que le llega, cuando el extractor está a máxima capacidad las frutas sobrantes no son asimiladas por él, por lo que regresan a las tolvas mediante cintas transportadoras que se llaman cintas de retorno.

Según el calibre de las frutas, los extractores están divididos en líneas de trabajo distintas, donde el proceso de jugos y concentrado continua con:

Estandarizado

Consiste en diluir la pulpa obtenida con agua en función del sabor y calidad del producto, regular la acidez, regular los sólidos solubles (grados Brix), y adicionar preservantes y estabilizantes para que no precipite. Los preservantes más comunes son el sorbato de potasio y el benzoato de sodio. En la regulación de los grados Brix se emplea azúcar blanca refinada o edulcorantes como aspartame o sucralosa. El ácido cítrico es el insumo más utilizado para regular la acidez del néctar. Como estabilizantes se puede utilizar: carboxil-metil-celulosa (CMC), goma arábiga, goma xantán, goma de tara, entre otras.

Molienda coloidal u homogenización

Se uniformiza la mezcla para así pasarla por un molino coloidal o un homogenizador que combina todos los componentes del néctar para obtener un producto uniforme.

Tratamiento térmico

El producto se extrae del tanque por medio de una bomba lobular y es enviado a una bomba de pistones que lo dirige hacia el esterilizador, el cual está formado por tres secciones:

1. Zona caliente: esta se centra dentro del pasteurizador; aquí el producto se lleva a la temperatura máxima de esterilización en intercambio con agua caliente, quien a su vez es calentada en un intercambiador con vapor y bombeada al esterilizador.
2. Pausa térmica, no es más que el momento en que el jugo sale de la zona caliente, donde pasa a través de la válvula de recirculación y la temperatura del producto debe

ser superior al valor de seguridad programado por el operador que es 100°C, en caso contrario la válvula se conmutaría automáticamente en forma de hacer recircular el producto al interior del tanque producto.

3. Zona fría, en la cual el producto se lleva a una temperatura adecuada para poder ser llenado.

Envasado

Este se realiza en una llenadora aséptica, donde la transferencia de producto al interior del envase se realiza en un ambiente estéril. La acción de esterilizar al interior de la máquina se mantiene únicamente por medio del vapor. Luego estos para generar un cambio brusco de temperatura y así obtener un cerrado hermético son enfriados manualmente mediante chorros de agua fría o por el paso dentro de un túnel de duchas de agua.

2.2.1. Descripción detallada del caso de estudio

La pasteurización es una etapa fundamental en el proceso de producción, de jugos concentrado de mango. Con esta investigación se pretende analizar el comportamiento de la temperatura ya sea de entrada y salida al pasteurizador de dicho producto. Una vez que se determine el tiempo óptimo de limpieza, se obtendrán criterios de que contribuyan a la planificación de su mantenimiento.

Este equipo es un intercambiador de calor de doble tubos concéntricos que cuenta con ocho tubos cada uno con seis metros de largo (Anexo 6). El intercambio de calor ocurre a partir de agua caliente en contracorriente con el jugo. Una vez que llega el agua caliente al intercambiador a temperaturas entre 120 y 140°C, se divide en dos flujos, uno circula por el tubo interior con un diámetro de 0,04 m, y el otro por el más externo de 0,12 m, donde debe salir del equipo con valores cercanos a los 95°C. El concentrado es alimentado desde un tanque de recepción, donde entra con temperaturas entre 60 y 80°C, y debe salir a más de 100°C. Si esto no ocurre existe una válvula con un sistema de control automático, que cierra el paso del fluido y recircula el producto hacia el tanque de recepción. Las características técnicas de este equipo se muestran en el anexo 5.

2.3. Metodología empleada para el tratamiento estadístico

Esta se realizó a partir del procesamiento de los datos de temperaturas y flujos en el pasteurizador, recopilados con la ayuda de técnicos, obreros, y tecnólogos de la planta, pertenecientes al período comprendido entre el 22 de febrero del 2016 hasta el 12 de abril del 2016. Este análisis se basa en el estudio estadístico a través de la media, desviación estándar, el coeficiente de variación y las cartas de control, con el objetivo de obtener criterios que definan de forma estadística el funcionamiento del proceso para detectar desviaciones significativas.

- **Media de la muestra**

La media de la muestra se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

Donde:

x_i - Valor de la variable x en la medición i

n - Tamaño de la muestra.

- **Desviación estándar**

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.2)$$

Donde:

\bar{x} - Valor medio de la variable X para n mediciones

Aunque la desviación estándar proporciona una medida de la dispersión de un conjunto de resultados alrededor del valor medio, no indica la forma de la distribución. Esta puede apreciarse fácilmente mediante un histograma; cuando es normal se muestran las medidas distribuidas de forma casi simétrica en torno a la media, con las medidas agrupadas hacia el centro (Miller y Miller, 2002).

- Coeficiente de variación

El coeficiente de variación (CV) es otra medida de la variabilidad extensamente utilizada, también conocido como la desviación estándar relativa (DER). Se recomienda que sea menor que un 12%. Está definida por la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

- Cartas de control

Es un gráfico cronológico en el cual se puede observar y analizar el comportamiento de una variable en un período determinado, donde se perciben los límites y se distinguen sus variaciones. Su utilización eficaz permite la detección oportuna de desviaciones anormales en el proceso, así como la prevención de futuros problemas. Existen dos tipos, las Cartas de Media y las Cartas de Rango. La correcta aplicación de esta herramienta aumenta la eficiencia y la productividad del trabajo, y permitirá detectar cambios y tendencias importantes en los procesos (Rodríguez *et al*, 1985).

En este caso se realizan cartas a los datos de temperaturas de entrada y salida a el intercambiador de calor, para conocer si existen desviaciones significativas de sus parámetros de diseño.

2.4. Metodología empleada para la evaluación del intercambiador de calor de tubos concéntricos

La evaluación del pasteurizador, el cual es un intercambiador de tubos concéntricos, se lleva a cabo a través del método de la efectividad y el número de unidades de transmisión (ϵ - NTU). Sin embargo aunque existen otros procedimientos para el desarrollo del análisis de intercambiadores de calor, este método es el más sencillo de implementar y el más usado para evaluar y la determinar la eficiencia de la transferencia de calor.

2.4.1 Evaluación de los intercambiadores de calor según el método de ϵ -NTU

La ecuación de eficiencia del intercambiador de calor se define como:

$$Q_{abs} = mc_{pj} (T_{sj} - T_{ej}) \quad (2.4)$$

$$Q_{ced} = mc_{pw} (T_{ew} - T_{sw}) \quad (2.5)$$

Q_{abs} : Calor absorbido por el jugo (kW).

Q_{ced} : Calor cedido por el jugo (kW).

T_{sj} : Temperatura de salida del jugo ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ej} : Temperatura de entrada del jugo ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ew} : Temperatura de entrada del agua ($^{\circ}\text{C}$)

T_{sw} : Temperatura de salida del agua ($^{\circ}\text{C}$)

$$Q_p = Q_{ced} - Q_{abs} \quad (2.6)$$

Q_p : Flujo de calor perdido en el intercambiador (W).

$$Q_p = \frac{\pi(T_{sw}-T_a)}{\frac{1}{2k_s}\left(\frac{LN D_a}{D_3}\right) + \frac{1}{h_a D_3}} \quad (2.7)$$

T_a : Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

k_s : Conductividad del jugo a la temperatura del aire (W/mK).

D_a : Diámetro del aislante (m).

D_3 : Diámetro del tubo exterior (m).

h_a : Coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección libre del tubo al aire ambiente (W/m²K).

Para el cálculo de h_a :

$$N_u = \left(0.60 + \frac{0.38(7Ra^{\frac{1}{6}})}{(1+(0.559/Pr)^{\frac{9}{8}})^{\frac{1}{4}}}\right)^2 \quad (2.8)$$

N_u : Número de Nusselt.

Ra : Número de Rayleigh.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s-T_{00})}{\alpha\nu} \quad (2.9)$$

Las propiedades físicas del aire se consideran según Incropera (2011).

$$h_a = \frac{Nu k_{tubo}}{D_3} \quad (2.10)$$

Para el cálculo de la eficiencia:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{m_w c_{pw} (T_{ew} - T_{sw})}{C_{\min} (T_{ew} - T_{ej})} \quad (2.11)$$

Donde:

$$Q = m_w c_{pw} (T_{ew} - T_{sw}) \quad (2.12)$$

$$Q_{\max} = C_{\min} (T_{ew} - T_{ej}) \quad (2.13)$$

$$C_c = m_j c_{pj} \quad (2.14)$$

$$C_h = m_w c_{pw} \quad (2.15)$$

ε : Eficiencia del intercambiador (%).

Q : Cantidad de calor transferido (kW).

Q_{\max} : Máxima cantidad de calor transferido (kW).

m_j : Flujo másico del jugo concentrado (kg/s).

m_w : Flujo másico del agua caliente (kg/s).

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (2.16)$$

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

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

Para este tipo de intercambiador

$$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right) \quad (2.17)$$

El número de unidades de transmisión NTU e define como:

$$NTU = \frac{U_D A}{C_{\min}} \quad (2.18)$$

$$U_D = \frac{NTU C_{\min}}{A} \quad (2.19)$$

Donde:

U_D : Coeficiente global de transferencia de calor (W/m^2K).

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

Se calcula el factor de ensuciamiento (R_f), donde se toma como coeficiente global de transferencia de calor limpio el que ofrece el fabricante en la ficha técnica.

$$R_f = \frac{1}{U_{sucio}} - \frac{1}{U_{limpio}} \quad (2.20)$$

Cuando R_f (sucio) $> R_f$ (limpio o permitido), como sucede después de cierto períodos operacionales, el equipo no transfiere una cantidad de calor igual a los requerimientos del proceso debe ser limpiado, y así definir el tiempo perfecto para realizar su limpieza mecánica.

2.5. Metodología para la obtención del coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección forzada del jugo concentrado de mango

A partir del método de Rayleigh se realiza la formulación de la ecuación del coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección forzada del jugo en el pasteurizador, donde:

- Variable dependiente: Nu
- Variables independientes:
 - Velocidad del jugo (V)
 - Densidad del jugo (ρ_j)
 - Viscosidad dinámica del jugo (μ)
 - Viscosidad dinámica del jugo a la temperatura de la pared (μ_s)
 - Conductividad térmica (k_j)
 - Calor específico del jugo (c_{pj})

Después de realizar el análisis dimensional debe quedar una ecuación de la forma:

$$Nu = \alpha(R_e)^d(P_r)^g\left(\frac{\mu_s}{\mu}\right)^h \quad (2.21)$$

Donde:

Nu - Número de Nusselt (adimensional)

R_e - Número de Reynolds (adimensional)

P_r - Número de Prandtl (adimensional)

Los números adimensionales se determinan por las siguientes ecuaciones:

$$R_e = \frac{\rho_j \cdot V \cdot D_{oi}}{\mu} \quad (2.22)$$

$$P_r = \frac{c_{pj} \mu}{k_j} \quad (2.23)$$

V - Velocidad con la que circula el jugo por el pasteurizador (m/s)

Los términos independientes b , d , g , h se ajustan con datos experimentales y, por regresión múltiple se llega a la ecuación que permite determinar el coeficiente pelicular de transferencia de calor forzada del jugo.

Para lograr la formulación matemática de esta ecuación se necesita conocer datos experimentales del número de Nusselt, con el coeficiente individual del agua caliente y del coeficiente global de transferencia de calor se consigue dicho objetivo.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{w2}} + \frac{1}{h_j} + \frac{1}{h_{w1}}} \quad (2.24)$$

De aquí se despeja h_j para con el calcular:

$$Nu = \frac{h_j D_h}{k_s} \quad (2.25)$$

Donde:

h_j : Coeficiente pelicular de transferencia de calor del jugo (W/m² K).

k_s : Conductividad del jugo a la temperatura del agua (W/m K).

2.6. Metodología empleada para establecer los ciclos óptimos de limpieza en el pasteurizador

Para establecer los ciclos óptimos de limpieza en estos equipos se utiliza el método basado en las tangentes (Rodríguez, 2005). En este método se grafica la relación entre los coeficientes globales de transferencia de calor sucio y limpio en función del tiempo.

Esta gráfica muestra una tendencia decreciente en función del grado de ensuciamiento que tenga el equipo.

Si se trazan tangentes a esta curva de degradación se puede encontrar el tiempo óptimo de limpieza donde se corten ambas tangentes, como se muestra en la figura 2.1.

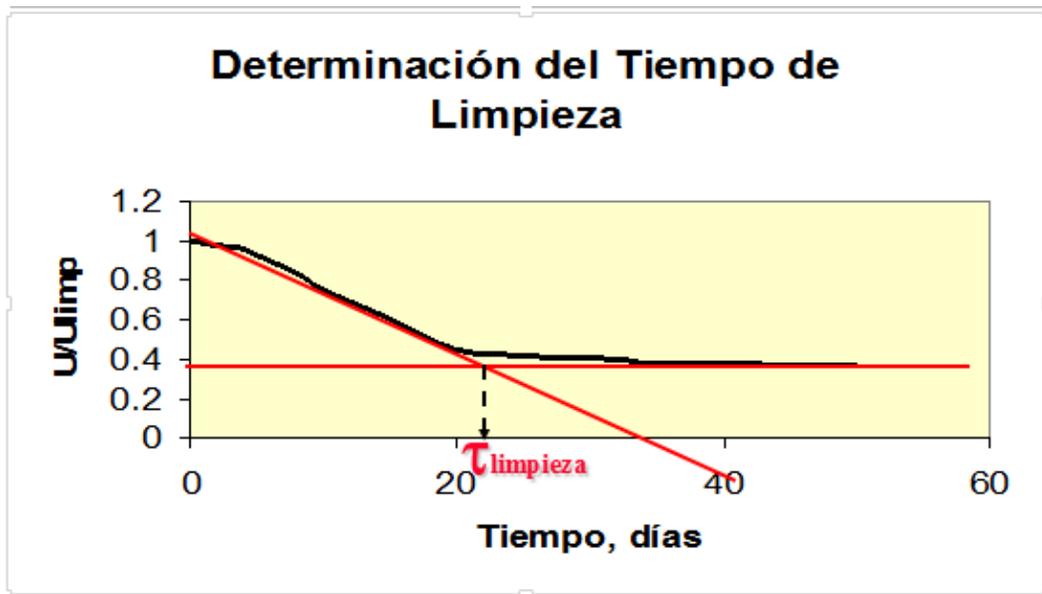


Figura 2.1: Determinación del tiempo óptimo de limpieza

Capítulo 3. Análisis de los Resultados

En este capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos a partir de las metodologías planteadas en los epígrafes del capítulo 2.

3.1 Resultados y análisis de la evaluación estadística de las temperaturas de entrada y salida al pasteurizador

A partir de la metodología expuesta en el capítulo 2, se realiza la caracterización estadística de la operación del pasteurizador con datos de temperaturas referidos al concentrado de mango a la salida del equipo en la línea de operación. En la tabla 3.1 se presentan resultados de media, coeficiente de variación y desviación estándar, de los tres primeros días consecutivos, pertenecientes al periodo del 22 de febrero del 2016 hasta el 12 de abril del 2016. El resto de los datos se muestra en el anexo 7.

Tabla 3.1 Resultado del análisis estadístico a los datos seleccionados

Fecha	Parámetros	Te (°C)	Ts (°C)
22/2/2016	X	74,25	100,17
	SD	7,55	3,06
	CV	10,16	3,05
23/2/2016	X	71,32	101,36
	SD	6,22	2,87
	CV	8,72	2,83
24/2/2016	X	72,41	100,33
	SD	4,83	2,39
	CV	6,70	2,38

Se puede apreciar cómo en los días analizados el coeficiente de variación de la temperatura de entrada no sobrepasa el 12% alrededor de la media, lo que significa que existe confiabilidad en los datos utilizados. El 25% oscila entre el 8 y 12%, el 60% entre el 4 y 8% y el resto no exceden el 4%, lo que indica confiable la muestra seleccionada. En el caso de la temperatura de salida este parámetro no sobrepasa el 4% lo cual indica mucho más confiable la data elegida.

También se realizaron cartas de control de media (Figura 3.1) y rango (Figura 3.2) a la data seleccionada para determinar anomalías operacionales en el equipo.

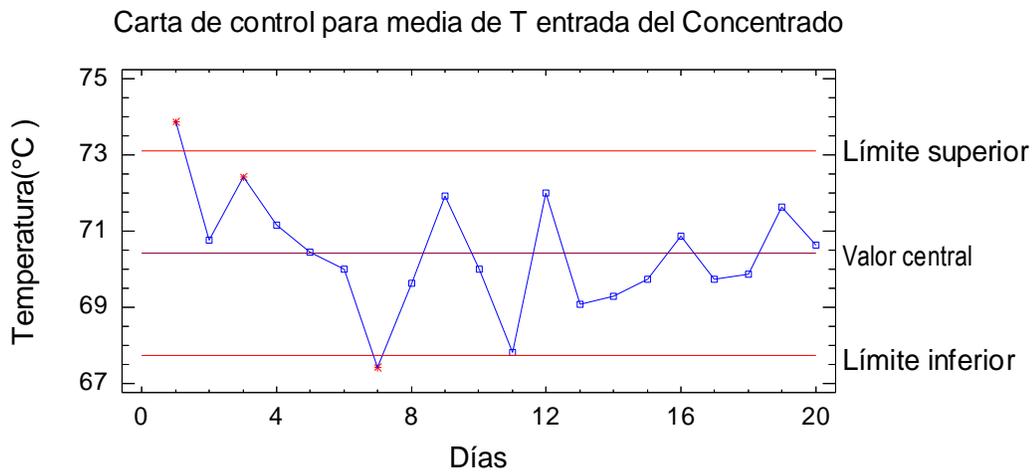


Figura 3.1 Carta de control para media de T entrada del concentrado

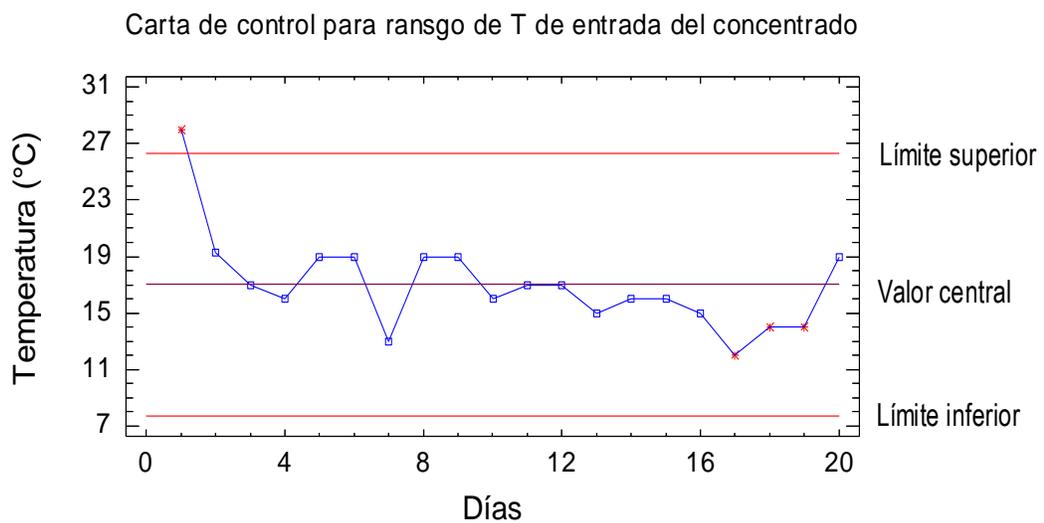


Figura 3.2 Carta de control para rango de T entrada del concentrado

A partir de estas se puede observar cómo existe al menos un punto fuera de los límites. El comportamiento de las variables indica que el funcionamiento del equipo está fuera de control a partir de los resultados obtenidos en este análisis con un nivel de confiabilidad entre 98 y 99% (ver anexo 8). En estos gráficos se observa cómo las

variables analizadas van disminuyendo su valor hasta salir de los límites establecidos alrededor del día 8 y, posteriormente varía de manera inestable hasta el día 12. Después del día 12 vuelven a incrementarse los valores de temperaturas. Esto es un caso típico de inestabilidad de los parámetros de operación del sistema.

3.2 Resultados de la evaluación del intercambiador

El uso de aislamiento térmico en los intercambiadores de calor es muy importante ya que contribuyen a un mejor intercambio de energía evitando pérdidas innecesarias. El pasteurizador caso de estudio no se encuentra aislado, sin embargo cálculos realizados a partir de ecuaciones utilizadas en el epígrafe 2.4, dan como resultado que se puede proponer un aislante (Magnesia 85% de 185 kg/m^3) con un espesor de 0,14 m, lo cual ayuda a el incremento de la eficiencia de operación del intercambiador.

A continuación se presenta los promedios de los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones expuesta en el capítulo 2.

Tabla 3.2. Resultados promedios de la evaluación del intercambiador

Parámetros	Valores promedios	Ecuación
Q (kW)	863,87	2.12
Q _{maxm} (kW)	1 479,64	2.13
ε (%)	58,45	2.11
NTU	1,36	2.15
U _{exp} (W/ m ² K)	1784,87	2.17

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento de la eficiencia en el tiempo analizado. También se puede observar en el anexo 9 la tendencia de estos parámetros en el período analizado.

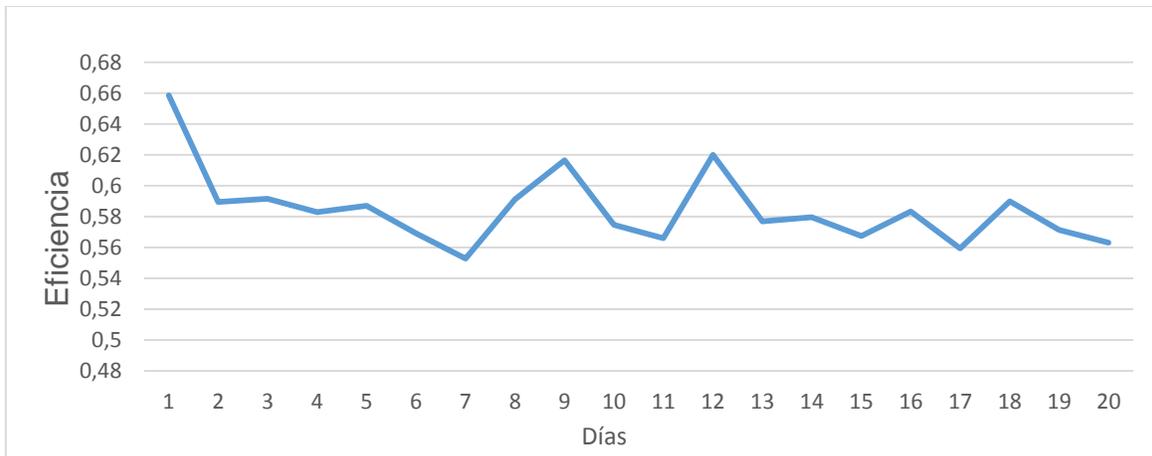


Figura 3.3 Comportamiento de la eficiencia del intercambiador de calor en los días analizados

Se puede observar un comportamiento lineal, casi constante sobre el 58% de eficiencia, aunque en ocasiones el jugo no sale del equipo con las condiciones de temperatura requeridas por lo que recircula nuevamente al tanque de resección.

El coeficiente global de transferencia de calor y el NTU se calcularon mediante ecuaciones planteadas en el epígrafe 2.4. También se puede en el anexo 8 como varían los valores de estos parámetros a través de los días estudiados.

El comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor (línea azul) se puede observar a continuación (Figura 3.4), donde el coeficiente global limpio se representa con línea naranja, apreciándose así como está distante del de operación, que aunque va variando nunca llega a acercarse al de diseño.

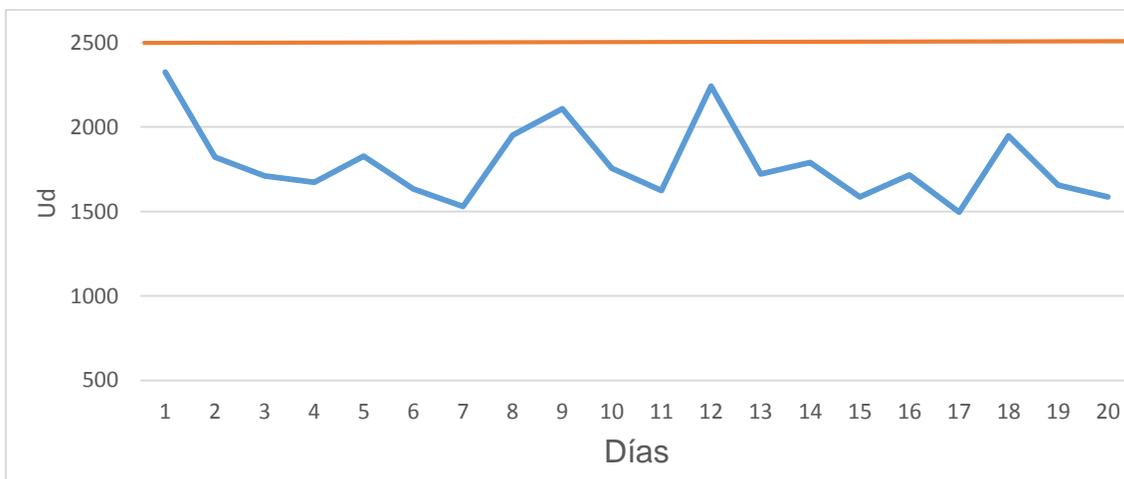


Figura 3.4 Comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor intercambiador de calor en los días analizados

3.3 Resultados y análisis de la modelación matemática de la ecuación del coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección forzada del jugo concentrado

A partir del análisis adimensional por el Método de Rayleigh, se obtiene la ecuación 3.1, la metodología se encuentra en el anexo 10.

$$N_u = a(R_e)^d(P_r)^g \left(\frac{\mu_s}{\mu}\right)^h \quad (3.1)$$

Donde los coeficientes a, d, g, h fueron determinados por regresión múltiple.

Para lograr la formulación matemática de esta ecuación se necesita conocer datos experimentales del número de Nusselt, con el coeficiente individual del concentrado y el coeficiente global de transferencia de calor, obtenidos estos en el epígrafe 3.2.

3.4 Resultados de la determinación del número de Nusselt por el modelo matemático obtenido

Este coeficiente se obtuvo experimentalmente a partir de la ecuación 2.25. A continuación se muestran los valores medios de los días procesados.

$$h_{j_{exp}} = 118,60 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$N_{u_{exp}} = 4,62$$

Con estos valores al aplicar la regresión múltiple (Anexo 11) se obtuvo un modelo matemático que corresponde al cálculo del Nusselt para así determinar el coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección forzada del jugo concentrado.

Para este modelo:

$$a = 0,012$$

$$d = 1,07$$

$$g = 0,97$$

$$h = 0,6$$

$$Nu_{modelo} = 0,012 \cdot (Re)^{1,07} \cdot (Pr)^{0,97} \cdot (\mu_s/\mu)^{0,6} \quad (3.2)$$

$$Nu_{modelo} = 4,51$$

$$h_{j_{modelo}} = 112,22 \text{ W/ m}^2\text{K}$$

3.5 Validación del modelo matemático obtenido

Seider *et al.* (1999), Himmenblau (2001) y Sargent (2009), plantean que los análisis a tener en cuenta para validar un modelo matemático son:

1. Calibración del modelo matemático con los parámetros de operación por diseño.
2. Análisis de sensibilidad del modelo matemático.

3.5.1 Calibración del modelo con los parámetros experimentales

La calibración del modelo matemático se realizó comparando los resultados del número de Nusselt experimental con el resultado del modelo, donde entre estos valores se haya un error relativo a partir de la siguiente expresión:

$$RPD = \frac{|Nu_{exp} - Nu_{modelo}|}{Nu_{modelo}} 100\% \quad (3.3)$$

Donde RPD es el error relativo expresado como porcentaje.

Este error se puede determinar además a partir de los coeficientes peliculares de transferencia de calor del jugo en las condiciones experimentales y los resultados obtenidos en el modelo matemático, estos resultados a partir de esta relación se pueden apreciar en el anexo 11.

En la tabla 3.3 se presenta una comparación entre los resultados del número de Nusselt experimental con el resultado del modelo matemático. Donde se puede apreciar del modelo obtenido el número de Nusselt, el 100% de los datos analizados presentan errores menores al 5%.

Esto demuestra que el modelo obtenido reproduce el 100% de los parámetros de operación de manera confiable. En el anexo 11 se muestra el análisis de varianza realizado para este modelo, donde se destaca que el valor de la probabilidad asociada al estadígrafo F (*p-value*) es cero.

Tabla 3.3: Comparación entre los resultados del número de Nusselt experimental con el resultado del modelo

Días	Nu _{exp}	Nu _{modelo}	RPD (%)
22/2/2016	4,54	4,47	1,65
23/2/2016	4,62	4,51	2,32
24/2/2016	4,63	4,51	2,81
25/2/2016	4,66	4,53	2,84
26/2/2016	4,62	4,51	2,30
27/2/2016	4,62	4,52	2,12
28/2/2016	4,68	4,59	2,13
29/2/2016	4,44	4,34	2,15
1/3/2016	4,57	4,49	1,80
2/3/2016	4,60	4,48	2,67
3/3/2016	4,68	4,58	2,31
4/3/2016	4,56	4,48	1,66
5/3/2016	4,64	4,52	2,56
6/3/2016	4,63	4,53	2,06
7/3/2016	4,67	4,56	2,26
8/3/2016	4,63	4,50	2,94
9/3/2016	4,69	4,58	2,35
10/3/2016	4,60	4,52	1,69
11/3/2016	4,59	4,46	2,94
12/3/2016	4,61	4,48	2,79

3.5.2 Análisis de sensibilidad del modelo matemático

Para validar un modelo matemático es muy importante el análisis de sensibilidad. Este se realiza con el objetivo de conocer la sensibilidad de la respuesta del modelo a los cambios de los parámetros que conforman el mismo (Cutlip y Shacham, 1999). Para ello los parámetros son variados dentro del intervalo de interés, y se observa la respuesta del modelo y a partir de esto se obtiene información acerca de la representación que realiza el mismo del fenómeno real y/o sobre la interacción de los factores en el sistema. Para el análisis de sensibilidad se seleccionaron los siguientes parámetros por ser los más representativos de las variables involucradas en el modelo matemático:

1. Relación entre las viscosidades.
2. Número adimensional Reynolds.

3. Número adimensional Prandtl.

3.5.2.1 Análisis de la influencia de la variación del Número de Reynolds

Para este análisis se fijó el número adimensional Prandtl y la relación entre las viscosidades. Como se observa en la figura 3.5 el aumento del número de Reynolds provoca un incremento del número de Nusselt, que a la vez provoca que sea cada vez mayor el coeficiente pelicular del jugo, debido a que son directamente proporcionales y a que, al aumentar la velocidad del fluido, se genera mayor turbulencia y trae consigo un aumento en la velocidad de la transferencia de calor (h).

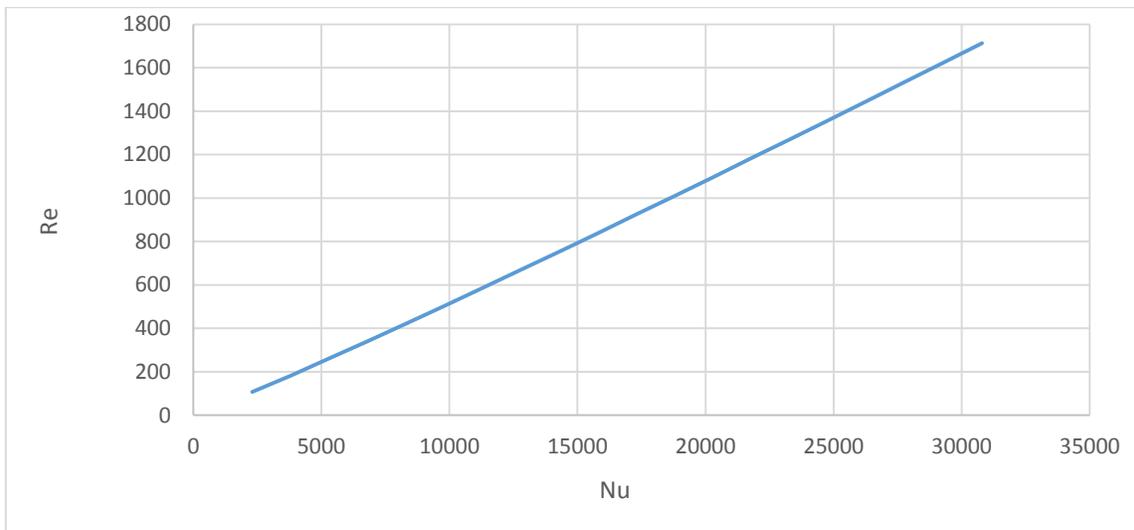


Figura 3.5 Influencia de la variación del número de Reynolds

3.5.2.2 Análisis de la influencia de la variación del Número de Prandtl

Este se realizó a partir del seguimiento a la influencia de la variación del número de Prandtl sobre el número de Nusselt, que a la vez está muy relacionado con el coeficiente pelicular de transferencia de calor del jugo. Para ello se fijó el número adimensional Reynolds y la relación entre las viscosidades. En la figura 3.6 se observa el aumento de este parámetro provoca un aumento en el número de Nusselt. Esto se debe a que el número de Prandtl relaciona la velocidad de difusión de la cantidad de movimiento con la velocidad de difusión del calor, y al aumentar la difusión del calor aumenta la velocidad de transferencia de calor.

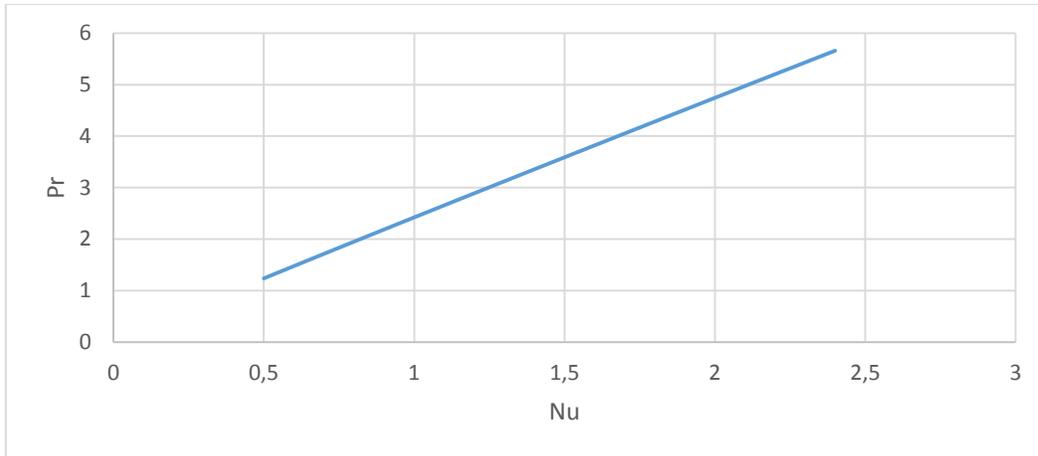


Figura 3.6 Influencia de la variación del número de Prandtl

3.5.2.3 Análisis de la influencia de la variación de la relación de viscosidades

El comportamiento de la variación del número de Nusselt con la relación de viscosidades se observa en la figura 3.7, lo cual corresponde con lo establecido por Prandtl en los conceptos de capa límite hidrodinámica y capa límite térmica. A medida que el flujo avanza, se forma en la pared del tubo una capa hidrodinámica límite de espesor creciente. Al aumentar el espesor de estas capas se produce su unión y se establece una distribución de velocidad constante a lo largo del tubo, cuyo perfil es el característico del tipo de flujo que se tenga.

Cuando el flujo está hidrodinámicamente estabilizado (flujo completamente desarrollado), la distribución de la velocidad en flujo laminar isotérmico es parabólica.

En el flujo de un fluido por el interior de un tubo la transferencia de calor varía a lo largo de este. A medida que avanza el fluido se observa el calentamiento o enfriamiento de las capas subyacentes a la pared. Al principio del tubo, la zona central del fluido permanece a la misma temperatura que el fluido a la entrada. En esta zona el fluido no participa en el proceso de transferencia de calor y toda la variación de la temperatura se concentra en las capas adyacentes a la pared. Por lo tanto, se forma una capa límite térmica en la superficie de la zona inicial del tubo, cuyo espesor aumenta con la distancia desde la entrada.

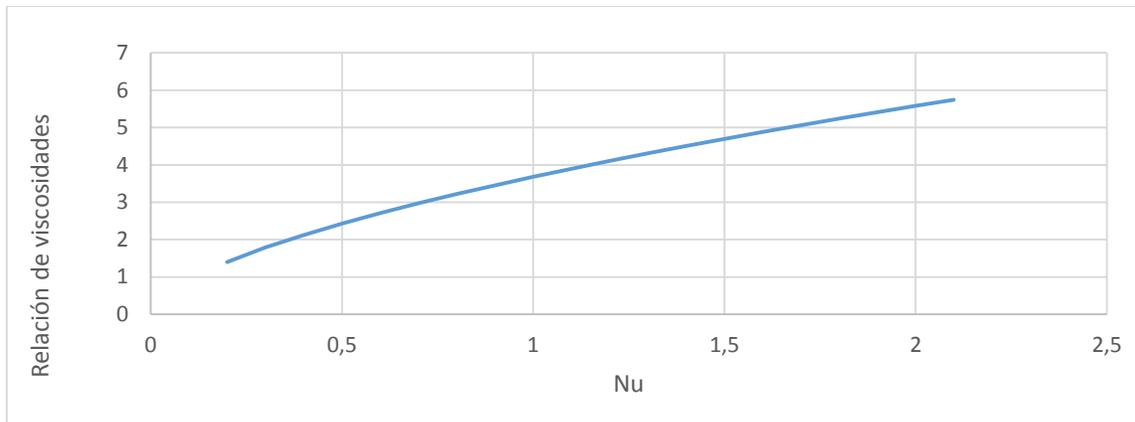


Figura 3.7 Influencia de la variación de la relación de viscosidades

3.6 Resultados y análisis del cálculo del factor de ensuciamiento

El comportamiento del factor de ensuciamiento (R_f) en el período evaluado se puede observar en la figura 3.8. Este parámetro tiene una tendencia inestable en el tiempo, donde los resultados obtenidos varían alrededor $0,00017 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Aunque no se tiene el valor de diseño, este tiene que ser mayor, ya que este factor aumenta a medida que se desarrollan los días de trabajo sin ser limpiado el equipo. La tendencia observada en la figura 3.8 demuestra que el pasteurizador se limpia cada cuatro días de operación aproximadamente.

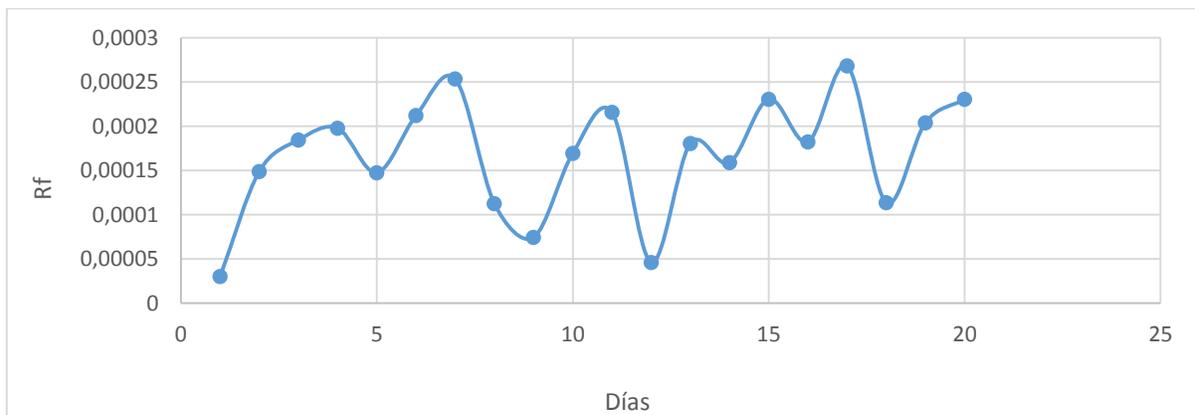


Figura 3.8 Comportamiento del factor de ensuciamiento del intercambiador en el tiempo medido

3.7 Determinación del tiempo óptimo de limpieza

El gráfico para determinar el tiempo óptimo de limpieza queda como se muestra en la figura 3.9, donde los intervalos decrecientes se analizaron en gráficos independientes y así determinar el tiempo de limpieza promedio (figura 3.10). El resto de las curvas se muestran en el anexo 13.

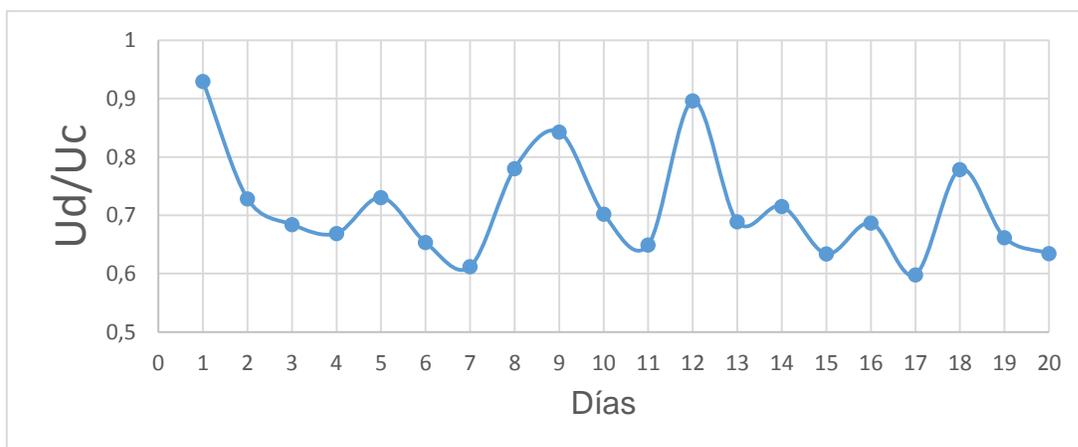


Figura 3.9 Comportamiento del tiempo de limpieza de la operación del intercambiador en el período analizado

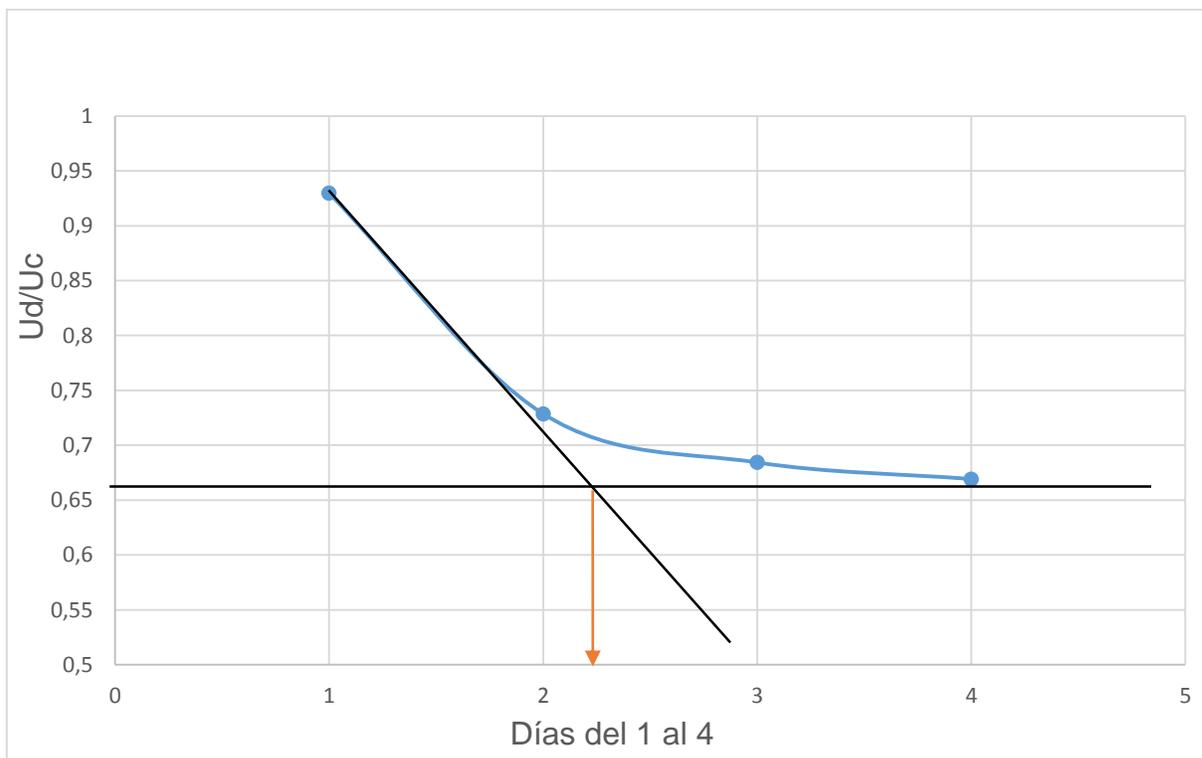


Figura 3.10: Curva para la determinación del tiempo de limpieza del 1-4 día

A partir de los tiempos óptimos de limpieza obtenidos en los intervalos decrecientes independientes, se determinó que el tiempo óptimo de limpieza obtenido para el pasteurizador es de 2 a 4 días (figura 3.11). En la empresa se limpia este equipo cada cuatro días de operación por decisión de los tecnólogos, como se demostró con el análisis de la variación del factor de ensuciamiento (R_D). Este resultado valida que la limpieza debe ser a los tres días de operación y que se debe aislar el intercambiador.

De acuerdo con esto, se puede determinar que la falta de aislamiento térmico y las posibles ineficiencias en equipos precedentes son los causantes de las recirculaciones en el pasteurizador, pues la limpieza se realiza alrededor del tiempo óptimo obtenido.

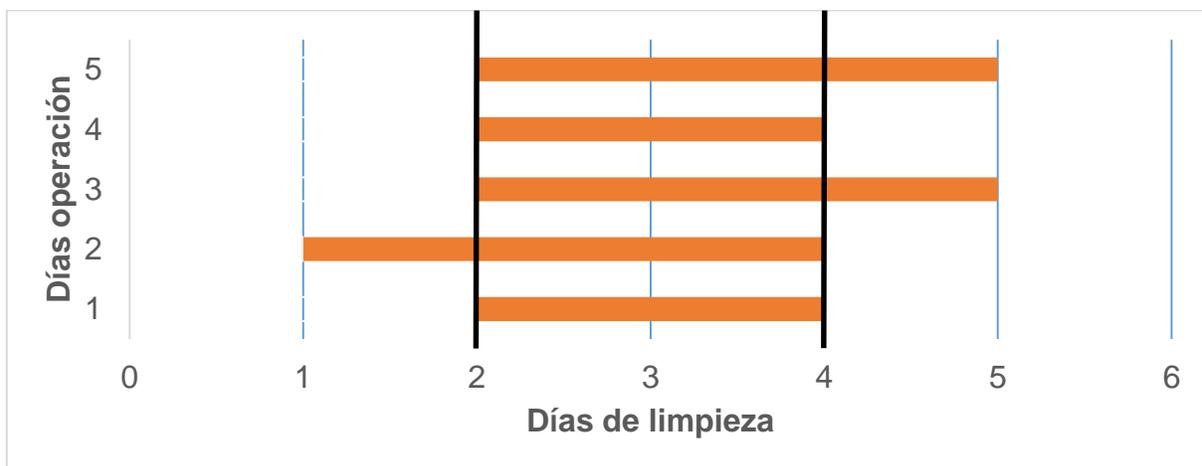


Figura 3.11 Tiempo óptimo de limpieza del intercambiador de calor

Conclusiones parciales del capítulo 3

1. En los datos analizados el coeficiente de variación de la temperatura de entrada no sobrepasa el 12% alrededor de la media. El 25% oscila entre el 8 y 12%, el 60% entre el 4 y 8% y el resto no exceden el 4%, lo que indica confiable la muestra seleccionada.
2. Las cartas de control realizadas indican que las temperaturas de entrada y salida del pasteurizador están fuera de control a partir de los resultados obtenidos en este análisis con un nivel de confiabilidad entre 98 y 99%.
3. La evaluación del intercambiador por el método ϵ -NTU determinó que la eficiencia oscila alrededor de 58,45%.
4. Se obtuvo un modelo matemático que reproduce el coeficiente pelicular de transferencia de calor del jugo concentrado con errores relativos menores que 5% en el 100% de los datos analizados
5. El modelo matemático obtenido para determinar el coeficiente pelicular de transferencia de calor para el jugo concentrado responde debidamente ante la variación del número de Reynolds, el número de Prandtl, y la relación de viscosidades.
6. A partir del método de las tangentes se determinó que el tiempo óptimo de limpieza del pasteurizador está entre 2 y 4 días de trabajo.

Conclusiones

1. La evaluación del intercambiador por el método ε -NTU determinó que la eficiencia oscila alrededor de 58,45%.
2. Se obtuvo un modelo matemático que reproduce el coeficiente pelicular de transferencia de calor del jugo concentrado con errores relativos menores que 5% en el 100% de los datos analizados
3. A partir del método de las tangentes se determinó que el tiempo óptimo de limpieza del pasteurizador está entre 2 y 4 días de trabajo.
4. La falta de aislamiento térmico y las posibles ineficiencias en equipos precedentes al pasteurizador deben ser los causantes de las recirculaciones en el pasteurizador, pues la limpieza se realiza alrededor del tiempo óptimo obtenido.

Recomendaciones

1. Programar la limpieza del pasteurizador cada 3 días de operación.
2. Instalar un aislante (Magnesia 85% de 185 kg/m^3) de 0,14 m espesor.
3. Evaluar los equipos precedentes al pasteurizador y, si es posible, toda el área de pasteurización en su conjunto.

Bibliografía:

1. Alvarado, E. (2013). Estudio del proceso de producción de pulpas de frutas pasteurizadas. Tesis Doctoral. Facultad de ingeniería Mecánica y ciencias de la Producción. Guayaquil, Ecuador.
2. Bambill, D.; Rossit, C. (2004). Desarrollo de un algoritmo de cálculo para la implementación del método de Rayleigh-Ritz en el cálculo de frecuencias naturales de vibración de placas rectangulares con complejidades diversas. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería. Bahía Blanca, Argentina. Disponible en <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/2649/RR202B>, Consultado el 26 de enero del 2016.
3. Branan, C. (2002). Rules of Thumb for Chemical Engineers. A manual of quids, accurate solutions to everyday process engineering problems. Houston: Editorial Gulf Publishing Company.
4. Bustos, G. (2013). Diseño en alimentos derivados de la guayaba, empleando procesos simples de conservación. Disertación de grado previa a la obtención del título de diseñadora con mención en productos. Pontificia universidad católica del Ecuador – Quito. Disponible en: <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/viewFile/10984/9409>. Consultado el 29 de enero 2016.
5. Cañizares, A. (2010). Caracterización química y organoléptica de néctares a base de frutas de lechosa y mango. Instituto Nacional de investigaciones agrícolas del estado Monagas.
6. Carvajal, K.; Cedeño, S. (2013). Empresa artesanal de jugos de frutas procesadas (mango y guayaba) en la CDLA. La pradera del Canton Milagro. Proyecto de grado previo a la obtención del título de ingeniera comercial. Milagro, Ecuador. Disponible en: <http://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/2060/1/Empresa%20artesanal>. Consultado el 29 de enero 2016.

7. Carvajal, O. (2014). Creación de una planta de elaboración de pulpas naturales de mango, guanábana y mora para su distribución en restaurantes de la región central de la provincia de Heredia. Escuela de Ciencias Empresariales. Maestría en Gerencia de Proyectos.
8. Couper, R.; Penney, W. y Stanley, M. (2010). Chemical Process Equipment Selection and Design Revised Second Edition. India.
9. Cruz, L. y Pons, A. (1985). Introducción a la Ingeniería Química. La Habana: Unidad de Producciones. Imprenta "Andre Voisin".
10. Cutlip, M.B.; Shacham, M. (1999). Problem solving in Chemical Engineering with numerical methods. 1st Ed. New York: Prentice Hall.
11. Díaz, Y. (2014). Evaluación de la eficiencia de la limpieza mecánica del intercambiador de calor en espiral de la segunda etapa de separación en la batería central de la EPEP-C. Matanzas. Tesis en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de pozos y producción de petróleo. Universidad de Matanzas.
12. Encina, C., Bernal, A. (2013). Efecto de la temperatura de Pasteurización y proporción de mezclas binarias de pulpa de carambola y mango sobre su capacidad antioxidante lipofílica. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
13. Gemina (2015). Catálogo General. Procesos Alimentarios S.L. Servicios, Maquinarias e Industrias. Murcia, España.
14. Hellevang, K. y Pedersen C. (2009). Air-to-Air Heat Exchangers for Healthier Energy -efficient Homes. North Dakota State University (NDSU). Disponible en: <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/energy.html/AE1393.pdf>. Consultado, el 29 de enero 2016. Consultado el 27 de enero 2016.
15. Hernández, A. L. y Lesino, G. (2010). Diseño, Construcción y evaluación Termoenergética de un Intercambiador de calor Aire – Aire de Flujo Cruzado. Argentina. Disponible en: <https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Hernandez11/publication/259528121>. Consultado el 27 de enero 2016.
16. Hernández, M. (2014). Obtención de ingredientes funcionales para la formulación de alimentos enriquecidos con extractos vegetales. Influencia del

tratamiento de conservación sobre algunos compuestos bioactivos. Tesis Doctoral. Valencia, España.

17. Himmelblau (2001). Optimization of Chemical Processes. 2nd Ed. New York: Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos.

18. Imbert, J.; Guillen, R. (2011). Evaluación de un recuperador de calor en una industria frigorífica. Universidad de Oriente. Centro de Estudios de Refrigeración. Cuba.

19. Incropera, F. P. y DeWitt, D. P. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Editorial Prentice Hall, 7th Ed. USA.

20. Izquierdo Millán, Marcelo (2001). Ingeniería térmica y de fluidos. Intercambiadores de calor. Editorial Leganés.

21. Jaramillo, O. A. (2008). Manual de intercambiadores de calor. Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en:

<http://www.cie.unam.mx/ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf>. Consultado el 29 de enero 2016.

22. Jones, J. A. (2003). Heat Transfer Handbook, Department of Mechanical Engineering, Duke University Durham. North Carolina.

23. Kern, D. Q. (1999). Procesos de Transferencia de Calor. Editorial McGraw Hill Book Company INC. México.

24. London, A. L. y Kays, M. (1984). Compact Heat Exchangers. New York: Editorial Mc Graw Hill Book Company.

25. Marín, F. (2015). Equipos de transferencia de calor. Disponible en: http://www.thermoequipos.com.ve/pdf/articulo_03.pdf. Consultado el 29 de enero 2016.

26. Marquina, V.; Araujo, L.; Ruíz, J. Malaver, A.; Vit, P. (2008). Composición química y capacidad antioxidante en fruta, pulpa y mermelada de guayaba (*Psidium guajava* L.). Facultad de Farmacia y Bioanálisis, Facultad de Medicina. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Disponible en: <http://crawl.prod.proquest.com.s3.amazonaws.com>. Consultado el 29 de enero 2016.

27. McCabe, W. L.; Smith, J. C. y Harriott, P. (1998). Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Editorial McGraw Hill. Madrid, España.
28. Oliva, L. (1988). Explotación y materiales constructivos del generador de vapor, Ediciones ISPJAM.
29. Olivera, L. (2015). Expediente del perfeccionamiento empresarial. Caracterización de la empresa. Jagüey Grande, Matanzas.
30. Pérez, Francisco P. (2011). Medidas de caracterización de un intercambiador en espiral. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial, Madrid España.
31. Perry, Robert y Green, Don W. (2008). Chemical Engineers Handbook. Editorial Mc. Graw Hill Incorporation.
32. Quintero, C. y Vasco L. (2013). Caracterización Físicoquímica del mango común (*Mangifera indica L.*), durante su proceso de maduración. México.
33. Rao, Singiresu S. (1996). Engineering Optimization. Theory and Practice. Indiana: Editorial John Wiley & Sons, Inc.
34. Rawson, A.; Patras, A.; Tiwari, B. K.; Noci, F.; Koutchma, T. y Brunton, N. (2011). Effect of thermal and non-thermal processing technologies on the bioactive content of exotic fruits and their products: Review of recent advances. USA.
35. Rizo, L. B. (2008). Evaluación energética en la planta de procesamiento de crudo de la EPEP Centro. Tesis presentada en opción al título de especialista en perforación y extracción en pozos de petróleo y gas. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". Matanzas, Cuba.
36. Rodríguez, A.; Martínez, V.; Espinosa, N.; Reyes, G. (1985). Control de la calidad. La Habana: Departamento de Ediciones del ISPJAE.
37. Rodríguez, C. (1990) Aplicación del diagnóstico y pronóstico del estado técnico al mantenimiento del generador de vapor de la central termoeléctrica "Antonio Guiteras" Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Especialidad Ingeniería Química. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".
38. Rodríguez, T. (2005). El mantenimiento predictivo con enfoque de producción más limpia agregados del generador de vapor de centrales

termoeléctricas. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Especialidad Ingeniería Química. Universidad de Girona.

39. Sánchez, J.L. (1990) Desarrollo y aplicación del diagnóstico y pronóstico técnico al mantenimiento del sistema centralizado de aire acondicionado. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Especialidad Ingeniería Química. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".

40. Sargent, R. G. (2009) Verification and validation of simulation models. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey, Estados Unidos. 124-137.

41. Seider, W.D. *et al.* (1999). Process Design Principles. Synthesis, Analysis and Evaluation. New York: John Wiley and Sons.

42. Shilling, R. (2000). A new perspective on the impact of fouling on the performance of finned heat exchangers in comparison to heat exchangers without extended surfaces. Editorial Brown Fintube Company. Houston, Texas, USA.

43. Silva, F. V. M. y Gibbs, P. A. (2012). Thermal pasteurization requirements for the inactivation of Salmonella in foods. Estados Unidos.

44. Torres, E.; Soto, J.A.; Martínez, M.T. (2004). Manual de intercambiadores de calor. México.

45. Torres, R.; Montes, E. J.; Pérez, O. A. y Andrade, R. D. (2013). Relación del Color y del Estado de Madurez con las Propiedades Fisicoquímicas de Frutas Tropicales. Ecuador Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v24n3/art07.pdf>. Consultado el 20 de enero 2016.

46. Towler, G. y Sinnott, R. (2008). Chemical Engineering Desing. Principles, Practice and Economics of Plant and Process Desing. Editorial Butterworth-Heinemann. Estados Unidos.

47. Valeriani, R. (2003). Plan estratégico de la cadena productiva de mango. Ministerio de Agricultura. Lima, Perú.

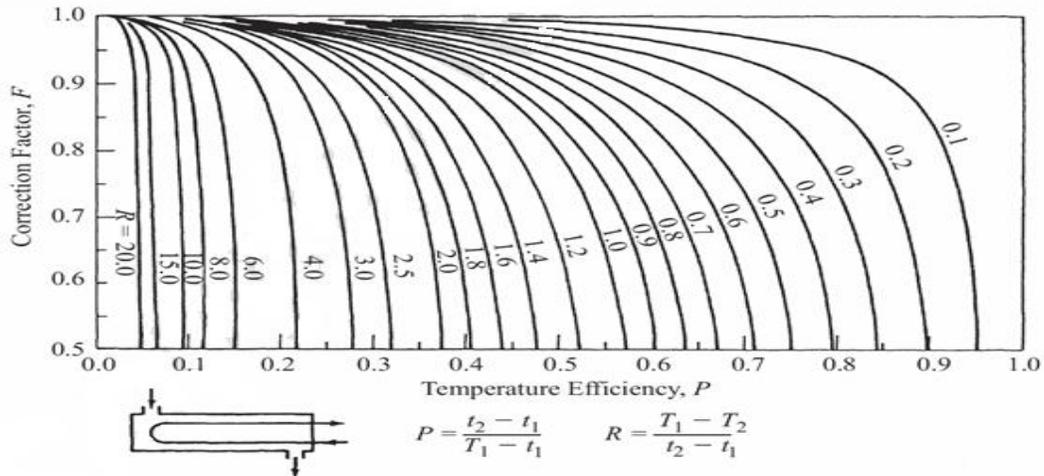
48. Velázquez, A. (2001). Transferencia de Calor. Departamento de Ingeniería Térmica y Mecánica de los Fluidos, Universidad Carlos III. Madrid, España.

49. Zapata, K.; Cortes, F.; Rojano B. (2013). Polifenoles y Actividad Antioxidante del Fruto de Guayaba Agría (*Psidium araca*). Laboratorio de Ciencia

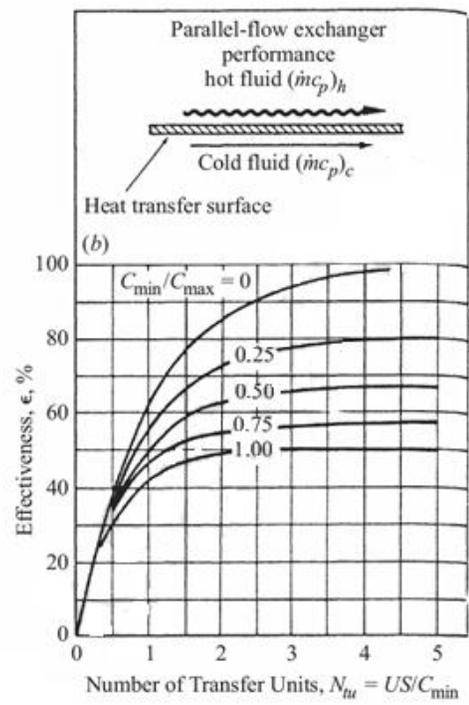
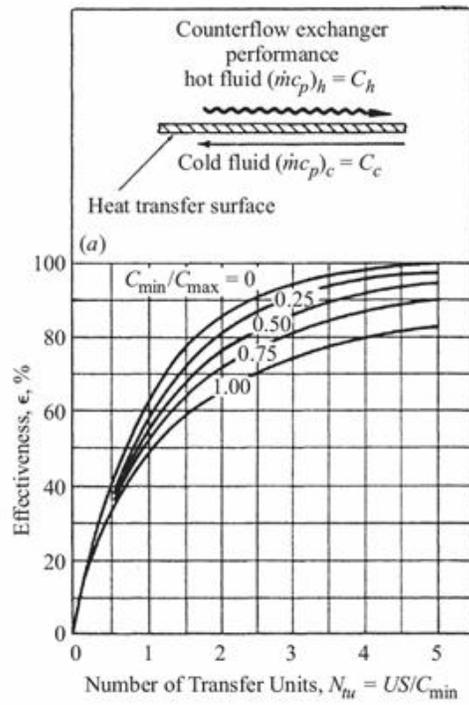
de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Disponible en:
<http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v24n5/art12.pdf>. Consultado el 29 de enero 2016.

Anexos

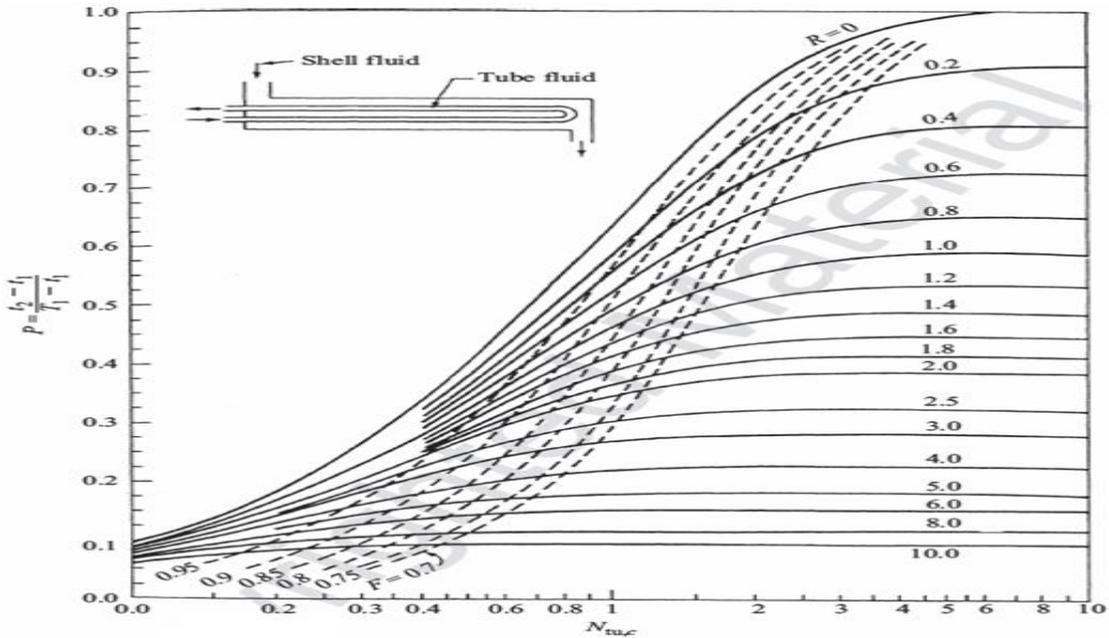
Anexo 1: Factor de corrección de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas para intercambiadores con un paso por la coraza y dos por los tubos



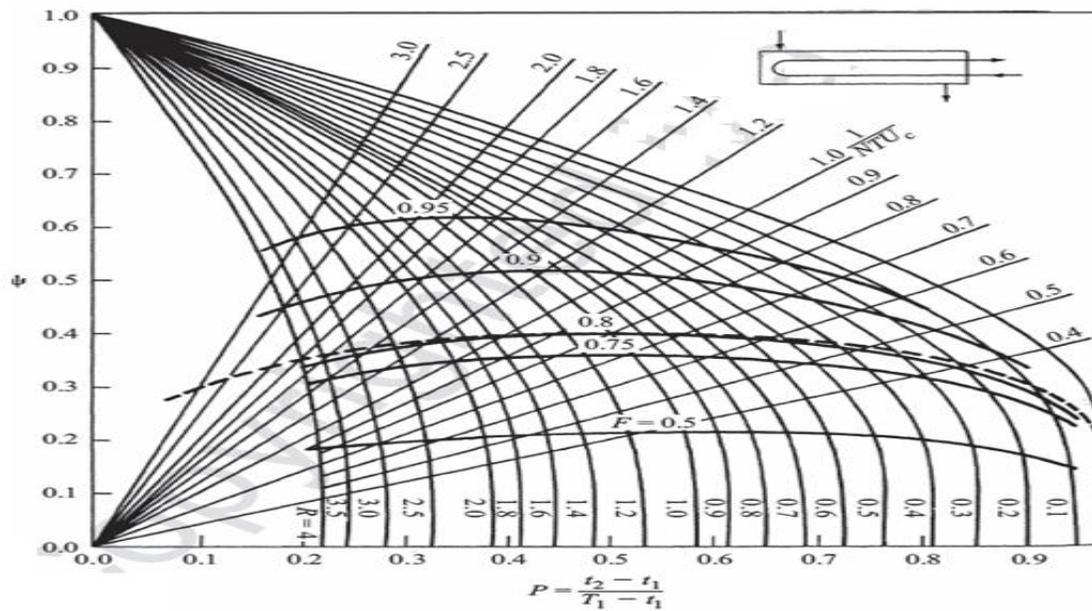
Anexo 2: Diagramas de eficiencia en función del NTU para intercambiadores de flujo en contracorriente y en paralelo



Anexo 3: Diagrama de eficiencia, P , en función de NTU_c para los intercambiadores de calor de coraza y tubos 1 – 2 con fluido mezclado en la coraza



Anexo 4: Diagrama de ψ en función de la eficiencia, P , para los intercambiadores de calor de coraza y tubos 1 – 2 con fluido mezclado en la coraza



Anexo 5: Datos Técnicos del intercambiador

- Fabricado: GÉMINA Procesos Alimentarios S, L
- Modelo: THERM 10 TH
- Serie: 79IX0901
- Automatización: Amplia gama de procesos; desde la pantalla HMI al SCADA, Integración de modo optimo en soluciones de IT (Information Technology)
- Materiales: AISI 316 todas las zonas en contacto con el producto y AISU 304 el resto
- Coeficiente global de transferencia para condiciones de limpieza: 2500 (W/m²K)
- Diámetro interior (agua): 40mm
- Diámetro medio (jugo): 65mm
- Diámetro exterior (agua): 120mm
- Número de tubos: 8
- Longitud de cada tubo: 6 m
- Flujo de jugo concentrado: 7000 kg/h
- Te jugo concentrado: 60-80°C
- Pe del jugo concentrado: 40 bar
- Ts jugo concentrado: 100- 108°C
- Te agua caliente: 120-140°C
- Ts agua caliente: 90-97°C

Anexo 6: Pasteurizador tubular del Combinado Cítrico



Anexo 7: Resultado del Análisis estadístico a los datos seleccionados

Fecha	Parámetros	Te (°C)	Ts (°C)
22/2/2016	X	74.25	100.17
	SD	7.55	3.06
	CV	10.16	3.05
23/2/2016	X	71.32	101.36
	SD	6.22	2.87
	CV	8.72	2.83
24/2/2016	X	72.41	100.33
	SD	4.83	2.39
	CV	6.70	2.38
25/2/2016	X	71.23	101.21
	SD	5.02	3.34
	CV	7.24	3.29
26/2/2016	X	70.51	101.45
	SD	5.71	2.68
	CV	8.10	2.62
27/2/2016	X	70.23	101.08
	SD	5.94	2.86
	CV	8.44	2.82
28/2/2016	X	67.53	101.75
	SD	3.72	2.77
	CV	5.55	2.71
29/2/2016	X	69.55	100.85
	SD	5.63	2.45
	CV	8.09	2.42
1/3/2016	X	71.91	99.95
	SD	5.05	2.67
	CV	7.03	2.67
2/3/2016	X	70.23	101.45
	SD	4.96	3.02
	CV	6.94	2.97
3/3/2016	X	68.12	101.21
	SD	4.18	2.97
	CV	6.14	2.94
4/3/2016	X	72.13	101.33
	SD	5.37	2.51
	CV	7.46	2.49
5/3/2016	X	69.81	102.08
	SD	4.62	2.32
	CV	6.69	2.27
6/3/2016	X	69.30	101.33

	SD	3.73	2.54
	CV	5.39	2.51
7/3/2016	X	69.75	100.42
	SD	3.68	2.63
	CV	5.28	2.62
8/3/2016	X	70.87	102.75
	SD	4.66	1.62
	CV	6.66	1.57
9/3/2016	X	69.30	100.51
	SD	2.76	2.55
	CV	3.99	2.51
10/3/2016	X	70.76	100.95
	SD	4.56	3.14
	CV	6.48	3.11
11/3/2016	X	71.55	100.31
	SD	3.97	2.90
	CV	5.55	2.89
12/3/2016	X	70.30	100.62
	SD	5.75	2.90
	CV	8.15	2.87

Anexo 8: Cartas de control de media y rango para la temperatura de salida del jugo concentrado

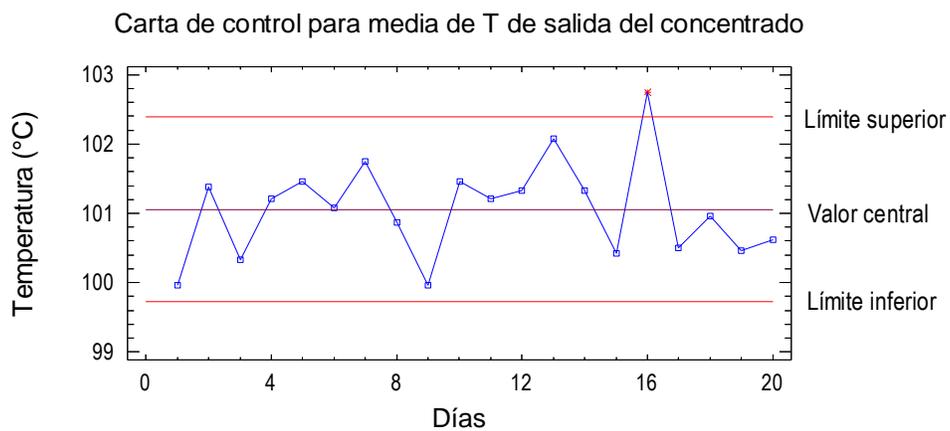


Figura 3.3 Carta de control para media de T salida del concentrado.

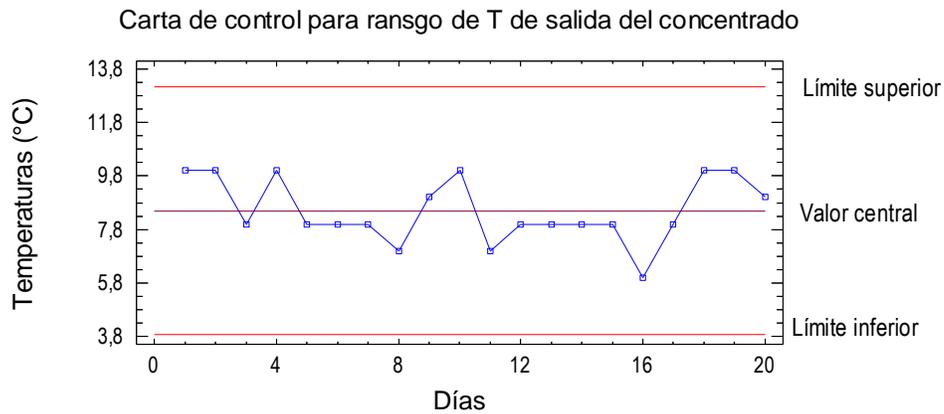


Figura 3.3 Carta de control para rango de T entrada del concentrado

The StatAdvisor

This procedure creates X-Bar and R charts for T sal c. It is designed to allow you to determine whether the data come from a process which is in a state of statistical control. The control charts are constructed under the assumption that the data come from a normal distribution with a mean equal to 101,056 and a standard deviation equal to 2,18228. These parameters were estimated from the data. Of the 20 no excluded points shown on the charts, 1 is beyond the control limits on the first chart while 0 are beyond the limits on the second chart. Since the probability of seeing 1 or more points beyond the limits just by chance is 0,000539847 if the data comes from the assumed distribution, we can declare the process to be out of control at the 99% confidence level.

Anexo 9: Variación de los parametros evaluados en el pasteurizador

Días	Q (W)	Q _{maxm} (W)	ε	NTU	U _{exp} (W/ m ² K)
1	873162,33	1325797,25	0,66	1,81	2324,46
2	873072,99	1480883,44	0,58	1,39	1821,59
3	873256,94	1476427,54	0,59	1,36	1710,71
4	887534,00	1522440,906	0,58	1,32	1672,91
5	873048,69	1487182,80	0,58	1,38	1826,43
6	847625,33	1489662,87	0,56	1,27	1633,70
7	873150,36	1579785,25	0,55	1,18	1530,07
8	859279,25	1453784,13	0,59	1,44	1951,17
9	892282,18	1447392,88	0,61	1,57	2107,96
10	823778,37	1433343	0,57	1,32	1755,72

11	889664,75	1571587,64	0,56	1,26	1623,82
12	872889,93	1407873,09	0,62	1,62	2241,03
13	873098,90	1513631,42	0,57	1,31	1722,25
14	873027,16	1506176,75	0,57	1,35	1788,92
15	873207,82	1538644,04	0,57	1,25	1585,33
16	873163,91	1496779,01	0,58	1,34	1716,91
17	873276,76	1560921,507	0,56	1,20	1495,83
18	872923,31	1479584,84	0,58	1,43	1947,19
19	795894,96	1392754,37	0,57	1,28	1655,37
20	804025,48	1428067,38	0,56	1,24	1585,97

Anexo 10: Análisis dimensional por el método de Reyleigh

- Definir las variables independientes:

$$h_0 = f(D_{oi}, D_{io}, V, \rho_j, \mu, k_j, c_{pj}, \mu_w)$$

- Escribir el modelo como una serie de potencias de las variables independientes:

$$h_0 = \alpha D_{oi}^a D_{io}^b V^c \rho_j^d \mu^e k_j^f c_{pj}^g \mu_w^h$$

- Rescribir el modelo sustituidas todas las variables por sus relaciones dimensionales correspondientes al sistema internacional de unidades:

$$\frac{M}{\theta^3 T} = \alpha L^a L^b \left(\frac{L}{\theta}\right)^c \left(\frac{M}{L^3}\right)^d \left(\frac{M}{L\theta}\right)^e \left(\frac{ML}{\theta^3 T}\right)^f \left(\frac{L^2}{\theta^2 T}\right)^g \left(\frac{M}{L\theta}\right)^h$$

- Agrupar las dimensiones:

$$M\theta^{-3}T^{-1} = \alpha L^a L^b L^c \theta^{-c} M^d L^{-3d} M^e L^{-e} \theta^{-e} M^f L^f \theta^{-3f} T^{-f} L^{2g} \theta^{-2g} T^{-g} M^h L^{-h} \theta^{-h}$$

$$M\theta^{-3}T^{-1} = \alpha (L^{a+b+c-3d-e+f+2g-h})(\theta^{-c-e-3f-2g-h})(M^{d+e+f+h})(T^{-f-g})$$

- Crear un sistema de ecuaciones con los exponentes de cada dimensión:

$$L \rightarrow 0 = a + b + c - 3d - e + f + 2g - h$$

$$\theta \rightarrow -3 = -c - e - 3f - 2g - h$$

$$M \rightarrow 1 = d + e + f + h$$

$$T \rightarrow -1 = -f - g$$

- Calcular los grados de libertad (GL) del sistema de ecuaciones:

$$GL = \text{Número de exponentes} - \text{Número de ecuaciones independientes}$$

$$GL = 8 - 4 = 4$$

Por lo tanto hay que fijar tres variables: $\rho_j(d)$, $c_{pj}(g)$, $\mu_s(h)$, $D_{io}(b)$

7. Despejar los exponentes no fijos y dejarlos en función de los que se fijaron en el paso anterior:

$$a = -b - c + 3d + e - f - 2g + h$$

$$c = 3 - e - 3f - 2g - h$$

$$e = 1 - d - f - h$$

$$f = 1 - g$$

Los resultados de estas ecuaciones son:

$$f = 1 - g$$

$$e = -d + g - h$$

$$c = d$$

$$a = -b + d - 1$$

8. Sustituir cada exponente en el modelo por el valor calculado o despejado en el paso anterior:

$$h_0 = \alpha D_{oi}^{(-b+d-1)} D_{io} V^d \rho_j^d \mu^{(-d+g-h)} k_j^{(1-g)} c_{pj}^g \mu_s^h$$

9. Agrupar los exponentes:

$$h_0 = \alpha \left(\frac{D_{io}}{D_{oi}} \right)^b \left(\frac{D_{oi} V \rho_j}{\mu} \right)^d \left(\frac{\mu c_{pj}}{k_j} \right)^g \left(\frac{\mu_s}{\mu} \right)^h \frac{k_p}{D_{oi}}$$

10. Crear grupos adimensionales con las variables elevadas a una misma potencia:

$$N_u = \alpha (R_e)^d (P_r)^g \left(\frac{\mu_s}{\mu} \right)^h$$

Anexo 11: Análisis por regresión múltiple

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Nu

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-4, 41718	0,875398	-5, 04591	0, 0001
Re	1, 07349	0,170125	6, 31001	0, 0000
Pr	0,969184	0,126003	7, 69176	0, 0000
u	0,603482	0,110553	5,45877	0, 0001

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,002725	3	0, 000908335	44, 54	0, 0000
Residual	0,000326263	16	0, 0000203914		
Total (Corr.)	0, 00305127	19			

R-squared = 89, 3073 percent

R-squared (adjusted for d. f.) = 87, 3024 percent

Standard Error of Est. = 0, 00451569

Mean absolute error = 0, 00328973

Durbin-Watson statistic = 1, 87008 (P=0, 3252)

Lag 1 residual autocorrelation = -0, 0344378

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Nu and 3 independent variables. The equation of the fitted model is:

$$\text{Nu} = -4, 41718 + 1, 07349 \cdot \text{Re} + 0,969184 \cdot \text{Pr} + 0,603482 \cdot \text{u}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 89, 3073% of the variability in Nu. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 87, 3024%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0, 00451569. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0, 00328973 is the average value of the residuals.

The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is greater than 0, 05, there is no indication of serial autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0, 0001, belonging to u. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Anexo 12: Comparación entre los coeficientes peliculares de transferencia de calor del jugo en las condiciones experimentales y los resultados obtenidos a partir del modelo matemático

Días	hj _{exp}	hj calculado	RPD (%)
22/2/2016	116,69	114,79	1,65
23/2/2016	118,33	115,64	2,32
24/2/2016	118,83	115,58	2,81
25/2/2016	119,01	116,26	2,37
26/2/2016	118,30	115,65	2,29
27/2/2016	119,21	115,83	2,93
28/2/2016	119,81	117,32	2,13
29/2/2016	117,82	115,35	2,15
1/3/2016	117,29	115,22	1,80
2/3/2016	118,61	114,74	3,374
3/3/2016	119,27	117,14	1,81
4/3/2016	116,90	115,00	1,65
5/3/2016	118,77	115,80	2,56
6/3/2016	118,46	116,07	2,06
7/3/2016	119,48	116,83	2,26
8/3/2016	118,79	115,40	2,94
9/3/2016	120,02	117,27	2,34
10/3/2016	117,83	115,87	1,69
11/3/2016	119,10	114,33	4,17
12/3/2016	119,48	114,86	4,02

Anexo 13: Curvas para la determinación del tiempo de limpieza en los días analizados

