UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis en el tratamiento hidrotérmico del mango peruano

Trabajo de Investigación para optar el Grado de
Bachiller en Ingeniería Mecánico - Eléctrica

Josué Renato Gómez Saavedra
Hugo Arnaldo Linares Carrión
Jaime Zapata Martínez

Asesor:
Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana

Piura, mayo de 2021

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Resumen

El presente proyecto está dirigido al análisis del proceso hidrotérmico del mango, el cual es un proceso requerido por los mercados importadores y cuyo fin es la eliminación de la larva de la mosca de la superficie del mango. El análisis atenderá a los distintos parámetros que influyen de manera significativa al proceso hidrotérmico, sobre el cual se analizarán sus distintos mecanismos de transmisión de calor que influirán sobre el mango para obtener una temperatura final adecuada la misma que servirá como límite para evitar daños en su estructura y por ende a su calidad.

Así pues, para un correcto análisis de transferencia de calor durante el proceso hidrotérmico del mango, se realizará un estudio de los 3 subsistemas que lo conforman, estos son, subsistema agua-mango, serpentín-agua y agitadores-agua, los cuales influirán directamente en la transferencia de calor, del mismo que buscará obtener una mayor comprensión mediante el análisis en la convección y conducción que se registrarán durante el tratamiento como parte de los métodos de transferencia de calor. Finalmente, estudiará cada una de las gráficas obtenidas mediante la modelación matemática del tratamiento hidrotérmico, las mismas que registrará el comportamiento del proceso y que, por medio de su comprensión y estudio, servirá de mucha ayuda para el desarrollo de ideas y estrategias de mejora.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Tabla de contenido

Introducción 11

Capítulo 1 13

Identificación y descripción del sistema 13

1.1 Identificación 13

1.1.1 Descripción del sistema 14

Capítulo 2 17

Antecedentes y características del tratamiento hidrotérmico 17

2.1 Estado del arte 17

2.2 Factores de calidad 19

2.2.1 Coloración 19

2.2.2 Textura-componentes celulares 20

2.2.3 Índice de madurez 20

2.3 Efectos de los tratamientos de calor 21

2.4 Modulación matemática 22

2.4.1 Modelado que gobierna el calentamiento transitorio para el sistema jaba- mangos 22

2.4.2 Modelado analítico de conducción transitoria en una esfera 24

2.5 Terminada la parte de las simulaciones se plantea la configuración del problema: 25

2.6 Descripción del proceso hidrotérmico 26

2.6.1 Alternativas al tratamiento hidrotérmico 26

2.6.2 Tratamiento por aire forzado 26

2.6.3 Tratamiento con ambiente controlado 27

2.6.4 Tratamiento por irradiación 28

2.6.5 Tratamiento con microondas o radiofrecuencias (RF) 28

Capítulo 3 29

Modelación y análisis del sistema 29

3.1 Modelación matemática del sistema 29
3.1.1 Selección y justificación de los parámetros a analizar 29
3.1.2 Descripción de los métodos de transmisión de calor durante el tratamiento hidrotérmico .. 32
3.1.3 Modelación y resultados del sistema 35
3.2 Interpretación de los Resultados Obtenidos 43
Conclusiones 47
Referencias bibliográficas 49
Apéndices 51
Apéndice A: Código para la obtención de la temperatura en el centro del mango - EES: 53

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades de simulación. 17

Tabla 2. Parámetros de simulación. 18

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Lista de figuras

Figura 1. Mangos seleccionados que serán sometidos al Tratamiento Hidrotérmico del mango. 13

Figura 2. Canastilla para jabas de mangos 14

Figura 3. Tanque – Empresa Biofruit 14

Figura 4. Serpentines para intercambio de calor 15

Figura 5. Hélice 15

Figura 6. Panel de control de temperaturas durante el tratamiento 16

Figura 7. Temperatura media de los mangos [ºC] vs el tiempo [Minutos]. 18

Figura 8. Tanque híbrido de tratamiento hidrotérmico para satisfacer la demanda de Estados Unidos y Japón. 19

Figura 9. (A)Mango verde y (B) Amarillento. 20

Figura 10. (A)Mango tipo Kent, (B) Tipo Tommy y (C) Tipo Ataulfo. 21

Figura 11. Geometría del mango elaborado en el software SolidWorks 24

Figura 12. Sistema jaba/mangos simplificado. 25

Figura 13. Condiciones de frontera caso longitudinal. 25

Figura 14. Calibrado aire forzado 27

Figura 15. Flujo de calor en los mangos VS tiempo. A escala semi logarítmica. 30

Figura 16. Transmisión de calor por convección 32

Figura 17. Trasferencia de calor por conducción 33

Figura 18. Gráfica de la temperatura del agua en función del tiempo - sin carga de mangos. 43

Figura 19. Gráfica de la temperatura del agua en función del tiempo - con carga de mangos. 43

Figura 20. Gráfica de la transferencia de calor vs velocidad 44

Figura 21. Gráfica de la temperatura en el centro del mango vs el tiempo 45

Figura 22. Gráfica del coeficiente de convección vs diámetro del mango 45
Figura 23. Gráfica de temperatura en el centro vs diámetro del mango 46
Figura 24. Gráfica de coeficiente de convección vs velocidad..... 46

Introducción

Actualmente existen diversos tratamientos que tiene la finalidad de erradicar la mosca de la fruta, uno de ellos es el tratamiento Hidrotérmico del Mango, el mismo que se muestra como el tratamiento más desarrollado hoy en día debido a su eficacia y las grandes ventajas que posee respecto a otros tratamientos.

El mango es una de las frutas que más demanda tiene y es exportada a países como Estados Unidos, Europa, Japón, China, etc. Para que la fruta pueda ser consumida se necesita erradicar la ¨mosca en el fruto del mediterráneo¨ especialmente la denominada Ceratitis Capitata y por estas razones las exigencias de calidad son estrictas y porque la competencia con otros países aumenta cada año. Para esto se hace el tratamiento hidrotérmico del mango.

Este trabajo de investigación se encargará de modelar la transferencia de calor y las distintas variaciones que se pueden mostrar en el mango bajo diferentes consideraciones de velocidad del agua, tamaño del mango, etc.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Capítulo 1

Identificación y descripción del sistema

Para desarrollar un estudio del modelado de la transferencia de calor en el tratamiento hidrotérmico del mango, se tienen que reconocer cada sección del sistema identificar su respectiva función.

1.1 Identificación

Para que la sea consumida deberá estar bajo un entorno de control de calidad fitosanitario, con lo cual, el tratamiento hidrotérmico del mango tendrá como fin la eliminación de la denominada "Mosca de la Fruta del mediterráneo" especialmente la Ceratitis capitata.

Este proceso consiste en sumergir jabas de mango previamente seleccionado (Figura 1.1) en un tanque con agua y elevar la temperatura por un periodo de tiempo que dependerá del peso, calibre y tipo de mango a tratar para así controlarla mediante un sistema de control.

En este trabajo de investigación se analizará correspondiente a la transferencia de calor que hay con respecto al mango durante proceso mencionado. Además, este sistema tiene como objetivo mejorar de forma eficiente ofreciendo una optimización de recursos, ya sea: volumen del agua utilizada, energía, etc. (Viera & Jason, 2016).



Figura 1. Mangos seleccionados que serán sometidos al Tratamiento Hidrotérmico del mango.

Fuente : Mango Hot Water treatment

1.1.1 Descripción del sistema

El sistema presente los siguientes elementos:

- **Canasta:** La canasta es una estructura metálica (Figura 1.2) donde se van acomodar las jabas de mango y una vez completa se introducirá en su totalidad dentro de un tanque dando el inicio al tratamiento hidrotérmico del mango (Viera & Jason, 2016).



Figura 2. Canastilla para jabas de mangos

Fuente: Saavedra & Giuseppe (2018a).

- **Tanque:** En esta estructura (Figura 1.3) se introducirá en su totalidad la canasta metálica, esta tendrá que estar llena de agua y dentro de ella se encontrará un serpentín, sensores de temperatura y hélices (Viera & Jason, 2016).



Figura 3.Tanque – Empresa Biofruit

Fuente: Saavedra & Giuseppe (2018a).

- **Serpentín:** Como elemento principal es el que permite realizar la trasferencia de calor al agua gracias al vapor de agua que circula en su interior (Figura 1.4). Por lo general esta fuente de calor es proveniente de calderos que trabaja a distintos rangos de potencia dependiendo el tamaño del sistema (Viera & Jason, 2016).



Figura 4. Serpentines para intercambio de calor

Fuente: Saavedra & Giuseppe (2018a).

- **Hélices:** Estas hélices son encargadas de la circulación del agua de forma continua (Figura 1.5) en todo el tiempo que dura el tratamiento ya que se requiere de altas velocidades para lograr una entropía eficaz, por lo que se tiene que alcanzar una temperatura que rodee los 45°C para que la mosca de la fruta sea eliminada. Si el proceso se da a mayor velocidad se dará mejor transmisión de calor (Viera & Jason, 2016).



Figura 5. Hélice

Fuente: Internet, Imágenes Google

- **Sensores de temperatura:** Cumplen la función de controlar la temperatura enviando impulsos electrónicos que serán almacenados en un software que monitoreará la temperatura durante el proceso (Viera & Jason, 2016).
- **Sistema de control:** Software donde se registrarán los datos proporcionados por los sensores y que controlará el sistema para un control de alta calidad (Viera & Jason, 2016).



Figura 6. Panel de control de temperaturas durante el tratamiento

Fuente: Saavedra & Giuseppe (2018a).

Capítulo 2

Antecedentes y características del tratamiento hidrotérmico

2.1 Estado del arte

Se presenta a (Saavedra & Giuseppe, 2018a) que colabora en el proyecto "Diseño y construcción de un prototipo dual óptimo, para el proceso hidrotérmico del mango para cumplir protocolos fitosanitarios de exportación a los mercados de Japón y Estados Unidos en el Valle de San Lorenzo- Piura"(figura 2.1) con el objetivo de optimizar el tratamiento en su parte operativa con lo que respecta al control sobre la instrumentación usada.

Es importante la velocidad con la que el agua toma contacto con el mango pues dependiendo de la velocidad que este tenga hará que llegue a la temperatura ideal para la exportación más o menos rápido.

(La Madrid, R., Mendoza, E., Marcelo, D., Castro, M. 2016) que realizaron el proyecto "Análisis Numérico De Transferencia De Calor En Estado Transitorio Del Sistema Jaba/Mango Utilizando En El Tratamiento Hidrotérmico Del Mango" para la determinación de las influencias que tendría si se varía el flujo del agua. Para la simulación se consideró las siguientes propiedades mostradas en la "Tabla 1":

Tabla 1. Propiedades de simulación.

PROPIEDADES	AGUA	MANGO
Densidad	$997\ {}^{kg}/_{m^3}$	$1359\ {}^{kg}/_{m^3}$
Calor Específico	$4187\ {}^{J}/_{KgK}$	$3240\ {}^{J}/_{KgK}$
Masa Molar	$18.02\ {}^{Kg}/_{Kmol}$	$100\ {}^{Kg}/_{Kmol}$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Parámetros de simulación.

Región	Condiciones de frontera
Admisión	$T_{infinito} = 47.5°c$ $V_{infinito} = 0.005,0.05,0.3,3\ m/s$
Salida	$P_{sal} = 1\ atm$
Paredes	$V_s = 0\ m/s\ (condición\ de\ no\ deslazamiento)$ $T_m(0) = 21.1°c(sólo\ mangos)$ $Adiabática\ (sólo\ jaba)$
Interfaces	Periodicidad Traslacional

Fuente: "Análisis Numérico de Transferencia de calor en estado transitorio del sistema jaba/mango utilizado en el tratamiento hidrotérmico del mango" (Marcelo et al., 2016)

La obtención de los resultados en la simulación realizada para cumplir el protocolo de exportación japonés:

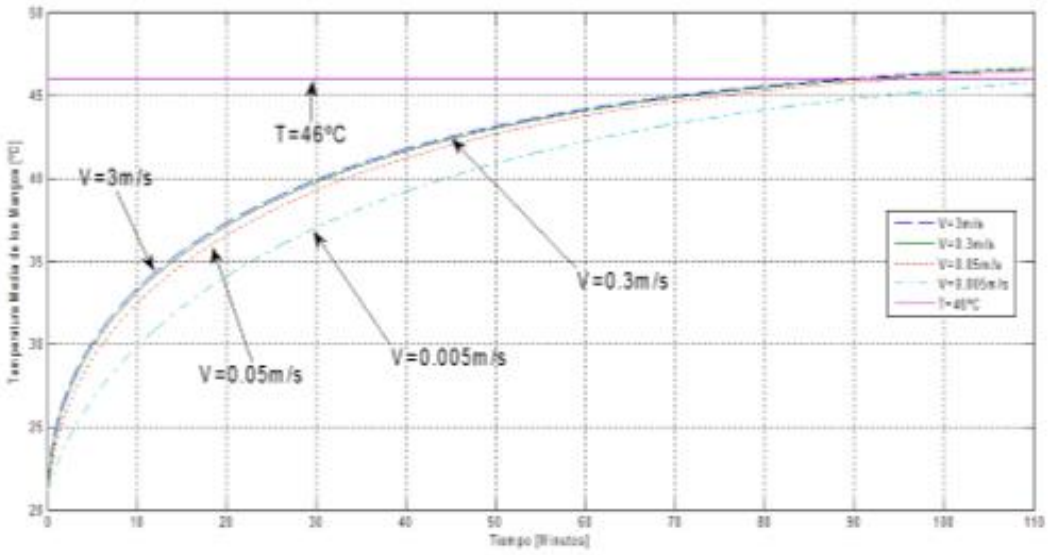


Figura 7. Temperatura media de los mangos [ºC] vs el tiempo [Minutos].

Fuente: "Análisis Numérico de Transferencia de calor en estado transitorio del sistema jaba/mango utilizado en el tratamiento hidrotérmico del mango" (Marcelo et al., 2016)

Con esta simulación se obtendrá un buen rendimiento al aumentar la velocidad del fluido a más de 0.3m/s, pues la ganancia del tiempo que se logrará en el proceso es

insignificante para la demanda que tiene sobre los ventiladores que son los que le dan el movimiento al fluido.

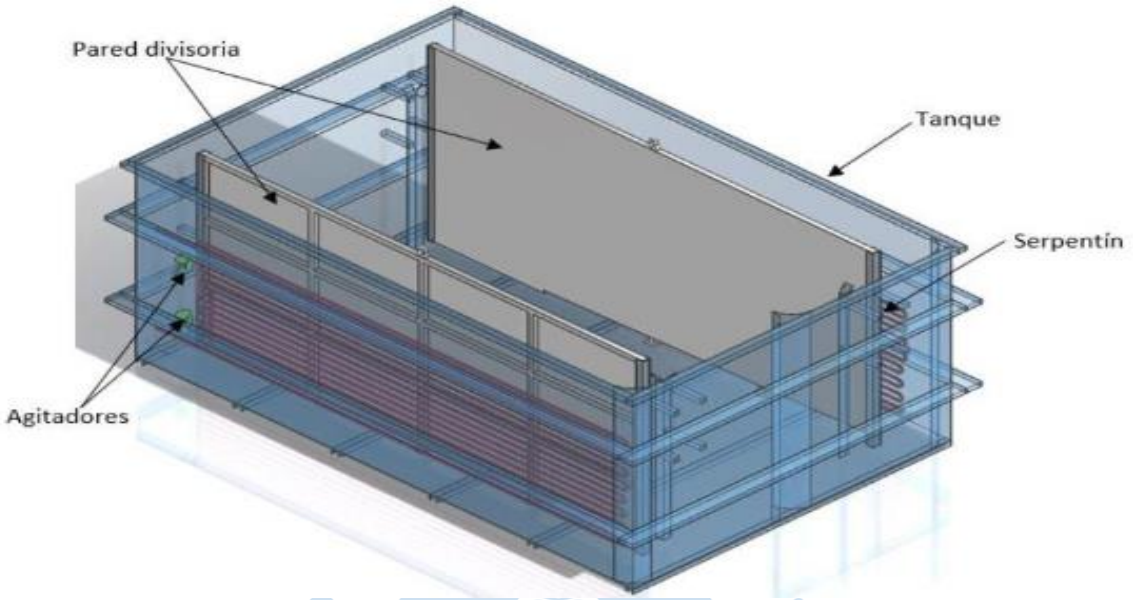


Figura 8. Tanque híbrido de tratamiento hidrotérmico para satisfacer la demanda de Estados Unidos y Japón.

Fuente: "Estudio numérico del comportamiento termofluídico de equipos de tratamiento térmico del mango".

2.2 Factores de calidad

2.2.1 Coloración

El color de las frutas (Figura 2.3) puede significar bastante, muchas de ellas como la mandarina, mango y zanahorias deben su color a su gran contenido nutricional, tal es el caso de los beta-carotenos los mismos que son convertidos en vitamina A por el hígado, y son provenientes de frutos de color anaranjado, amarillo y verde. Además de ello, el contenido de carotenos significará para estos frutos, un conjunto de características tanto buenas y malas que las definen; entre estas características buenas o fortalezas tenemos, resistencia calorífica, variación de pH y al agua; por otro lado, este tipo de frutas carecerán de buena resistencia a la oxidación, lo cual significara la perdida de coloración y la eliminación de la vitamina A. Por lo tanto, es necesario un buen tratamiento del fruto para su conservación, ya que, el color del fruto o su simple apariencia darán siempre una idea de su estado.



(A) (B)

Figura 9. (A)Mango verde y (B) Amarillento.

Fuente: Imagen de Google.

2.2.2 Textura-componentes celulares

La textura y el sabor en el fruto es el conjunto de características que pueden ser percibidas por el consumidor que están incluidas desde su elección y su masticación que lo llevan o no a ingerirlo. Este es un aspecto importante debido a que una buena inspección de la textura, determinará la forma de un tratamiento posterior, aspectos tales como el tiempo, temperatura en la cocción y lavado, clase embalaje, instrumentos usados en el pelado y cortado.

2.2.3 Índice de madurez

Un aspecto importante a observar especialmente en frutas, es cuan maduras están, esto debido a que, de acuerdo a su grado de madurez, se acarrean una serie de cuestiones que limitaran su tratamiento y/o exportación. Actualmente existen muchos métodos para evaluar este grado de madurez, frutas como el mango “Tommy Atkins” han sido definidas de manera visual de la siguiente forma: base de la fruta redonda, grosor de la fruta, brillo en la cascara, durante el corte, el pedúnculo se rompe fácilmente con un jabón. Otro factor es el porcentaje de grados Brix, que es el total de solidos solubles obtenidos mediante un refractómetro; la fruta para almacenamiento deberá tener 10% de grados Brix en plazos cortos, y para largos trayectos de 7 a 9%, además la fruta debe poseer color y forma determinada de la variedad como se puede observar en la Figura2.4. (Villapudua,2006)

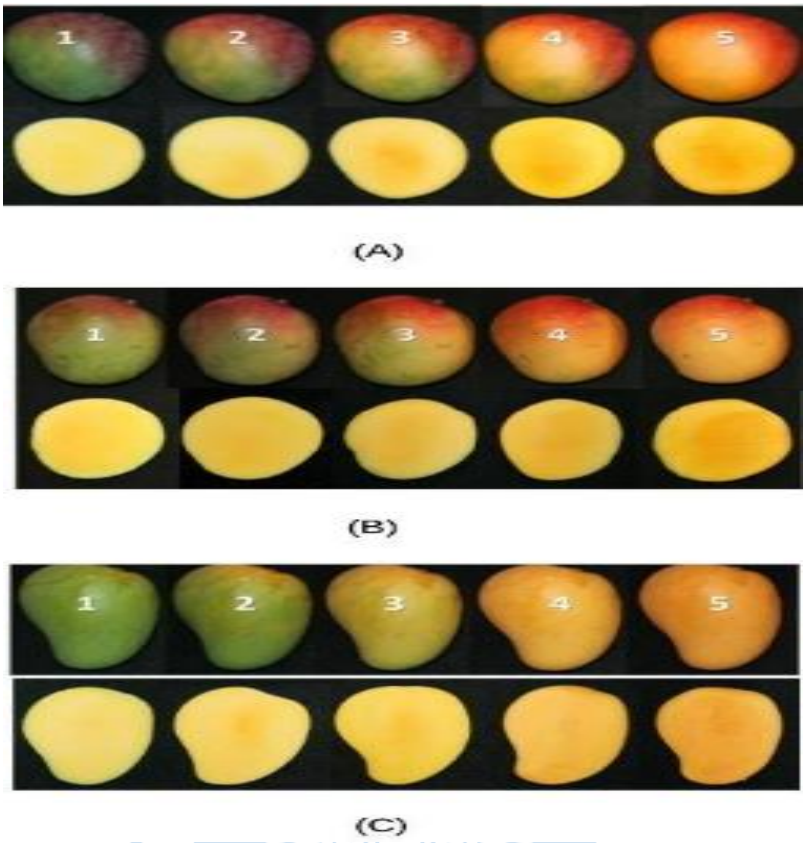


Figura 10. (A)Mango tipo Kent, (B) Tipo Tommy y (C) Tipo Ataulfo.

Fuente: "Entendiendo el Rol de la Madurez Fisiológica y las Condiciones de Envío en la Calidad de Llegada del Mango"(Báez et al).

2.3 Efectos de los tratamientos de calor

El mango es un fruto que comúnmente es sometido a tratamientos de calor para su preservación, por lo tanto, es importante tener conocimiento de los riesgos y beneficios que traen consigo estos procesos; si bien es cierto, los tratamientos con calor nos ayudan a eliminar la mosca del mango, sin embargo, una larga exposición a grandes temperaturas podría afectarlo de manera externa e interna. Entre los principales efectos que sufre la fruta tenemos:

- Activación de enzimas
- Cambio de color
- Generación de hormonas que aceleran la formación de etileno
- Variación en la respiración del tejido

2.4 Modulación matemática

Los mangos tienen que someterse a un tratamiento hidrotérmico, proceso que implica inmergir los mangos en agua a altas temperaturas cuyo tiempo de inmersión y temperatura se encuentran regulada por los protocolos fitosanitarios. En (Marcelo, La Madrid, Mendoza, & Oquelis, 2017) orientado al comportamiento térmico y fluidodinámico del sistema Jaba-Mangos se busca identificar las condiciones principales de operación para permitir procesar el mango en el menor tiempo y reducir costos mediante simulación numérica. Por ello se da a conocer las formulaciones matemáticas:

2.4.1 Modelado que gobierna el calentamiento transitorio para el sistema jaba- mangos

- Ecuación para la conservación de masa del flujo de agua

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

- Conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla \mathrm{p} + \nabla(\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

- Tensor de esfuerzos

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^{T}) - \frac{2}{3}\nabla \vec{v}\bar{\bar{I}}] \tag{3}$$

- Ley de Fourier para la conducción

$$q_x^{"} = -K_f \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y^{"} = -K_f \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4)$$

$$q_z^{"} = -K_f \frac{\partial T}{\partial z}$$

- Ley de enfriamiento de Newton

$$q_s^{"} = h(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

- El número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho_f v_f L_c}{\mu_f} \quad (6)$$

- El número de Prandtl

$$Pr = \frac{V}{\alpha} \quad (7)$$

- El número de Nusselt

$$Nu = \frac{hL_c}{K_f} \quad (8)$$

- El número de Biot

$$Bi = \frac{hL_c}{K_c} \tag{9}$$

- El número de Fourier

$$Fo = \frac{\alpha t}{r^2} \tag{10}$$

2.4.2 Modelado analítico de conducción transitoria en una esfera

Se plantea una metodología numérica del sistema jaba/mango (Figura2.5 y Figura2.6) simplificado donde se realizan simulaciones que comprenden los casos de orientación longitudinal, transversal además de los regímenes estacionario y transitorio. Por otro lado, se establecen hipótesis como flujo tridimensional, régimen estacionario/transitorio, densidad del agua sin variaciones, entre otros. para el enfoque longitudinal y transversal durante el estado estacionario y transitorio (Monroe & Daniel, 2017).

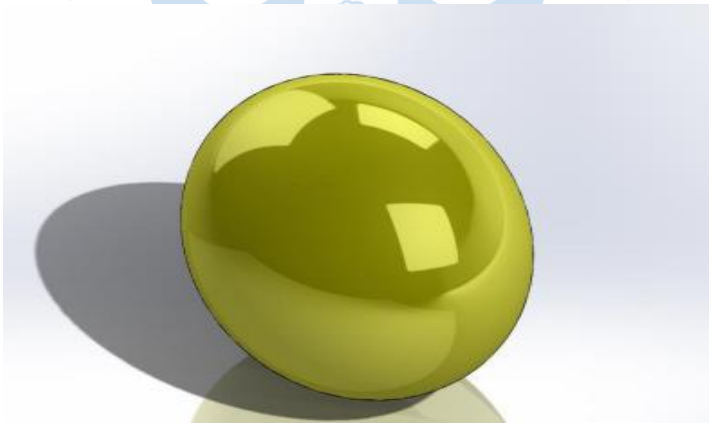


Figura 11. Geometría del mango elaborado en el software SolidWorks

Fuente: "Análisis Numérico De Transferencia De Calor En Estado Transitorio Del Sistema Jaba/Mangos Utilizado En El Tratamiento Hidrotérmico Del Mango" (Elder et al., s. f.)

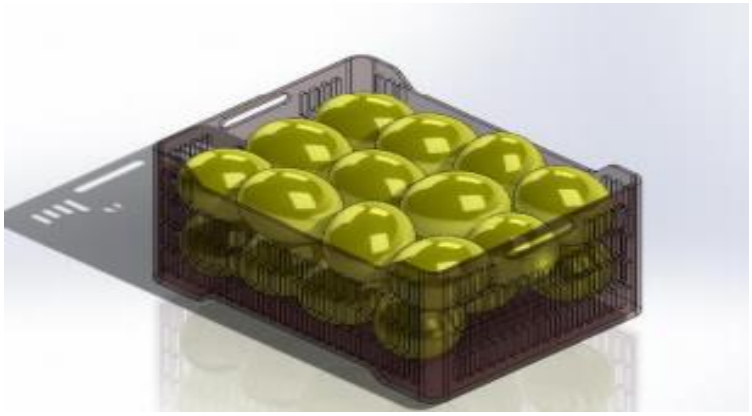


Figura 12. Sistema jaba/mangos simplificado.

Fuente: "Análisis Numérico De Transferencia De Calor En Estado Transitorio Del Sistema Jaba/Mangos Utilizado En El Tratamiento Hidrotérmico Del Mango" (Elder et al.)

2.5 Terminada la parte de las simulaciones se plantea la configuración del problema:

Se colocan dos subdominios: Subdominio del agua(fluido) se usa el modelo para la turbulencia k-ε en unión para un número de Prandtl. Y para el subdominio del mango (sólido) se usó el modelo de Energía térmica para transmisión de calor sin efectos de gravedad. Se colocan condiciones de frontera e iniciales en los casos longitudinal(Figura2.7) y transversal en los estados estacionario y transitorio (Monroe & Daniel, 2017).

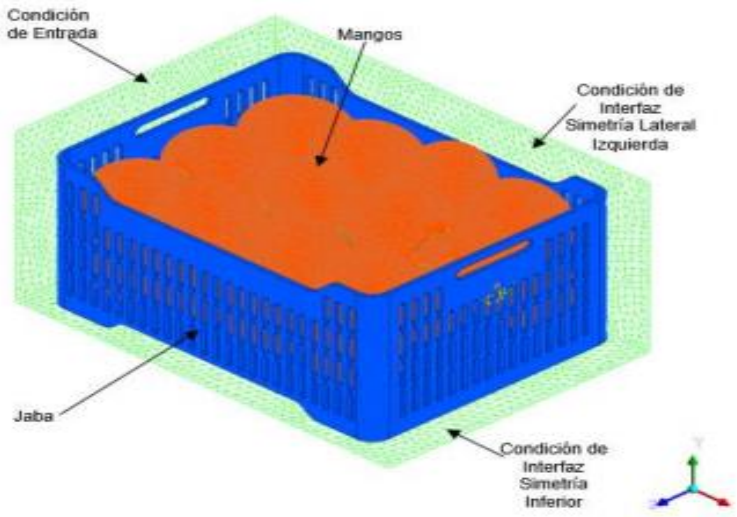


Figura 13. Condiciones de frontera caso longitudinal.

Fuente: "Análisis Numérico de Transferencia de calor en estado transitorio del sistema jaba/mango utilizado en el tratamiento hidrotérmico del mango" (Marcelo et al., 2016)

2.6 Descripción del proceso hidrotérmico

El desarrollo del tratamiento hidrotérmico tiene la finalidad de eliminar la mosca de la fruta para que su posterior exportación. Su proceso es el siguiente.

Se llena el tanque con agua y mediante el serpentín que tiene se procede a transmitir calor, elevado la temperatura. De forma simultánea se van llenando las jabas de mango, para ello los mangos irán sido seleccionados según su tipo y peso, ya que dependen de esos valores se sabrá el tiempo en los que se estará sumergidos en el tanque. Luego se colocan los sensores a lo largo, ancho y profundo de la canasta para registrar la temperatura en distintos puntos de la canasta, luego se procederá al llenado de la canasta con jabas de mango. Posteriormente se introduce la canasta metálica en el tanque hasta sumergirla. Se procede a dar inicio al tratamiento dándole un tiempo determinado dependiendo las características del mango, con esto se da inicio al control y registro de la temperatura a través del sistema de control. Finalizado el tiempo establecido se procederá a retirar las canastas, seguido de las jabas de mango (Viera & Jason, 2016).

2.6.1 Alternativas al tratamiento hidrotérmico

Además del tratamiento hidrotérmico, existen demás procesos que guardan la misma tarea de eliminar las larvas de la mosca en el mango para cumplir con los estándares solicitados por los mercados; sin embargo, cada uno de ellos poseen ventajas como desventajas, estas últimas son determinantes a la hora de su elección.

2.6.2 Tratamiento por aire forzado

El tratamiento por Aire Forzado (ACF) es el tratamiento más eficaz para cuarentena, pero las instalaciones de tratamiento son relativamente costosas. A su vez sigue siendo el segundo método de tratamiento más común para el mango por debajo del tratamiento hidrotérmico.

Este proceso es una variación el tratamiento de vapor caliente que se usa con el objetivo de matar la mosca de la fruta, Este tratamiento es muy efectivo para controlar plagas internas además de brindas una mejor calidad en la fruta. (Figura2.8)

La diferencia de este tratamiento con el de vapor caliente es que la piel de la fruta permanece fría durante el proceso.

Hay una previa clasificación del mango (peso y tamaño), para posteriormente ser expuesto a corrientes de aire caliente. El proceso es controlado mediante el registro de temperaturas de cada sensor puesto con anterioridad.

Por otro lado, el aire caliente ingresa a una temperatura de 50 grados centígrados, este aire es introducido durante un tiempo y velocidad determinada hasta que la mínima temperatura registrada por los sensores sea de 48 centígrados.

Cabe resaltar que la velocidad del ventilador que introduce aire caliente a la cámara puede variar, de acuerdo con la altura de las estibas de fruta en la cámara; la misma que será por la experiencia del operador.



Figura 14. Calibrado aire forzado

Fuente: (Lescano Barinotto, 2014)

2.6.3 Tratamiento con ambiente controlado

Este método está basado en el análisis individual del mango para la determinación de un ambiente o atmosfera artificial adecuada para su tratamiento o preservación de manera más eficaz ,eliminando plagas sin causarle daños al fruto; estos tipos de atmosferas artificiales están basadas en altos contenidos de Co2 y bajos niveles de O2,las cuales posibilitan que el periodo de tratamiento sea la mitad al del tratamiento térmico y menor al tratamiento por aire forzado; sin embargo, este método no es aprobado para la exportación de productos a EE.UU debido a una serie de inconvenientes que presenta.

(Ortega-Zaleta & Yahia 2000). Los mangos soportan exposiciones pequeñas a atmósferas insecticidas de poco oxígeno y mucho bióxido de carbono. Sin embargo, para la interacción de mangos verde-maduros a valores de oxígeno por debajo del 2% y/o a valores de bióxido de carbono por encima del 10% durante muchos días pueden provocar decoloraciones en la piel, color grisáceo o palidez de la pulpa del mango, maduración desproporcionada, y la generación de malos sabores debido al metabolismo de fermentación (acumulación de acetaldehído y etanol) (Yahia, 2009). Aquellos mangos conservados en atmósferas modificadas extienden la vida manteniendo la fruta en un ambiente con O2 de 3-5% y CO2 de 5-10%, entre 7 y 9 °C (44.6 a 48.2 °F) y 90 % humedad relativa en la atmósfera.

Por otro lado, este método presenta cierta complejidad debido a la necesidad de monitorear una mayor cantidad de componentes para la manutención y creación de las atmosferas, la manera más común de crear una es usando cámaras especiales, recubrimientos, películas plásticas, bolsas de polietileno o simplemente bolsas plásticas (Paull & Chen 2004); por lo tanto, la falla de uno de estos podría comprometer la calidad y eficacia del tratamiento.

2.6.4 Tratamiento por irradiación

El tratamiento por radiación es un método que nos asegura una mayor eficacia y rapidez de proceso, protegiendo la calidad del mango. Este método consiste en la esterilización provocada de las plagas, afectado su desarrollo mediante la modificación de su ADN por medio de la radiación ionizante, la misma que puede ser usada para grandes cargas y retrasar en cierta medida la maduración del fruto.

Cabe resaltar que este método es usado para una variedad de frutos en donde cada especie de mosca tiene varios tiempos de desarrollo, y la radiación está en función de la biología y edad correspondiente a la especie (Peña, 2013).La dosis de irradiación es cuantificada en unidades gray (Gy), que representa la energía absorbida por J/kg de material. En el mango la irradiación se ha aceptado a una dosis baja de 150 Gy como tratamiento para permitir de manera suficiente que la calidad de la fruta no sea afectada. La aplicación de dosis un poco más altas (de 250 Gy) permitirán que la vida en anaquel se extienda hasta aproximadamente 10 días.

Sin embargo, este tipo de tratamiento es poco usado debido a sus elevados costos, los cuales ascienden a los 10 millones de inversión para la creación de una instalación operativa según expertos.

2.6.5 Tratamiento con microondas o radiofrecuencias (RF)

Este tratamiento tiene una forma de energía electromagnéticas que se encarga de emitir una onda pequeña que se mueve a la velocidad de la luz, esta onda atraviesa la capa de la fruta haciendo que las moléculas en su cuerpo comiencen a vibrar produciendo así calor, Esto quiere decir que el calor se da en el interior de la fruta al exterior, todo esto debido a la vibración molecular, este proceso es diferente a los convencionales como, por ejemplo el tratamiento de aire forzado o el tratamiento hidrotérmico que calientan la fruta desde el exterior al interior.

El movimiento entre las moléculas genera una fricción al interior, la misma que produce unas condiciones hipertérmicas que afectaran a las moléculas ionizables y polares (principalmente sales minerales y agua) e interfieren en las membranas celulares disminuyendo su comportamiento fisiológico y de supervivencia (Valderrama & Arenas, 2008).

Para este tratamiento también se le puede usar otro adicional que es el de vapor haciendo así un tratamiento combinado que es muy usado en Asia ya que se encarga en poner en cuarentena a la mosca oriental de la fruta (bactrocera dorsalis). Este tratamiento requiere un tiempo muy corto a comparación de otros tratamientos, que es alrededor de 20 minutos lo que hace que desinfecte en un 100% a la mosca de fruta. En comparación al VHT convencional, MH-VHT ofreció menos porcentaje de daño por calor en el mango y acortó el tiempo del proceso de cuarentena en más del 90% durante el periodo de recuperación.

Capítulo 3

Modelación y análisis del sistema

3.1 Modelación matemática del sistema

En este capítulo se reconocen los 3 subsistemas que conforman el tratamiento hidrotérmico (agua-mango, serpentín-agua y agitadores-agua), en los que se debe identificar en cuales de ellos se llevan a cabo los procesos de conducción y convección de calor para que finalmente se modele matemáticamente la transferencia de calor en el mango.

3.1.1 Selección y justificación de los parámetros a analizar

Para la selección de los parámetros, habrá que dividir el procesos en 2 estados, el primero será una estado estacionario las cuales sus variables del proceso no van a variar con respecto del tiempo, esto será al inicio del proceso cuando la canasta o estructura metálica es recién introducida al tanque y luego empezará el estado transitorio donde los parámetros varían con respecto del tiempo y eso se da cuando inicie la circulación del agua encargado por la hélices donde la velocidad del fluido será un parámetro fundamental encargado de transmitir calor a todo el tanque.

3.1.1.1 Parámetros del mango. Vamos a considerar el mango como una pieza esférica el cual su interior será cubierta de agua. Tenemos que considerar los siguientes parámetros:

- **Peso del mango**

Tomaremos el valor máximo (en promedio) según el protocolo escogido, el cual será una masa de:

$$\mathrm{m} = 650\mathrm{gr} = 0.65\ \mathrm{kg}$$

Recordar que la densidad del mango es:

$$1359\ {}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$$

- **Radio de la esfera**

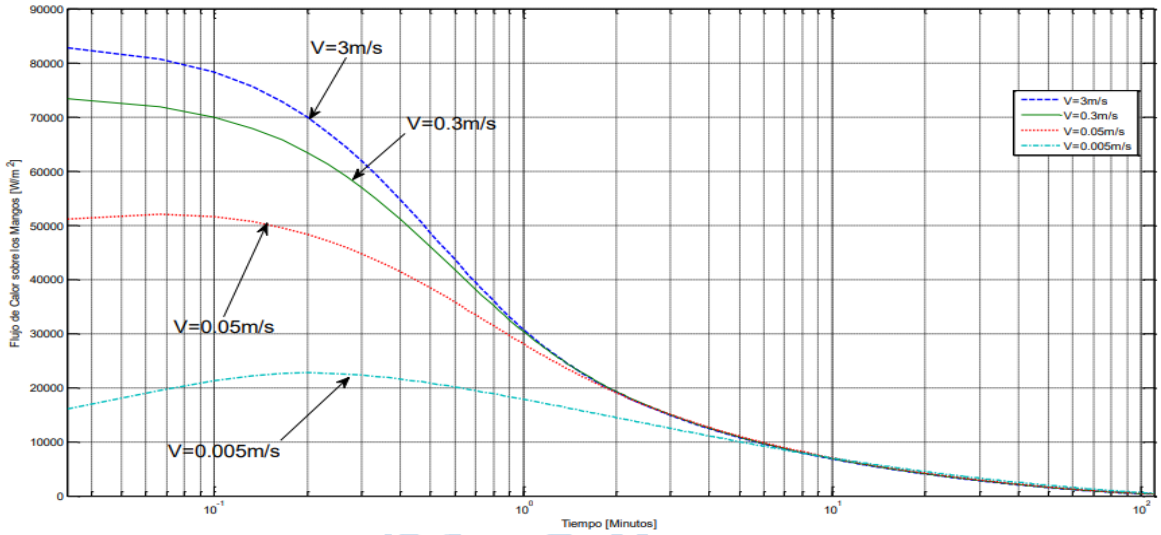


Figura 15. Flujo de calor en los mangos VS tiempo. A escala semi logarítmica.

Fuente: Castro, M. (2017)

Considerando la masa de 0.65kg y la densidad de 1359 $^{kg}/_{m^3}$

Densidad:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Volumen:

$$V = \frac{4\pi}{3} * r^3$$

Quedando:

$$1359\ ^{kg}/_{m^3} = 0.65 \,/\, \frac{4\pi}{3} * r^3$$

$$r\_0 = 4.85cm \cong 5cm$$

Este radio es el parámetro que se usará para el análisis, es decir, todos los mangos en este proceso son modelados por esferas de radio=r_0 =5cm.

Para el total de mangos que estarán dentro del tanque al momento del proceso hidrotérmico será de 1745 lo cual hace una equivalencia a 90 jabas debido a que por cada jaba hay una cantidad de 28 mangos, debido a esta cantidad de mangos que se ha asumido el peso total de estos será:

$$m_{total} = 1745 * 0.65 = 1134.25\ kg$$

- Temperatura inicial (que será igual a la temperatura ambiente):

La temperatura en la pulpa del mango no debe ser inferior a 21.1°C definido por el protocolo estadounidense.

- Temperatura final

Al ingresar al tanque su temperatura va a aumentar ya que el agua que se encuentra en él está por encima de 46.1°C, y debido a la diferencia de temperatura con respecto al mango, habrá una mayor transferencia del flujo de calor, la misma que disminuirá en cuanto la temperatura del mango vaya aumentando va a disminuir la transferencia de energía llegando a un límite.

3.1.1.2 Parámetros del fluido

- Temperatura inicial

La temperatura tiene que mantenerse a más de 46.1°C

- Temperatura máxima

Teniendo en consideración el límite presentado en el protocolo de la exportación hacia los estados unidos, se utilizará el valor de temperatura de 47.8°C para así mantenernos dentro del rango. Esta temperatura no puede bajar de 46.1°C.

- Velocidad en la que circula el fluido

La velocidad del fluido más óptima será la de 0.3 m/s, valor con la que se podría apreciar una ganancia aprovechable de tiempo con respecto a la utilización de más energía en los ventiladores; a partir de esa temperatura ya no era un proceso eficiente. Lo único que se logrará aumentando la velocidad del fluido es que al principio el flujo de calor de los mangos sea elevado, pero decaerá rápidamente acercándose más al valor utilizado de 0.3 m/s.

3.1.1.3 Protocolo seleccionado para el estudio. El protocolo con el cual se va a trabajar el tratamiento hidrotérmico será el impuesto por los Estados Unidos el cual específica que la temperatura del agua del tratamiento hidrotérmico está en el rango de 115 °F a 118 °F o lo que es equivalente a 46.1°C y 47.8°C respectivamente. Con este rango de temperaturas se logra que la temperatura del mango, específicamente en su pulpa, obtenga el valor de temperatura mínimo que en este caso es de 46.1°C.

Es importante que para que se logre un correcto tratamiento y no perjudique la calidad de la fruta, que el tanque cuente con un registrador de temperatura del agua no debe ser menor a 37.8°C y tampoco puede superar la temperatura de 54.4°C.

Para el tratamiento según EE. UU, se poseen las siguientes especificaciones:

- El producto deberá estar sumergido a lo menos 75 minutos según sea su tamaño, para tamaños superiores el tiempo mínimo es de 90 minutos.

- La temperatura mínima del mango al inicio del tratamiento debe ser superior a 21.1°C (70°F).

- La temperatura del agua en la tina deberá superar los 46.1°C (115°F) por más de un minuto.

- Los 5 minutos iniciales son muy importantes debido a que ningún sensor de agua debe disminuir de 46.1°C (115°F).

- El tratamiento termina con el el tiempo especificado, según el tamaño del producto.

- Es necesario que la fruta durante el tratamiento térmico se mantenga a 4 pulgadas o a su equivalente 10.16 cm por debajo de la superficie de agua, esto se logra usando una barrera de flotación.

3.1.2 Descripción de los métodos de transmisión de calor durante el tratamiento hidrotérmico

Una de las principales dificultades del tratamiento hidrotérmico es la optimización del tiempo necesario para alcanzar los valores de temperatura fitosanitarios necesarios para su exportación, en muchos casos, este proceso puede extenderse debido a una transmisión de calor deficiente, esto último es muy grave puesto que como bien se sabe, una larga exposición del mango a grandes temperaturas, puede producir efectos perjudiciales a su fisiología y calidad. Es por esto que es muy importante hacer un análisis de dicha transmisión de calor que toma parte durante este proceso.

3.1.2.1 Convección- Forzada. Este método de transferencia de calor es caracterizado por el empleo de un agente externo, en este caso son los agitadores, los cuales ayudarán a circular el fluido caliente, el cual recibe calor por medio de los serpentines.

La transferencia de calor se producirá directamente en la superficie de los distintos mangos, y dependerá de la cantidad de calor que se transfiera, así como también de la velocidad a la cual se encuentre el fluido.

- **Análisis de transferencia de calor por convección:**

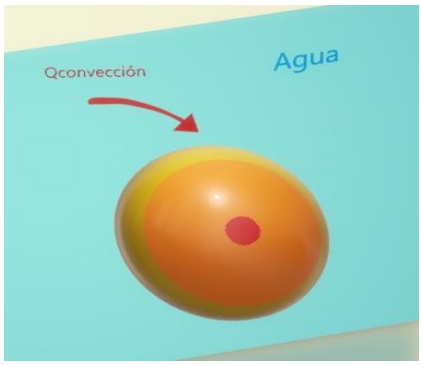


Figura 16. Transmisión de calor por convección

Fuente: Elaboración propia

Como ya sabemos, la parte externa del mango será la que este expuesta a una transferencia de calor por convección, la cual se puede plantear por bajo la ley de transferencia de calor por convección:

$$\text{Flujo de calor por convección} = h \times A \times [T(r_0, t) - T_S]fd$$

Se debe aclarar que “h”, el coeficiente de convección es un término muy difícil de obtener, el mismo que depende de distintos factores, y por ende, estos factores también intervienen en el proceso de transferencia de energía; dichos factores son:

- El tipo de convección, es decir, si es convección forzada o convección natural
- Si el fluido se encuentra en régimen laminar o régimen turbulento
- La velocidad del flujo
- Viscosidad, temperatura del fluido y densidad
- Calor específico del fluido
- La conductividad térmica del fluido
- Forma y rugosidad de superficie de intercambio de calor

3.1.2.2 Conducción. En primera instancia se hablo acerca del mecanismo de transferencia de calor por convección forzada entre el agua y el mango, sin embargo, el tratamiento hidrotérmico del mango incluirá otro mecanismo de transferencia de calor muy importante, éste es el mecanismo de conducción, el mismo que surge por la diferencia de temperatura entre la superficie exterior del mango con su interior.

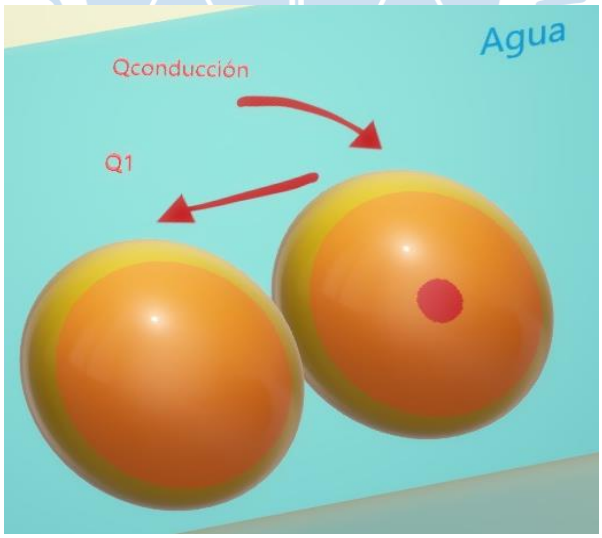


Figura 17. Trasferencia de calor por conducción

Fuente: Elaboración propia

- **Ley de Fourier para la conducción de calor:**

$$\text{Flujo de calor por conducción} = -K\frac{\delta T}{\delta r}\Big| r = r_0$$

Además, podemos observar que existirá una superficie de contacto entre los mangos, la cual se caracteriza por cumplir con ambas ecuaciones de calor debido a ser condición de frontera de interface, la cual demanda que ambos cuerpos en contacto tendrán la misma temperatura en el área de contacto, así como también, que una interface no puede almacenar energía y, por lo tanto, el flujo de calor sobre ambos lados de la interface deberá ser el mismo.

$$\text{Flujo de calor por convección} = \text{Flujo de calor por conducción}$$

$$h \times A \times [T(r_0, t) - T_S] = -K\frac{\delta T}{\delta r}\Big| r = r_0$$

Cabe resaltar que, para efectos de estudio, se podría hacer una simplificación de Q1, el cual viene a ser el calor por conducción entre mangos, esto es debido a que podremos seguir hipótesis tales como:

- La temperatura del agua en el interior del mango se mantiene constante en todo su volumen (régimen estacionario), lo cual nos permitirá asumir que la conducción de calor desde la superficie del mango a su interior se dará de manera paralela para todos los mangos en la tina
- Los mangos pueden ser asumidos con una geometría esférica, lo cual reduciría la zona de contacto entre mangos a un solo punto, lo cual imposibilitaría su conducción
- La temperatura ambiente no sea muy baja, ya que, de esta forma, las temperaturas de cada uno de nuestros subsistemas que intervienen en nuestro proceso se verían influenciadas, y con ello la transmisión de energía
- La colocación de sensores de temperatura en zonas estratégicas que permitan llevar un buen control del proceso; este aspecto favorecerá la hipótesis de régimen permanente en la temperatura del agua en la tina



Figura 3.4. Transferencia de calor por convección y conducción

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Modelación y resultados del sistema

3.1.3.1 Modelamiento agua-serpentín. Se creyó conveniente dividir el proceso en dos etapas para su correcta modelación.

- **Primera etapa- calentamiento sin carga:**

Es aquí donde el serpentín suministrará el calor necesario para el calentamiento del agua, para lo cual se determinará el calor que transfiere el serpentín al agua llevándolo de una temperatura inicial de 23°C a una de 47.8°C, para dar inicio al tratamiento hidrotérmico.

Para el serpentín se considera que brinda una potencia de 90 kW, que será transferida al tanque que se asume con un volumen de $30\mathrm{m}^3$.

$$\mathrm{Q} = \mathrm{m} * \mathrm{Cp} * (\mathrm{T_f} - \mathrm{T_i})$$

$$\mathrm{m_{agua}} = \rho * \mathrm{V} = \frac{997\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} * 30\ \mathrm{m}^3 = 29910\mathrm{kg}$$

$$\mathrm{Q} = 29910 * 4187 * (47.8 - 23) = 3105782.616\mathrm{KJ}$$

Cabe resaltar que la temperatura del agua deberá ser registrada por sensores de temperatura previamente instalados, cuya señal ayudará a controlar el serpentín, el mismo que se accionará o no en base a la obtención de dicha temperatura (set point de temperatura).

Ahora obtendremos el tiempo en el cual el serpentín ha entregado este calor al agua.

$$\Delta\mathrm{t} = \frac{3105782616\mathrm{J}}{90000\mathrm{W}} = 34508.69573\mathrm{seg} = 9.58574\ \mathrm{horas}$$

- **Segunda etapa- Calentamiento con carga:**

Para esta etapa se procede inmersión de los mangos sobre tanque, el mismo que estará caracterizado por una disminución de la temperatura del agua, debido a la transferencia de calor con los mangos. Cabe resaltar que la temperatura a la cual se ingresan los mangos es de 21.1°C y debe llegará a 46.1 por el protocolo escogido del país importadores a esta temperatura a la cual se deberá mantener el agua durante todo el periodo de tratamiento restante.

Este calor trasferido lo podemos definir de la siguiente manera.

$$\mathrm{Q} = \mathrm{m} * \mathrm{Cp} * (\mathrm{T_f} - \mathrm{T_i})$$

$$\mathrm{Q} = 1134.25 * 3240(46.1 - 21.1) = 91874.25\mathrm{kJ}$$

Donde Q es el calor necesario para llevar el mango de 21.1°C a 46. 1°C, cabe resaltar que dicho calor será suministrado por el agua y que, bajo la hipótesis de sistema adiabático, la cual implica transferencia de calor cero entre el sistema y el medio exterior, por lo que el calor resultante será el equivalente al transmitido por el serpentín al agua para mantener el equilibrio térmico.

Por consiguiente, por medio de la ley de la conservación de la energía podemos calcular el volumen del agua del recipiente de la siguiente forma:

$$-Q_{cedido} = Q_{ganado}$$

$$-m_{agua} * cp_{agua} * (T_f - T_{i,agua}) = m_{mango} * cp_{mango} * (T_f - T_{i,mango})$$

$$-29910 * 4187 * (T_f - 47.8) = 61134.25 * 3240 * (T_f - 21.1)$$

$$T_f = 47.03882°C$$

$$-m_{agua} * 4187 * (46.1 - 47.8) = 1134.25 * 3240 * (46.1 - 21.1)$$

$$m_{agua} = 12907.4937Kg$$

$$V_{agua} = 12.9463m^3$$

$$\Delta t = \frac{12907.4937 * 4187 * (47.8 - 47.03882)}{90000} x \frac{1min}{60seg} = 7.618min$$

Este es el tiempo en el que el agua llegará a la temperatura de equilibrio de 47.03882°C luego de haber alcanzado su temperatura máxima.

Una vez definido el volumen del tanque ,será necesario definir el tiempo que le tomara al agua en llegar a la temperatura de 46.1°C producto de una disminución de energía durante el tratamiento del mango; como ya se ha mencionado antes ,es esta la temperatura a la cual se deberá mantener el agua ,para lo cual se creyó conveniente regular dicha temperatura por medio del control de serpentín ,en el cual se definirá un set point en su temperatura de 46.1°C ,dato que será registrado por los sensores de temperatura y cuya medición con este nuevo set point comenzará una vez transcurrido en un periodo de tiempo desde la inmersión del mango.

3.1.3.2 Modelamiento mango-agua. Para este modelamiento se asumirá una convección forzada entre el agua y el mango, el cual, para efectos de modelado, se le asignó una geometría esférica. El primer paso a llevar en cuenta es el cálculo del número de Nusselt

el mismo que servirá más adelante para la obtención del coeficiente de convección entre los 2 subsistemas. Usando la siguiente expresión:

$$\mathrm{Nu_{esf}} = 2 + \left[0.4 * \mathrm{Re}^{0.5} + 0.06 * \mathrm{Re}^{\left(\frac{2}{3}\right)}\right] * \mathrm{Pr}^{0.4} * \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_s}\right)^{0.25}$$

Luego este cálculo, se obtiene el coeficiente de convección para después calcular la transferencia de calor mediante la ley de enfriamiento de Newton.

$$\mathrm{Nu_{esf}} = \frac{\mathrm{h} * \mathrm{D}}{\mathrm{k}}$$

Se procede a obtener las propiedades del mango que utilizaremos para nuestros cálculos, estas propiedades se evaluarán para una temperatura $\mathrm{T}_\infty = 46.1$:

$$\mathrm{k} = 0.63854 \mathrm{W/m.K}$$

$$\mathrm{Cp} = 3\,240\ \mathrm{J/kg}$$

$$\mu = 0.58522\mathrm{x}10^{-3} \mathrm{Kg/m.s}$$

$$\mathrm{Pr} = 3.8309$$

$$\mathrm{v} = 5.87\mathrm{x}10^{-7} \mathrm{m^2/s}$$

Ahora se calcula la viscosidad dinámica para una temperatura de la capa límite del mango:

$$\mu_s = 1.2225 * \frac{10^{-3}\mathrm{kg}}{\mathrm{m} * \mathrm{s}}$$

Ahora se calcula el número de Reynolds, usando una velocidad de los agitadores de $0.3\mathrm{m/s}$. El radio de la esfera es de $0.05\mathrm{m}$, correspondientes para una masa aproximada de 650 gr.

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{V} * \mathrm{D}}{\mathrm{v}} = \frac{0.3 * (0.1)}{5.87\mathrm{x}10^{-7}} = 51107.325$$

$$\mathrm{Re} = 51107.325 < 2 * 10^5 \rightarrow \text{Flujo Laminar}$$

$$\mathrm{Nu_{esf}} = 2 + \left[0.4 * 51107.325^{0.5} + 0.06 * 51107.325^{\left(\frac{2}{3}\right)}\right] * 3.8309^{0.4} * \left(\frac{0.58522}{1.2225}\right)^{0.25} = 248.337$$

$$248.337 = \frac{h * (0.1)}{0.63852} \rightarrow h = 1586 \frac{W}{m^2 * K}$$

Ahora una vez obtenida el valor del coeficiente de convección para una velocidad promedio de 0.3 m/s, determinaremos la temperatura en el centro del mango mediante un análisis de régimen transitorio. Aplicando los datos del mango como:

$$Lc = \frac{0.1m}{2} = 0.05m \rightarrow k = \frac{0.63854W}{m^2 * C} \rightarrow \alpha = 1.5065 * \frac{10^{-7} m^2}{s}$$

Se calcula el número de Biot:

$$Bi = \frac{h * Lc}{k} = \frac{1586 * 0.05}{0.63854} = 124.1647$$

$$Bi \rightarrow A1 = 1.999 \rightarrow \lambda 1 = 3.116$$

Calculamos el número de Fourier:

$$\tau = \frac{\alpha * t}{Lc^2} = \frac{1.5065 * 10^{-7} * t}{0.05^2} = 6{,}026 * 10^{-5} * t$$

Se deja expresado el número de Fourier en función del tiempo para dejar una función para después poder simular y obtener el comportamiento de la temperatura. Ahora se calcula la temperatura adimensional.

$$\theta_{0,esf} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A1 * e^{-\lambda 1^2 * \tau}$$

$$\theta_{0,esf} = 1.999 * e^{-5{,}851 * 10^{-4} t} = \frac{T_0 - 47{,}8}{21{,}1 - 47{,}8}$$

$$T_0 = 47{,}8 - 53{,}373 * e^{-5{,}851 * 10^{-4} t}$$

Para un tiempo igual a 95 minutos que es lo que dura el tratamiento hidrotérmico, obtenemos una temperatura en el centro del mango de:

$$T_0 = 47{,}8 - 53{,}373 * e^{-5{,}851 * 10^{-4} (5700)} = 45.16\ °C$$

Se ve que para el tiempo que dura el tratamiento llega a la temperatura pedida por protocolo, del cual se obtiene un sistema eficiente.

Ahora se calcula la transferencia de calor mediante el enfriamiento de Newton.

$$\dot{Q} = h * A_s(T_\infty - T_s)$$

$$\dot{Q} = 1586 * 4\pi * 0.05^2(47 - 21.1) = 1290.484\ W$$

Ahora se calculará el calor transferido del agua para un mango, cuya masa es de 0.65 kg y calor específico de 3240 $\frac{J}{kg*k}$.

$$Q = mCe(T_f - Ti)$$

$$Q = 0.650 * 3240(46.12 - 21.1)$$

$$Q = 52692.12J$$

Finalmente se calcula el tiempo transcurrido para que la temperatura del agua alcance los 46.1°C desde la inmersión del mango, tenemos.

$$\Delta t = \frac{52692.12\ J}{1290.484\ J/S}$$

$$\Delta t = 40.83seg = 2.4842min$$

Este es el tiempo en la cual se ha podido alcanzar la temperatura deseada, cabe resaltar que una vez transcurrido este periodo de tiempo se deberá mantener la temperatura constante, para lo cual se tendrá que tener un control de su temperatura promedio por el uso de sensores previamente acoplados, los cuales ayudara con el accionamiento del serpentín.

El mango alcanza la temperatura indicada, por orden de protocolo se de mantener así hasta los 90 minutos para obtener un mango de calidad, pero en un tiempo regular la transferencia de calor de hace cero ya que alcanzó su equilibrio térmico con el agua.

Una vez acabado este análisis, ahora se varía el tamaño del radio del mango teniendo en cuenta el peso, para ello hemos elegido un peso máximo de 750gr el cual le corresponde una radio de 5.1cm.

$$Re = \frac{V * D}{v} = \frac{0.3 * (0.102)}{5.87x10^{-7}} = 52129.472$$

$$\mathrm{Re} = 52129.472 < 2 * 10^5 \rightarrow \text{Flujo Laminar}$$

$$\mathrm{Nu_{esf}} = 2 + \left[0.4 * 52129.472^{0.5} + 0.06 * 52129.472^{\left(\frac{2}{3}\right)}\right] * 3.8309^{0.4} * \left(\frac{0.58522}{1.2225}\right)^{0.25} = 251.181$$

$$251.181 = \frac{\mathrm{h} * (0.102)}{0.63852} \rightarrow \mathrm{h} = 1572.393 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 * \mathrm{K}}$$

Una vez calculado este coeficiente de convección para una velocidad de 0.3m/s y un radio de 5.1cm, procederemos analizar la temperatura del mango en el centro mediante un análisis en estado transitorio.

$$\mathrm{Lc} = \frac{0.102\mathrm{m}}{2} = 0.051\mathrm{m} \rightarrow \mathrm{k} = \frac{0.63854\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 * \mathrm{C}} \rightarrow \alpha = 1.5065 * \frac{10^{-7}\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

Cálculo de número de Biot:

$$\mathrm{Bi} = \frac{\mathrm{h} * \mathrm{Lc}}{\mathrm{k}} = \frac{1572.393 * 0.051}{0.63854} = 125.586$$

$$\mathrm{Bi} \rightarrow \mathrm{A1} = 2 \rightarrow \lambda 1 = 3.117$$

Cálculo de número de Fourier:

$$\tau = \frac{\alpha * \mathrm{t}}{\mathrm{Lc}^2} = \frac{1.5065 * 10^{-7} * \mathrm{t}}{0.051^2} = 5.792 * 10^{-5} * \mathrm{t}$$

$$\theta_{0,\mathrm{esf}} = \frac{\mathrm{T_0} - \mathrm{T_\infty}}{\mathrm{T_i} - \mathrm{T_\infty}} = \mathrm{A1} * \mathrm{e}^{-\lambda 1^2 * \tau}$$

$$\theta_{0,\mathrm{esf}} = 2 * \mathrm{e}^{-5{,}62733 * 10^{-4}\mathrm{t}} = \frac{\mathrm{T_0} - 47{,}8}{21{,}1 - 47{,}8}$$

$$\mathrm{T_0} = 47{,}8 - 53{,}4 * \mathrm{e}^{-5{,}62733 * 10^{-4}\mathrm{t}}$$

Para un tiempo igual a 95 minutos que es lo que dura el tratamiento hidrotérmico, se obtiene una temperatura en el centro del mango de:

$$\mathrm{T_0} = 47{,}8 - 53{,}4 * \mathrm{e}^{-5{,}62733 * 10^{-4}(5700)} = 44.9\ ^\circ\mathrm{C}$$

Ahora se calcula la transferencia de calor mediante el enfriamiento de Newton.

$$\dot{Q} = h * A_s(T_\propto - T_s)$$
$$\dot{Q} = 1572.393 * 4\pi * 0.051^2(47 - 21.1) = 1331.0224$$

Ahora se calcula el calor transferido del agua para un mango, usando una masa del mango de 0.75 kg como máximo y calor específico de 3240 $\frac{J}{kg*k}$

$$Q = mCe(T_f - Ti)$$

$$Q = 0.750 * 3240(46.1 - 21.1)$$

$$Q = 60750J$$

Finalmente se calcula el tiempo transcurrido para que la temperatura del agua alcance los 46.1°C desde la inmersión del mango, tenemos.

$$\Delta t = \frac{60750\ J}{1331.0224\ J/S}$$

$$\Delta t = 45.6416seg = 0.7607min$$

3.1.3.3 Modelamiento Agua-Agitador. Establecer el equilibrio térmico entre 2 fluidos. En este caso se establecerá equilibrio térmico en el agua de nuestro tanque para el tratamiento hidrotérmico. Se sabe que el proceso de agitación mejora cuando aumenta la turbulencia del fluido, incrementando la transferencia de calor por conducción en toda el agua, así como también, dota de una velocidad al agua para así propiciar la trasferencia de calor por convección entre el agua el mango.

El trabajo del agitador es uno de los más importantes, ya que nos ayudara a mejorar la transferencia de energía térmica en todo nuestro proceso, así pues, sin la presencia de este dispositivo, solo se tendría una transferencia de calor por conducción (primeramente, entre serpentín agua y luego entre agua mango). Otro aporte muy especial del agitador en nuestro proceso, es el de ayudar a mantener una temperatura casi uniforme en todo el tanque, lo cual nos ayudará a obtener una temperatura final de mango en el menor tiempo posible sin mayores problemas.

Es así como podemos definir el trabajo del agitador en 2 etapas de funcionamiento:

- 1° etapa: Sin carga

Es aquí cuando no hay presencia de mangos, y cuando el agitador es accionado para ayudar a acelerar la conducción de calor en el agua debido al calor proporcionado por el serpentín.

- 2° etapa: Con carga

Es aquí cuando se ingresa la carga de mangos para su tratamiento. En esta etapa, los agitadores tendrán la función de incrementar la transferencia de calor en nuestro sistema para lograr un intercambio energía entre el agua y el mango más óptimo, de esta forma se logrará llegar con mayor rapidez a la temperatura óptima para el tratamiento en menor tiempo. Cabe resaltar que, para esta clase de usos, es recomendado el uso de placas deflectoras, las mismas que nos ayudaran a mejorar el nivel de turbulencia en nuestro sistema.

- Aspectos a tomar en cuenta:

Si bien es cierto, los agitadores mejoran la transferencia de calor en nuestro proceso, esto debido a que aumentan el nivel de turbulencia del agua lo cual está relacionado al aumento del número de Reynolds por la velocidad; habrá que tomar en cuenta que mientras mayor sea la velocidad proporcionada por el agitador, mayor será el consumo de potencia del mismo, lo cual implicara mayores gastos económicos.

- Consumo de potencia en agitadores:

Para estimar el cálculo de potencia del agitador se puede hacer uso de la siguiente ecuación, la misma que muestra el número de potencia en función del número de Reynolds, la velocidad de rotación y demás números adimensionales que dependen de los rasgos geométricos del agitador y del aspecto de placas deflectoras.

$$NP = C(NRe)X(NFr)Y$$

Np =N° Potencia

NRe =N° Reynolds

NFr = N° Froude

3.2 Interpretación de los Resultados Obtenidos

3.2.1 Interpretación de los Resultados del Modelamiento Serpentín - Agua

Primera etapa- Calentamiento sin carga:

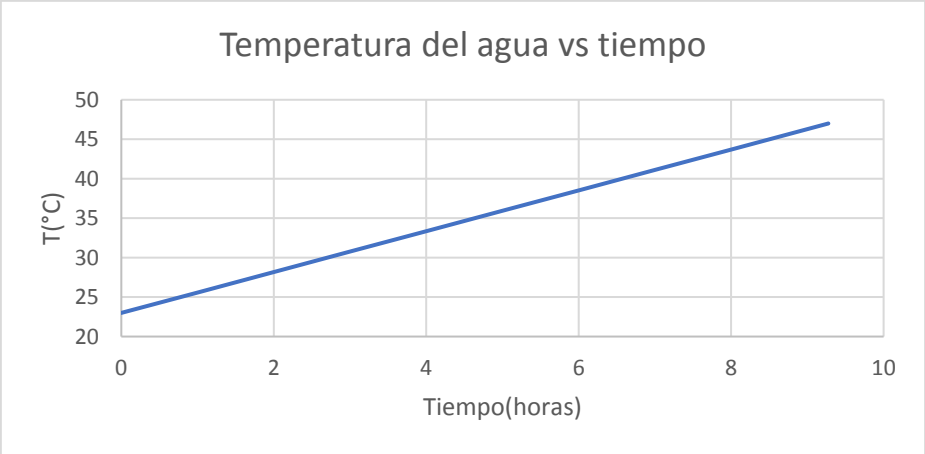


Figura 18.Gráfica de la temperatura del agua en función del tiempo - sin carga de mangos.
Fuente: Elaboración propia - Excel

De la gráfica se puede observar el incremento de la temperatura del agua total dentro del tanque, hasta llegar a la temperatura límite indicada de 47 °C, el agua estando en una temperatura inicial de 23°C obteniendo así un tiempo de 9.2765 horas hasta que el agua esté a la temperatura idónea para empezar el proceso hidrotérmico.

Segunda etapa- Calentamiento con carga:

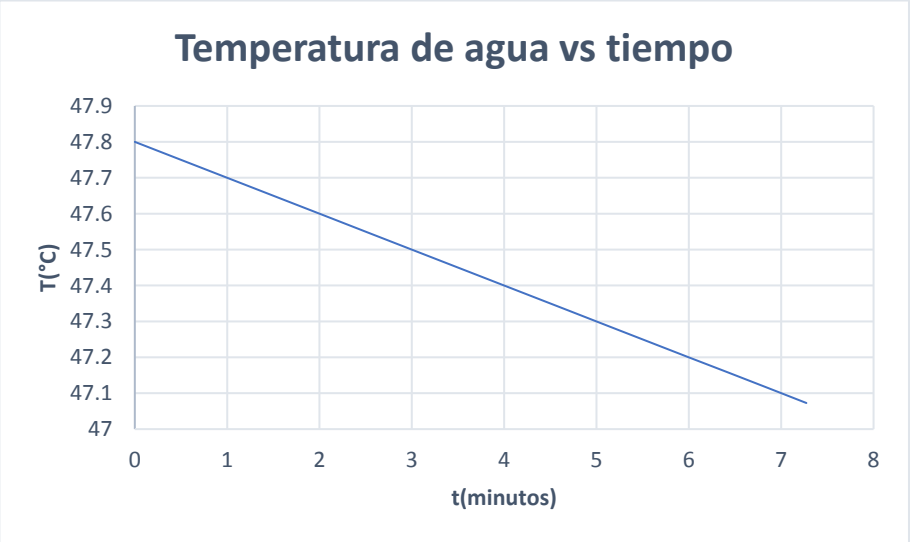


Figura 19. Gráfica de la temperatura del agua en función del tiempo - con carga de mangos.
Fuente: Elaboración propia - Excel

Esta gráfica nos muestra el tiempo en que tardará en disminuir la temperatura del agua debido a que los mangos ya están sumergidos, los cuales tienen una temperatura de 21.1°C habiendo así un intercambio de calor entre el agua y los mangos, con lo cual la perdida de calor del agua hasta que llegue a la temperatura de 46.1 donde debe permanecer constante será de 13.55 min.

3.2.2 Interpretación de los Resultados del Modelamiento Agua - Mango

Relación entre la transferencia de calor vs velocidad:

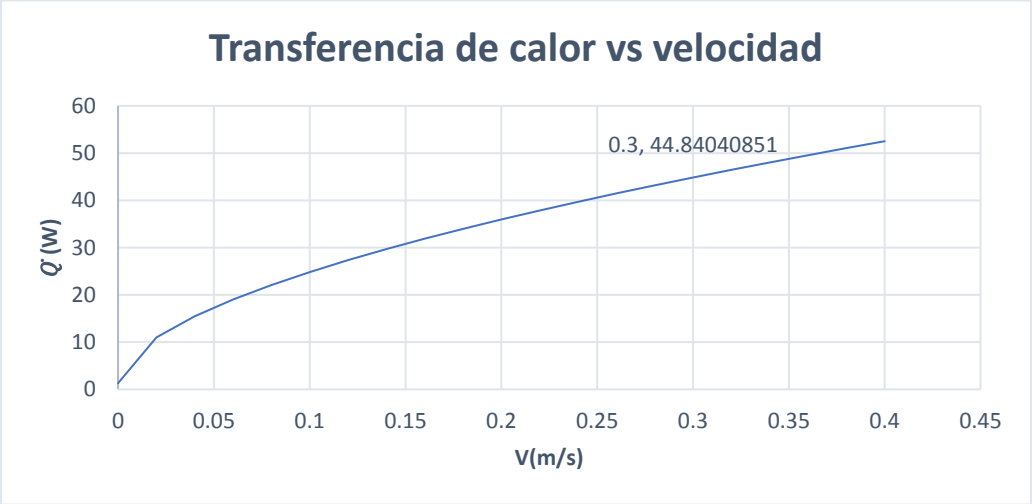


Figura 20. Gráfica de la transferencia de calor vs velocidad
Fuente: Elaboración propia - Excel

Como se logra observar en la siguiente gráfica, se muestra la relación entre la transferencia de calor y la velocidad, la misma que indica la relación antes expuesta, en donde a mayor velocidad del fluido, mayor o mejor será la transferencia de calor en nuestro proceso. Este es un factor a tomar mucho en cuenta, ya que, si bien es cierto, a mayor velocidad mejor será la transferencia de calor hacia el mango, se deberá atender al hecho de que este comportamiento requerirá un mayor consumo de potencia de nuestros agitadores, los mismos que serán los encargados de aumentar la velocidad del agua para aumentar el proceso de transferencia de calor.

A continuación, se modela el comportamiento de la temperatura en el centro del mango en función del tiempo, para lo cual se hizo uso del programa EES desarrollado durante el curso.

Relación entre la temperatura en el centro del mango vs el tiempo:

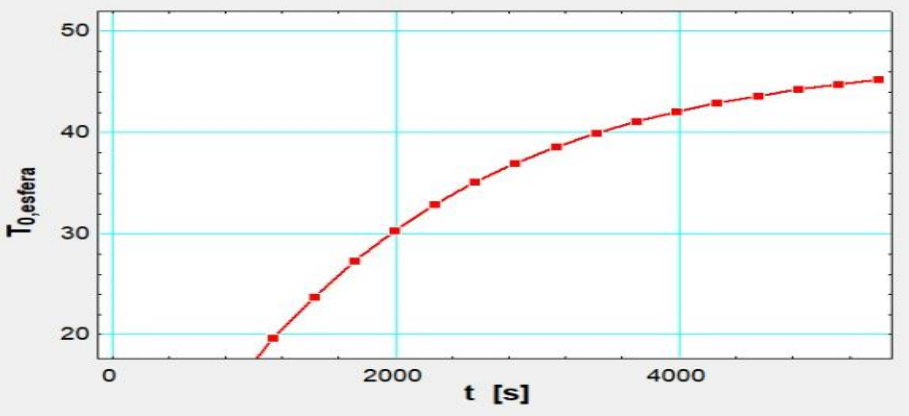


Figura 21.Gráfica de la temperatura en el centro del mango vs el tiempo
Fuente: Elaboración propia - EES

Según se puede observar en la presente gráfica, la temperatura alcanzará un estado estacionario en un tiempo aproximado de 95 minutos, ya que es en este tiempo en que la trasferencia de calor se hace nula, determinando que nuestro mango se encuentra en una temperatura de equilibrio con el agua. Este valor de temperatura será el requerido para su exportación, asimismo, se hace recuerdo que si se supera dicho valor de temperatura, significaría un riesgo para la integridad del mango mismo, afectando sus propiedades y por ende su calidad, por ende, será necesario que este proceso involucre la participación de un sistema de control adecuado y el registro de la temperatura mediante el uso de sensores térmicos que me indiquen en tiempo real el buen estado del proceso.

Relación entre el diámetro del mango con el coeficiente de convección:

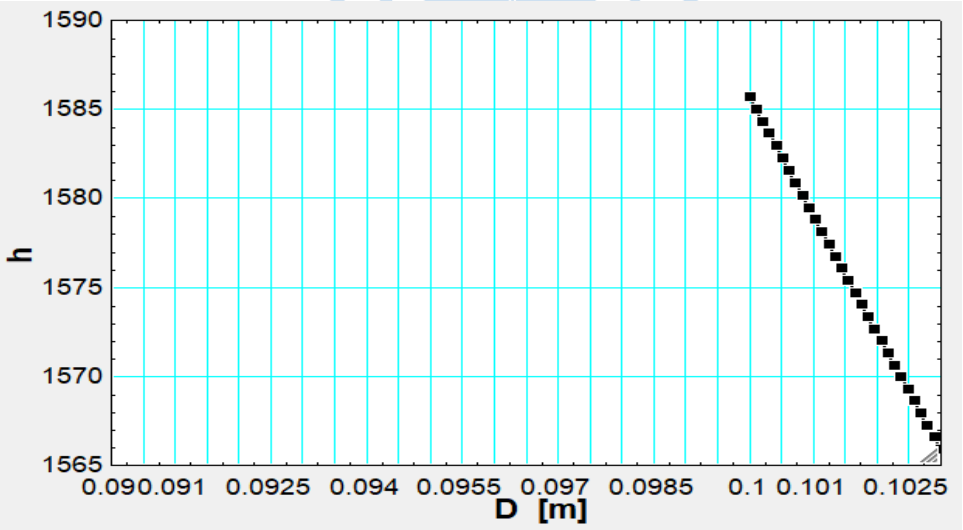


Figura 22. Gráfica del coeficiente de convección vs diámetro del mango

Fuente: Elaboración propia - ESS

Relación entre el diámetro del mango con su temperatura interna:

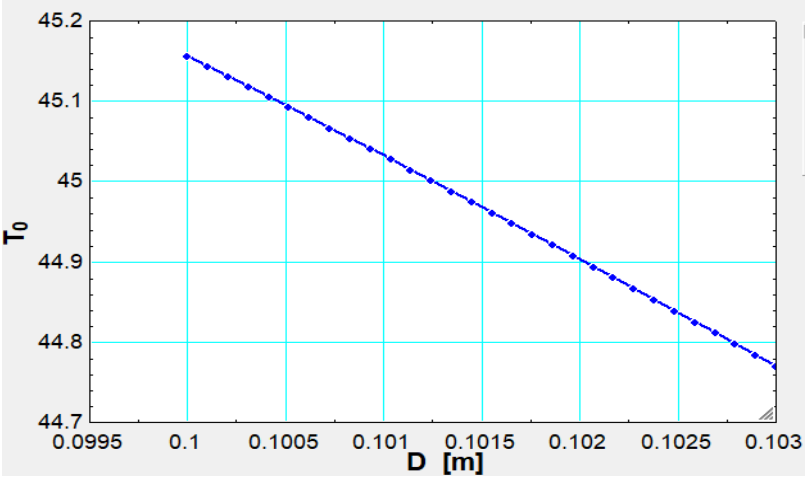


Figura 23. Gráfica de temperatura en el centro vs diámetro del mango

Fuente: Elaboración propia - ESS

3.2.3 Interpretación de los Resultados del Modelamiento Agitador - Agua

La relación entre el coeficiente de convección y la velocidad del agua:

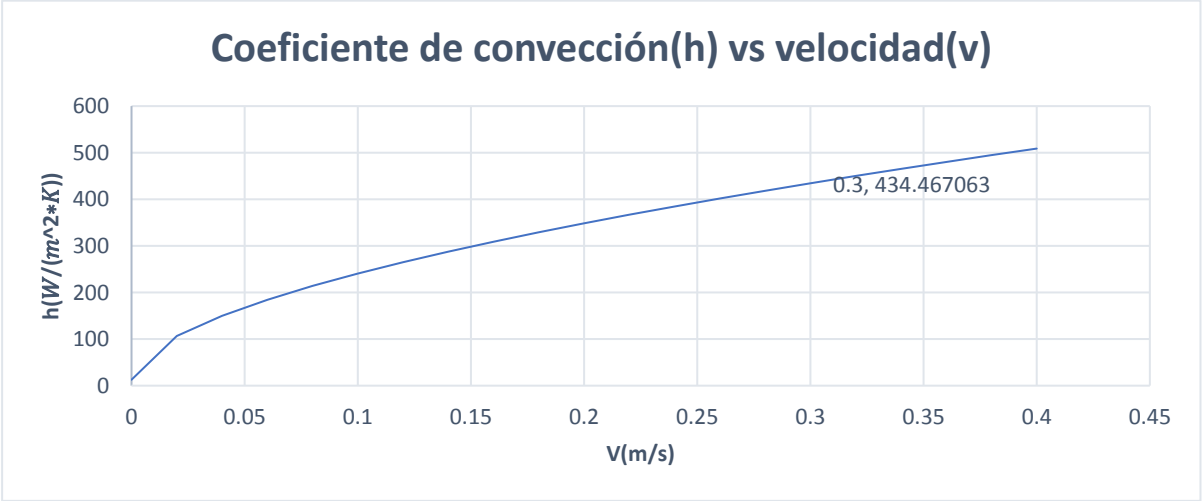


Figura 24.Gráfica de coeficiente de convección vs velocidad

Fuente: Elaboración propia - Excel

La presente grafica muestra la relación existente entre el coeficiente de convección y la velocidad del fluido, por la cual podemos corroborar la disposición de proporcionalidad que existe entre estas 2 magnitudes, ya que ,como se sabe, la velocidad del fluido influirá en el nivel de turbulencia del fluido, siendo así que ,a mayor velocidad ,mayor será la turbulencia en este debido a la elevación del número de Reynolds .De esta forma ,podremos decir que la transferencia de calor también se verá favorecida y con ello el coeficiente de convección del agua ,ya que ,tanto el valor de la velocidad y el valor del coeficiente de convección ,favorecerán la transferencia de calor de nuestro proceso.

Conclusiones

- Cuando la temperatura del agua alcanza los 46.1°C con tiempo 13 minutos desde la inmersión del mango, se deberá mantener la temperatura constante, así hasta los 90 minutos para obtener un mango de calidad.
- El proceso consta de dos tipos de intercambio de calor, el primero es por convección específicamente convección forzada ya que el agua estará en movimiento el cual será producido por los agitadores, esto es así debido a que para que haya una mayor transferencia de calor el coeficiente de transferencia por convección tiene que ser mayor y esto se logra aumentando el flujo del fluido que en nuestro caso es agua.
- El segundo tipo es transferencia de calor por conducción esto se da en el interior del mango y entre los mangos que se encuentren en contacto, durante el tratamiento hidrotérmico, la transferencia de calor será más lenta que la identificada en convección.
- Hay una velocidad límite para la cual el tratamiento hidrotérmico sea eficiente, esto es debido a que cuanto mayor sea la velocidad el tiempo que reduce para llegar a la temperatura indicada por el protocolo no disminuirá, y si seguimos intentando aumentar la velocidad esto no será optimo debido a que el gasto de potencia de los agitadores no equivaldrá al beneficio del poco tiempo ganado.
- Una vez elevada la temperatura del tanque de agua a 47°C se debe asegurar que esta no baje de 46.1 que es la temperatura para el cual el protocolo pide que los mangos lleguen, si baja de esta temperatura el proceso se considera incompleto y se rechaza los mangos en este tratamiento originando perdidas.
- El sistema serpentín agua sufre dos procesos, el primero es aumentar la temperatura del agua dentro del tanque hasta la temperatura de 47°C y el segundo después de la inmersión de los mangos con lo cual asegurarnos con un sistema automático que mantenga las temperaturas ideales del tratamiento.

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Referencias bibliográficas

Báez, M., Crisosto, G. M., Contreras, R., Wilkins, K., & Crisosto, C. H. (s. f.). *Entendiendo el Rol de la Madurez Fisiológica y las Condiciones de Envío en la Calidad de Llegada del Mango*. 24.

"El tratamiento hidrotérmico del mango piurano no se ha optimizado". (2015, enero 21). UDEP Hoy | Universidad de Piura. http://udep.edu.pe/hoy/2015/el-tratamiento-hidrotermico-del-mango-piurano-no-se-ha-optimizado/

Elder, M. O., Daniel, M. A., & Daniel, C. M. (s. f.). *ANÁLISIS NUMÉRICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO DEL SISTEMA JABA/MANGOS UTILIZADO EN EL TRATAMIENTO HIDROTÉRMICO DEL MANGO*. 28.

elEconomista.es. (s. f.). *Adex: Exportación genera 833,385 trabajos - eleconomistaamerica.pe*. Recuperado 10 de mayo de 2020, de https://www.eleconomistaamerica.pe/economia-eAm-peru/noticias/8446773/06/17/Adex-Exportacion-genera-833385-trabajos.html

Ficha Comercial. (s. f.). Recuperado 10 de mayo de 2020, de http://www.siicex.gob.pe/siicex/portal5ES.asp?_page_=172.17100&_portletid_=sfichaproductoinit&scriptdo=cc_fp_init&pproducto=118&pnomproducto=Mango

Mangofrost. (2012, junio 26). Mangofrost: Bibliografia. *Mangofrost*. http://mangofrost.blogspot.com/2012/06/bibliografia.html

Marcelo, D., Castro, D., La Madrid Olivares, R., & Mendoza Orbegoso, E. (2016, noviembre 14). *Análisis numérico de transferencia de calor en estado transitorio del sistema jaba/mango utilizando en el tratamiento hidrotérmico del mango*.

Ministerio de Agricultura y Riego—MINAGRI. (s. f.). Recuperado 10 de mayo de 2020, de https://www.gob.pe/minagri

Monroe, C., & Daniel, C. (2017). Estudio numérico del comportamiento termofluídico de equipos de tratamiento hidrotérmico del mango. *Universidad de Piura*. https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2983

Peña, J. E. (2013). *Potential Invasive Pests of Agricultural Crops*. CABI.

Perú exportó volumen récord de mango fresco en campaña 2019/2020 | Economía | Gestión. (s. f.). Recuperado 9 de mayo de 2020, de https://gestion.pe/economia/peru-exporto-volumen-record-de-mango-fresco-en-campana-20192020-noticia/?ref=gesr

Saavedra, D. F., & Giuseppe, L. (2018a). Estudio y optimización del modo de control del proceso de tratamiento hidrotérmico para mangos. *Universidad de Piura*. https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3519

Saavedra, D. F., & Giuseppe, L. (2018b). Estudio y optimización del modo de control del proceso de tratamiento hidrotérmico para mangos. *Universidad de Piura*. https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3519

SENASACONTIGO. (2017, abril 17). Agrodata: Perú incrementa sus exportaciones de mango. *SENASA al día*. https://www.senasa.gob.pe/senasacontigo/peru-incrementa-sus-exportaciones-de-mango/

Valderrama, Á. M. V., & Arenas, R. L. S. (2008). Utilización de microondas en el tratamiento de jugo de mango. *Revista Lasallista de investigación*, *5*(2), 13-19.

Viera, M., & Jason, J. (2016). Análisis y propuesta de mejora del tratamiento hidrotérmico del mango en el Perú. *Universidad de Piura*. https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2574

Yahia, E. M. (2009). *Modified and Controlled Atmospheres for the Storage, Transportation, and Packaging of Horticultural Commodities*. CRC Press.

Apéndice

UNIVERSITAS STUDIORUM PIURENSIS

Apéndice A: Código para la obtención de la temperatura en el centro del mango - EES:

```
$UnitSystem SI Pa W J kg Rad

"Datos"

D_esfera=0.1[m]

T_i=21.1[C]

k=0.63854[W/m-C]

alpha=1.5*10^(-7)[m^2/s]

T_infinity=47.8[C]

h_conv=434.467063[W/m^2-C]

"t=90[min]*convert(min,s)"

"Esfera"

r_0_esfera=D_esfera/2

Bi_esfera=h_conv*r_0_esfera/k

Tau_esfera=alpha*t/r_0_esfera^2

Lambda_esfera=interpolate('Sphere','Zeta[1]','Bi',Bi=Bi_esfera)

A_esfera=(4*(sin(Lambda_esfera)-
(Lambda_esfera)cos(Lambda_esfera)))/(2(Lambda_esfera)-sin(2*Lambda_esfera))
"Calculo del coeficiente A"

Theta_0_esfera=(T_0_esfera-T_infinity)/(T_i-T_infinity)

Theta_0_esfera=A_esfera*exp(-(Lambda_esfera^2)*(Tau_esfera))

"Calculo de la transferencia de calor"

Q_dot=h_conv*A*(-T_0_esfera+T_infinity)

A=4*pi*r_0_esfera^2
```