



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO TERMOFLUÍDICO DE EQUIPOS DE TRATAMIENTO HIDROTÉRMICO DEL MANGO

Carlos Castro-Monroe

Lima, mayo de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Castro, C. (2017). *Estudio numérico del comportamiento termofluídico de equipos de tratamiento hidrotérmico del mango* (Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánico-Eléctrica). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.

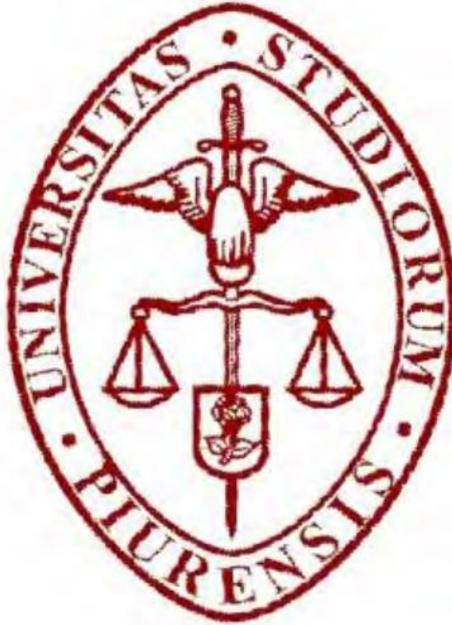


Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



“Estudio numérico del comportamiento termofluídico de equipos de tratamiento hidrotérmico del mango”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico – Eléctrico

Carlos Daniel Castro Monroe

Asesor: Dr. Ing. Rafael Saavedra García Zabaleta

Piura, Mayo 2017

*A mis padres, Mary Ann y Carlos, por su amor y paciencia
incondicional desde el 23 de noviembre de 1993.*

A mis hermanos, Mariana y Sergio, por ser motivación y ejemplo.

“Showing gratitude is one of the simplest yet most powerful things humans can do for each other”
— **Randy Pausch, *The Last Lecture***

Prólogo

La mecánica de fluidos es una rama de las ciencias muy importante pues la mayoría de procesos industriales y agrícolas tienen líquidos y gases como agentes principales del proceso. Conocer el comportamiento fluidodinámico de estas sustancias y describirlo por medio de ecuaciones, permite predecir los fenómenos de transporte de sus propiedades y el impacto que pueden tener de manera económica y ambiental para una industria.

Un modelo numérico-computacional elaborado por software, permite resolver, en forma aproximada, el sistema de ecuaciones de transporte obteniendo resultados confiables. Además, tiene grandes ventajas, el evaluar el funcionamiento de un equipo o proceso de manera virtual, sin la necesidad de construirlo o de efectuar cambios. En el caso que ya existiese permite reducir costos y aumenta la flexibilidad frente a los cambios imprevistos.

La industria agrícola en la región norte del Perú utiliza equipos para varios procesos de distinta naturaleza. En el caso del tratamiento hidrotérmico del mango, se encontraron oportunidades de mejora, en este sentido, la presente investigación tiene una aplicación directa.

La tesis da a la luz conclusiones que de forma analítica serían inviables de obtener por lo que se recurrió a la elaboración de un modelo numérico-computacional con el software Ansys CFX 17.0.

Finalmente, expreso mi agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible este trabajo. A mi familia por la paciencia infinita y por aquellas veces que me alentaron a seguir adelante. A Shayuri, que siempre me supo apoyar y entender en todo momento. A José, Franco, Dino y Enrique, por aquellas veces que me ayudaron a colocar los pies en la tierra. Me gustaría agradecer también a mi asesor, el Dr. Rafael Saavedra García Zabaleta por su paciencia, sus consejos y su tiempo para ayudarme a darle forma a esta tesis. Al Dr. Elder Mendoza Orbegoso, por su tiempo y dedicación y que, sin sus conocimientos, nunca hubiera logrado terminar este trabajo. A los ingenieros del Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura, por su amistad y tiempo. Por último, un profundo agradecimiento al proyecto “Mejoras innovadoras de los equipos de tratamiento hidrotérmico del mango que cumplen con los protocolos fitosanitarios de exportación a los mercados de Japón y Estados Unidos en el valle de San Lorenzo-Piura” bajo el convenio de subvención “N° 127-2015-FONDECYT”, por hacer posible este trabajo.

Resumen

La tesis presenta el desarrollo de un modelo numérico simplificado para describir el funcionamiento de un prototipo de tanque “híbrido” para el tratamiento hidrotérmico del mango. Además, los resultados se han confrontado con datos analíticos de un modelo de esfera fría bañado por un flujo convectivo de agua caliente bajo las mismas condiciones iniciales del proceso hidrotérmico, y también datos experimentales con el fin de validar el modelo. Como resultados experimentales se utilizaron los obtenidos en las mediciones realizadas en la empresa Biofruit en el distrito de Tambogrande, Piura.

El proceso térmico y fluidodinámico del tratamiento hidrotérmico del mango se estudia con la finalidad de determinar criterios que optimicen el proceso de satisfacer los protocolos de Estados Unidos y Japón de manera simultánea en el prototipo de tanque “híbrido”. Se realizó un análisis numérico por medio del software Ansys CFX 17.0, para un sistema simplificado que representa el proceso real.

En el presente trabajo de investigación, se muestran los modelos matemáticos utilizados y se hace una descripción de la metodología de desarrollo de la dinámica de fluidos computacional. Se muestra la realización de la malla y las condiciones de frontera utilizadas. Se simula el modelo computacional y por medio de gráficas se comparan distintos casos de velocidades del agua y se confronta el modelo numérico con el analítico de la esfera fría.

Índice

Prólogo.....	v
Resumen	vii
Índice	ix
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xiii
Introducción.....	1
Capítulo 1 Fundamentos teóricos	3
1.1. Fundamentos de mecánica de fluidos y transferencia de calor.....	3
1.1.1. Ecuación de conservación de la masa	3
1.1.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.....	3
1.1.3. Ecuación de conservación de la energía.....	4
1.1.4. Modelo de turbulencia “k-épsilon Standard”	4
1.1.5. Ley de Fourier de la conducción	5
1.1.6. Ley de enfriamiento de Newton	5
1.1.7. Número de Reynolds	5
1.1.8. Número de Prandtl	6
1.1.9. Número de Nusselt	6
1.1.10. Número de Biot	6
1.1.11. Número de Fourier	6
1.1.12. Correlación de transferencia de calor sobre superficies esféricas.....	7
1.1.13. Modelo matemático de conducción transitoria en una esfera	7
1.2. Fundamentos de dinámica computacional de fluidos	12
1.2.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	12
1.2.2. Metodología general en CFD	13
Capítulo 2 Proceso hidrotérmico del mango	15
2.1. Tratamiento hidrotérmico del mango.....	15
2.2. Protocolo de tratamiento hidrotérmico	20
2.2.1. Protocolos de EE.UU y de Japón	21
2.2.2. Unificación de protocolos de exportación para la mejora industrial	22
2.3. Diseño de tanque híbrido – dual para el tratamiento hidrotérmico.....	23
Capítulo 3 Metodología numérica y mediciones experimentales.....	27
3.1. Metodología numérica del sistema jaba/mango simplificado.....	27
3.1.1. Hipótesis de los casos longitudinal y transversal en estado estacionario.....	27

3.1.2. Hipótesis de los casos longitudinal y transversal en estado transitorio.....	27
3.1.3. Construcción de la geometría.....	28
3.1.4. Mallado.....	30
3.1.5. Configuración del problema.....	32
3.2. Metodología experimental	36
3.2.1. Ensayo experimental	37
Capítulo 4 Resultados y discusiones	39
4.1. Resultados numéricos del sistema jaba/mango simplificado en estado estacionario	39
4.1.1. Análisis y descripción de parámetros del caso longitudinal	39
4.1.2. Análisis y descripción de parámetros del caso transversal	43
4.1.3. Análisis paramétrico y comparativo de los casos longitudinal y transversal	46
4.2. Resultados numéricos del sistema jaba/mango en estado transitorio	53
4.2.1. Análisis de transferencia de calor.....	53
4.2.2. Análisis comparativo de transferencia de calor de una esfera fría sometida a una corriente de agua caliente bajo las mismas condiciones iniciales definidas para el proceso hidrotérmico.....	59
Conclusiones.....	69
Bibliografía.....	71
Anexo A.....	73
Anexo B.....	75

Índice de figuras

Figura 1.1. Discretización del dominio computacional en volúmenes de control.....	13
Figura 2. 1. Vista isométrica del tanque “híbrido” de tratamiento hidrotérmico	16
Figura 2. 2. Tanque rectangular del equipo “híbrido” de tratamiento hidrotérmico.	17
Figura 2. 3. Serpentes para intercambio de calor.	17
Figura 2. 4. Agitadores	18
Figura 2. 5 Colocación de los mangos en jabas.....	18
Figura 2. 6. Canasta para jabas de mangos.....	19
Figura 2. 7. Colocación de las jabas en la canasta de izaje	19
Figura 2. 8. La canasta se eleva por una grúa y se desplaza hacia el tanque.....	20
Figura 2. 9. La canasta se sumerge en el agua contenida por el tanque.	20
Figura 2. 10. Diseño de tina de tratamiento hidrotérmico	24
Figura 2. 11. Diseño de canasta de izaje.....	25
Figura 3. 1. Geometría del mango.	28
Figura 3. 2. Cotas principales de la geometría del mango.....	29
Figura 3. 3. Geometría de la jaba y sus respectiva cotas principales.	29
Figura 3. 4. Vista frontal de la geometría de la jaba.....	30
Figura 3. 5. Sistema jaba/mangos simplificado.....	30
Figura 3. 6. Malla de la geometría del sistema jaba/mango simplificado.	31
Figura 3. 7. Corte en sección de la malla.....	31
Figura 3. 8. Vista de la sección de corte en la malla.	32
Figura 3. 9. Caso longitudinal. Condiciones de frontera.	33
Figura 3. 10. Caso longitudinal. Condiciones de frontera.	34
Figura 3. 11. Caso transversal. Condiciones de frontera.	34
Figura 3. 12. Caso transversal. Condiciones de frontera.	35
Figura 3. 13. Para ambos casos longitudinal y transversal. Condiciones de frontera. ...	35
Figura 3. 14. Colocación de RTD en el interior del mango.....	37
Figura 3. 15. Cables de transmisión de las RTD's al PLC.	38
Figura 4. 1. Caso longitudinal..	39
Figura 4. 2. Plano de corte medio en dirección paralela al flujo.	40
Figura 4. 3. Contorno de temperatura a la salida del sistema..	40
Figura 4. 4. Isothermas en la sección de salida del sistema jaba/mango simplificado en el caso longitudinal.....	41
Figura 4. 5. Contorno de presiones distribuido en el plano medio de corte.	42
Figura 4. 6. Distribución espacial de la componente X de la velocidad.....	42
Figura 4. 7. Caso transversal..	43
Figura 4. 8. Plano de corte la sección media de la jaba paralelo a la dirección del flujo	43
Figura 4. 9. Isothermas en la sección de salida del sistema jaba/mango simplificado en el caso transversal.....	44
Figura 4. 10. Contorno de presiones distribuido espacialmente.....	44
Figura 4. 11. Contorno de la componente Z de la velocidad.	45
Figura 4. 12. Líneas de corriente en el plano medio de corte.....	45

Figura 4. 13. Coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio [W/m^2K] en función de la velocidad de corriente libre del agua [m/s]. Comparación de casos longitudinal y transversal.....	48
Figura 4. 14. Valores del número de Nusselt en función del número de Reynolds obtenido por simulación, Whitaker (1972) y la ecuación (4.1). Caso longitudinal.....	49
Figura 4. 15. Valores del número de Nusselt en función del número de Reynolds obtenido por simulación, Whitaker (1972) y la ecuación (4.2). Caso transversal.....	50
Figura 4. 16. Temperatura media de salida del agua [K] en función de la velocidad de corriente libre del agua [m/s]. Comparación de los casos longitudinal y transversal...	51
Figura 4. 17. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función de la velocidad de corriente libre del agua [m/s]. Comparación de los casos longitudinal y transversal...	52
Figura 4. 18. Temperatura media de los mangos [$^{\circ}C$] en función del tiempo [Minutos]..	54
Figura 4. 19. Temperatura media de los mangos [$^{\circ}C$] en función del tiempo [Minutos]. Intervalo de 75 a 110 minutos.	55
Figura 4. 20. Coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio [W/m^2K] en función del tiempo [Minutos].....	56
Figura 4. 21. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función del tiempo [Minutos]. La gráfica está en escala semilogarítmica	57
Figura 4. 22. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función del tiempo [Minutos]. Intervalo de 75 a 110 minutos.	58
Figura 4. 23. Temperatura en el centro de los mangos [$^{\circ}C$] en función del tiempo [Segundos].	61
Figura 4. 24. Temperatura en el centro de los mangos [$^{\circ}C$] en función del tiempo [Segundos]. Intervalo de 7000 a 9000 segundos.	62
Figura 4. 25. Temperatura media de los mangos [$^{\circ}C$] en función del tiempo [Segundos].	63
Figura 4. 26. Temperatura media de los mangos [$^{\circ}C$] en función del tiempo [Segundos]. Intervalo de 4000 a 6000 segundos.	64
Figura 4. 27. Comparación de la curva de temperatura experimental y simulada en función del tiempo.	65
Figura 4. 28. Comparación de la curva de temperatura experimental y simulada en función del tiempo. Intervalo de 70 a 100 minutos.	66
Figura B. 1. Temperatura media de los mangos [$^{\circ}C$] en función del tiempo [Minutos].	75
Figura B. 2. Temperatura media de los mangos [$^{\circ}C$] en función del tiempo [Minutos]. Intervalo de 75 a 110 minutos.	76
Figura B. 3. Coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio [W/m^2K] en función del tiempo [Minutos]..	77
Figura B. 4. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función del tiempo [Minutos]. La gráfica se encuentra en escala semilogarítmica.....	78
Figura B. 5. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función del tiempo [Minutos]. Intervalo de 75 a 110 minutos..	79

Índice de tablas

Tabla 2. 1. Determinación del tiempo de inmersión del proceso hidrotérmico según el tipo de mango.....	21
Tabla 3. 1. Cuadro resumen de las condiciones de frontera para ambos casos longitudinal y transversal en estado estacionario.....	36
Tabla 3. 2. Cuadro resumen de las condiciones de frontera e iniciales para ambos casos longitudinal y transversal en estado transitorio.	36
Tabla 4. 1. Propiedades.....	46
Tabla 4. 2. Tiempo aproximado al cual los mangos alcanzan la temperatura de 46°C para los distintos casos de velocidad de flujo de corriente libre del agua.....	53
Tabla 4. 3. Propiedades del agua a 47.5°C y del mango.....	60
Tabla A. 1.- Primeras 6 raíces de la ecuación (1.42).....	73

Introducción

La infestación de las frutas por plagas siempre ha sido una limitante que cierra puertas de exportación en el mercado internacional. La situación del mango no es una excepción. Durante años se utilizaron métodos de naturaleza química para eliminar plagas. Estos métodos tenían consecuencias negativas en la salud y el ambiente, que los llevaron a ser prohibidos. La aparición de métodos alternativos de desinfestación que hacen uso del calor para tratar frutos infestados solucionó este problema. Estos métodos son los denominados tratamientos térmicos.

Diversas empresas que se dedican a la exportación de mango, utilizan equipos de tratamiento térmico empleando el agua como medio transmisor de calor. Estos tratamientos son denominados hidrotérmicos. Los prototipos en uso fueron desarrollados desde un punto de vista de buenas prácticas ingenieriles aunque, no siguiendo un rigor científico, denominándose a estos prototipos como “tradicionales”. El tratamiento hidrotérmico del mango se realiza bajo los protocolos de los países importadores para obtener su certificación. La empresa Biofruit, con la que se trabajó en conjunto, certifica los mangos bajo los protocolos de dos países importadores: Estados Unidos y Japón. Para realizar ambas certificaciones con el prototipo “tradicional” se necesitan dos procesos diferentes, por lo que la Universidad de Piura desarrolló un equipo dual que cumple de manera simultánea con ambos protocolos bajo una misma carga de mango. Este prototipo se denominó “híbrido”. Sin embargo, se identificó que dicho proceso no es el óptimo y que se puede introducir mejoras.

En el ámbito del proyecto “Mejoras innovadoras de los equipos de tratamiento hidrotérmico del mango que cumplen con los protocolos fitosanitarios de exportación a los mercados de Japón y Estados Unidos en el valle de San Lorenzo-Piura” bajo el convenio de subvención “N° 127-2015-FONDECYT”, se desarrolló la presente tesis. En este trabajo el proceso térmico y fluidodinámico del tratamiento hidrotérmico del mango es objeto de estudio.

En el primer capítulo, se presentan los modelos matemáticos utilizados y los fundamentos de CFD que se emplearon para la realización de la tesis.

En el segundo capítulo, se describe el tratamiento hidrotérmico del mango y se habla por separado de los protocolos de Estados Unidos y Japón. Luego de la unificación de los protocolos y de las condiciones a cumplirse para que se dé un proceso simultáneo.

En el tercer capítulo, se describe la metodología numérica del sistema simplificado a desarrollar. Se presentan las hipótesis, la construcción de la geometría, las características del mallado y las condiciones de frontera. Se incluyen además, las condiciones iniciales para el estudio transitorio. Finalmente, se presenta la metodología experimental.

En el cuarto capítulo, se presentan y discuten los resultados numéricos de las simulaciones realizadas para un estudio estacionario del sistema simplificado. Se comparan dos casos de posición de la jaba frente al flujo de agua. Se hace también un estudio paramétrico. Se ha llevado a cabo un análisis transitorio de la transferencia de calor y la velocidad de flujo de corriente libre de agua. Se presentan los resultados de un análisis comparativo de datos analíticos de una esfera fría bajo un flujo convectivo de agua caliente en las mismas condiciones iniciales del proceso hidrotérmico. Finalmente, se presenta y discute la validación del modelo numérico con los datos de campo.

Capítulo 1

Fundamentos teóricos¹

1.1. Fundamentos de mecánica de fluidos y transferencia de calor

En esta sección, se presentan los modelos matemáticos y las ecuaciones de transporte así como las leyes físicas relacionadas con los fenómenos que se estudian en la presente tesis, los cuales se encuentran incorporados en el software Ansys CFX, que se utilizará para determinar las soluciones numéricas.

1.1.1. Ecuación de conservación de la masa

Se define como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1.1)$$

donde ρ es la densidad del fluido, t es el tiempo, \vec{v} es el vector velocidad del fluido.

1.1.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Esta ecuación de conservación se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (1.2)$$

donde p es la presión, $\overline{\overline{\tau}}$ es el tensor de esfuerzos viscosos, $\rho \vec{g}$ es la fuerza gravitacional por unidad de volumen, \vec{F} es la resultante de las fuerzas externas al cuerpo por unidad de volumen.

Cabe señalar que el tensor de esfuerzos viscosos $\overline{\overline{\tau}}$ está dado por:

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \overline{\overline{I}} \right] \quad (1.3)$$

¹ Esta sección ha sido elaborada con las referencias [1] a la [11].

donde μ es la viscosidad dinámica, \bar{I} es el tensor unitario, \bar{v}^T es el vector transpuesto del vector velocidad.

1.1.3. Ecuación de conservación de la energía

La ecuación de conservación de la energía permite representar matemáticamente la transferencia de energía o de calor en la simulación numérica y se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \bar{v}) \right] + S_h \quad (1.4)$$

donde E es la energía total, k_{eff} es la conductividad térmica local efectiva, T es la temperatura absoluta, \bar{J}_j es el flujo de difusión de la especie $-j$. Se observa que el primer término del lado derecho de la ecuación (1.4), representa la transferencia de energía por conducción, el segundo debido a la difusión de especies y el tercero a la disipación de la viscosidad. Además, el término S_h refiere a las fuentes o sumideros de calor que puedan existir en el sistema como el calor generado o absorbido por reacciones químicas exotérmicas o endotérmicas, respectivamente.

1.1.4. Modelo de turbulencia “k-épsilon Standard”

La turbulencia es un proceso complejo, principalmente debido a que es tridimensional e inestable en diferentes escalas, que consiste en las fluctuaciones espaciales y temporales en el campo del flujo. Debido a estas fluctuaciones, las características del flujo pueden verse afectadas de manera considerable. La turbulencia ocurre cuando las fuerzas de inercia del fluido son significativamente más grandes que las fuerzas viscosas.

Para poder predecir los efectos de la turbulencia, es necesario la utilización de modelos. Dado que se necesita un compromiso entre la carga computacional y la necesidad de precisión en los resultados de la simulación, se recurre al modelo de turbulencia “k-épsilon Standard”, el cual cumple con este compromiso por su simplicidad al utilizar dos ecuaciones de transporte.

La energía cinética de turbulencia (k) y la tasa de disipación de esta (ε) se obtienen a partir de las ecuaciones de transporte de estas variables:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (1.6)$$

donde G_k representa la energía cinética de turbulencia generada por los gradientes de velocidad, G_b representa la generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes de fuerza, Y_M representa a la contribución de la dilatación turbulenta debido a la compresibilidad. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes, σ_ε y σ_k son los números de Prandtl

de turbulencia para ε y k , respectivamente. Por último, los términos S_k y S_ε son definidos por el usuario.

La viscosidad turbulenta μ_t se calcula de la siguiente forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

donde C_μ es una constante.

1.1.5. Ley de Fourier de la conducción

El flujo de calor por unidad de área unitaria normal a las tres direcciones espaciales X, Y y Z, producido por el mecanismo de transferencia de calor denominado como conducción, se representa por las variables \dot{q}''_x , \dot{q}''_y y \dot{q}''_z , respectivamente.

$$\dot{q}''_x = -k_f \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.8)$$

$$\dot{q}''_y = -k_f \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1.9)$$

$$\dot{q}''_z = -k_f \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.10)$$

donde k_f es la conductividad térmica del fluido.

1.1.6. Ley de enfriamiento de Newton

Para determinar la tasa de transferencia de calor entre una superficie y un fluido adyacente en movimiento (\dot{q}''_s), dándose el mecanismo de transferencia de calor denominado convección, se recurre a:

$$\dot{q}''_s = h(T_s - T_\infty) \quad (1.11)$$

donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, T_s es la temperatura absoluta de la superficie y T_∞ es la temperatura absoluta lo suficientemente lejos de la capa límite térmica.

1.1.7. Número de Reynolds

El número adimensional de Reynolds es el cociente entre las fuerzas inerciales y las viscosas.

$$\text{Re} = \frac{\rho_f v_f L_c}{\mu_f} \quad (1.12)$$

donde ρ_f es la densidad del fluido, v_f es la velocidad del flujo, μ_f es la viscosidad dinámica del fluido, L_c es la longitud característica.

1.1.8. Número de Prandtl

El número adimensional de Prandtl es el cociente entre la velocidad de difusión de la cantidad de movimiento y la velocidad de difusión del calor.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1.13)$$

donde ν es la viscosidad cinemática, α es la difusividad térmica.

1.1.9. Número de Nusselt

El número de adimensional de Nusselt es el cociente entre la transferencia de calor por convección y la transferencia de calor por conducción que se da entre un fluido y una superficie.

$$\text{Nu} = \frac{hL_c}{k_f} \quad (1.14)$$

Además, el número de Nusselt se puede expresar como una función de las propiedades del flujo y del fluido:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \frac{\mu_\infty}{\mu_w}) \quad (1.15)$$

donde μ_∞ es la viscosidad dinámica a la temperatura de la corriente libre del flujo y μ_w es la viscosidad dinámica a la temperatura de la superficie.

Tomando Pr y $\frac{\mu_\infty}{\mu_w}$ como propiedades del fluido constantes, para el sistema jaba/mango simplificado que se analiza en las secciones 3.1 y 3.2, se obtiene la siguiente ley de potencia que relaciona el número de Nusselt y el número de Reynolds:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}_L) = c \text{Re}^y \quad (1.16)$$

donde c , y son constantes.

1.1.10. Número de Biot

El número adimensional de Biot relaciona la transferencia de calor por convección entre un fluido y la superficie de un cuerpo y la transferencia de calor por conducción dentro de dicho cuerpo.

$$\text{Bi} = \frac{hL_c}{k_c} \quad (1.17)$$

donde k_c es la conductividad térmica del material del cuerpo.

1.1.11. Número de Fourier

El número adimensional de Fourier caracteriza la conducción de calor relacionando la velocidad de conducción de calor y la velocidad de almacenamiento de energía.

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (1.18)$$

donde L es la longitud a través de la cual la conducción ocurre.

1.1.12. Correlación de transferencia de calor sobre superficies esféricas [1]

$$Nu = 2 + (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{2/3}) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_{ws}} \right)^{0.25} \quad (1.19)$$

donde μ_{ws} es la viscosidad dinámica a la temperatura de la superficie esférica.

1.1.13. Modelo matemático de conducción transitoria en una esfera [2]

Para desarrollar el siguiente modelo se toman las siguientes hipótesis:

- Conducción unidimensional.
- Difusividad térmica constante.
- Conductividad térmica constante.
- Coeficiente convectivo de transferencia de calor uniforme.
- Temperatura ambiente uniforme.

Se utiliza la ecuación (1.20) de la ley de conducción de calor dentro de una esfera para obtener una ecuación diferencial que represente la distribución de temperatura en una esfera.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (1.20)$$

Se toman las condiciones de frontera dadas por:

$$-k \left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{r=r_0} = h \theta \Big|_{r=r_0} \quad (1.21)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (1.22)$$

Además, la condición inicial para un radio cualquiera está dada por:

$$\theta \Big|_{t=0} = \theta_0 \quad (1.23)$$

Donde:

$$\theta = T - T_{\infty} \quad (1.24)$$

$$\theta_0 = T_0 - T_{\infty} \quad (1.25)$$

Se toma una nueva variable denominada \mathcal{G} , definida como:

$$\mathcal{G} = \theta \cdot r \quad (1.26)$$

Entonces las ecuaciones (1.20) a la (1.23), se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial r^2} \quad (1.27)$$

$$-k \left. \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \left(h - \frac{k}{r_0} \right) \mathcal{G}|_{r=r_0} \quad (1.28)$$

$$\mathcal{G}|_{r=0} = 0 \quad (1.29)$$

$$\mathcal{G}|_{t=0} = r\theta_0 \quad (1.30)$$

La ecuación (1.27) se resuelve utilizando la separación de variables. La variable \mathcal{G} es una función de r y de t , y se representa como:

$$\mathcal{G}(r,t) = \varphi(t)\psi(r) \quad (1.31)$$

Se sustituye la ecuación (1.31) en la ecuación (1.27) y se obtiene:

$$\frac{1}{\alpha} \psi \frac{d\varphi}{dt} = \varphi \frac{d^2\psi}{dr^2} \quad (1.32)$$

La ecuación (1.32) representa una igualdad que debe cumplir para todo valor de r y t por lo tanto, los dos lados de la (1.32) deben ser igual a una constante. En la ecuación (1.33) se colocan los dos términos igualados a una constante con un signo negativo, esto debido al valor finito de \mathcal{G} para un tiempo creciente.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\psi} \frac{d^2\psi}{dr^2} = -w^2 \quad (1.33)$$

Entonces, se obtiene un sistema de dos ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{d\varphi}{dt} + \alpha w^2 \varphi = 0 \quad (1.34)$$

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + w^2 \psi = 0 \quad (1.35)$$

Las soluciones generales de las ecuaciones (1.34) y (1.35) son respectivamente:

$$\varphi = C_1 e^{-\alpha w^2 t} \quad (1.36)$$

$$\psi = C_2 \cos(wr) + C_3 \operatorname{sen}(wr) \quad (1.37)$$

Sustituyendo la ecuación (1.36) y la (1.37) en la (1.31), se obtiene:

$$\mathcal{G}(r,t) = \varphi(t)\psi(r) = e^{-\alpha w^2 t} [A \operatorname{sen}(wr) + B \operatorname{cos}(wr)] \quad (1.38)$$

Donde:

$$A = C_1 C_3.$$

$$B = C_1 C_2.$$

Como $\mathcal{G}(r,t)$ debe satisfacer las condiciones de frontera de la ecuación (1.29) entonces:

$$\mathcal{G}(0,t) = e^{-\alpha w^2 t} B = 0 \quad (1.39)$$

Por lo tanto, $B = 0$. Consecuentemente la solución de la ecuación (1.27) está dado por:

$$\mathcal{G}(r,t) = A e^{-\alpha w^2 t} \operatorname{sen}(wr) \quad (1.40)$$

Después de sustituir la ecuación (1.40) en la (1.27), se obtiene la (1.41) que es la ecuación característica. Simplificándola y colocándola en función del número de Biot se obtiene:

$$-kAw \operatorname{cos}(wr_0) = \left(h - \frac{k}{r_0} \right) A \operatorname{sen}(wr_0) \quad (1.41)$$

$$\tan(wr_0) = \frac{wr_0}{1 - Bi} \quad (1.42)$$

Si se toma $s = wr_0$ como la raíz de la ecuación (1.42), esta se puede escribir como:

$$\tan(s) = \frac{s}{1 - Bi} \quad (1.43)$$

Las 6 primeras raíces de la ecuación (1.43) están dadas en la Tabla A.1 que se encuentra en el Anexo A para distintos números de Biot.

Para satisfacer la condición de frontera inicial representada por la ecuación (1.30), la (1.40) se puede escribir como:

$$\mathcal{G}(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha w^2 t} \operatorname{sen}(wr) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha w^2 t} \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) \quad (1.44)$$

Donde:

$$w = \frac{s_n}{r_0}$$

Después de sustituir la ecuación (1.44) en la (1.29) se obtiene:

$$r(T_0 - T_\infty) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha w^2 t} \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) \quad (1.45)$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación (1.45) por el término $\operatorname{sen}\left(\frac{s_m}{r_0} r\right)$ e integrando de 0 a r_0 , se obtiene:

$$(T_0 - T_\infty) \int_0^{r_0} r \operatorname{sen}\left(\frac{s_m}{r_0} r\right) dr = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \int_0^{r_0} \operatorname{sen}\left(\frac{s_m}{r_0} r\right) \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr \quad (1.46)$$

La integral del lado derecho de la ecuación (1.46) se puede transformar como:

$$\int_0^{r_0} \operatorname{sen}\left(\frac{s_m}{r_0} r\right) \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr = \frac{r_0 (s_n \operatorname{sen}(s_m) \cos(s_n) - s_m \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_m))}{s_m^2 - s_n^2} \quad (1.47)$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación (1.43) por $\operatorname{sen}(s_n)$ y sustituyendo $s_n = s_m$, se obtiene:

$$\operatorname{sen}(s_m) \operatorname{sen}(s_n) (1 - \operatorname{Bi}) = s_m \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_m) \quad (1.48)$$

Análogamente, la multiplicación de ambos lados de la ecuación (1.43) por $\operatorname{sen}(s_m)$ y sustituyendo s por s_n se tiene:

$$\operatorname{sen}(s_m) \operatorname{sen}(s_n) (1 - \operatorname{Bi}) = s_n \operatorname{sen}(s_m) \cos(s_n) \quad (1.49)$$

Los términos al lado derecho de la ecuación (1.48) y de la (1.49) son iguales. Además cuando $m \neq n$, la integral de la (1.47) es igual a cero. La sumatoria de la ecuación (1.46) tiene términos que no son iguales a cero únicamente cuando $m = n$. Si $m = n$, entonces:

$$\int_0^{r_0} \operatorname{sen}\left(\frac{s_m}{r_0} r\right) \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr = \int_0^{r_0} \operatorname{sen}^2\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr = \frac{r_0}{2s_n} (s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n)) \quad (1.50)$$

Cuando $m \neq n$,

$$\int_0^{r_0} \operatorname{sen}\left(\frac{s_m}{r_0} r\right) \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr = 0 \quad (1.51)$$

Tomando la ecuación (1.50) y la (1.51) en la (1.46) y notando que la integral del lado derecho de la misma es igual a cero cuando $m \neq n$ entonces, la (1.46) se convierte en:

$$(T_0 - T_\infty) \int_0^{r_0} r \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr = A_n \int_0^{r_0} \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr \quad (1.52)$$

De la ecuación (1.52) se despeja el coeficiente A_n :

$$A_n = \frac{(T_0 - T_\infty) \int_0^{r_0} r \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr}{\int_0^{r_0} \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) dr} = \frac{2r_0(T_0 - T_\infty)(\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n))}{s_n(s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n))} \quad (1.53)$$

Entonces sustituyendo la ecuación (1.53) en la (1.43):

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(r, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha w^2 t} \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2r_0(T_0 - T_\infty)(\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n))}{s_n(s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n))} \times e^{-\alpha w^2 t} \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) \end{aligned} \quad (1.54)$$

Y como $\mathcal{G} = \theta \cdot r$,

$$\begin{aligned} \theta &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha w^2 t} \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(T_0 - T_\infty)(\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n))}{(s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n))s_n \frac{r}{r_0}} \times e^{-\alpha w^2 t} \operatorname{sen}\left(\frac{s_n}{r_0} r\right) \end{aligned} \quad (1.55)$$

Si se toman las siguientes variables adimensionales, $R = \frac{r}{r_0}$ y el número de Fourier,

entonces la ecuación (1.55) pasa a ser:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(T_0 - T_\infty)(\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n))}{(s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n))s_n R} \times e^{-s_n^2 Fo} \operatorname{sen}(s_n R) \quad (1.56)$$

Si se divide la ecuación (1.56) por θ_0 , se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\theta}{\theta_0} &= \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n))}{(s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n))s_n R} \times e^{-s_n^2 Fo} \operatorname{sen}(s_n R) \end{aligned} \quad (1.57)$$

La ecuación (1.58) representa la temperatura de una esfera de radio externo r_0 , para cualquier radio r y tiempo t .

$$T(r, t) = (T_0 - T_\infty) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n))}{(s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n))} \times \frac{\operatorname{sen}(s_n R)}{s_n R} e^{-s_n^2 Fo} + T_\infty \quad (1.58)$$

La temperatura media adimensional se calcula con la ecuación (1.59).

$$\frac{\bar{\theta}}{\theta_0} = \frac{\bar{T}(r,t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} \frac{\theta}{\theta_0} r^2 dr = 3 \int_0^1 \frac{\theta}{\theta_0} R^2 dr \quad (1.59)$$

Si se sustituye la ecuación (1.59) en la (1.57) y tomando en cuenta que:

$$\int_0^1 R \operatorname{sen}(s_n R) dr = \frac{1}{s_n^2} (\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n)) \quad (1.60)$$

Se tiene la ecuación (1.61).

$$\frac{\bar{\theta}}{\theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{s_n^3} \frac{(\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n))^2}{s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n)} e^{-s_n^2 Fo} \quad (1.61)$$

Así, la temperatura media para una esfera de radio externo r_0 , para cualquier radio r y tiempo t está dada por la ecuación (1.62).

$$\bar{T}(r,t) = (T_0 - T_\infty) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{s_n^3} \frac{(\operatorname{sen}(s_n) - s_n \cos(s_n))^2}{s_n - \operatorname{sen}(s_n) \cos(s_n)} e^{-s_n^2 Fo} + T_\infty \quad (1.62)$$

1.2. Fundamentos de dinámica computacional de fluidos

1.2.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Es la ciencia que predice el flujo de fluidos, calor y transferencia de masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados, por medio de la resolución de las ecuaciones de conservación de masa, momento, energía, etc.

CFD se utiliza en todas las etapas del proceso de diseño de sistemas donde intervengan fenómenos con fluidos donde interese realizar:

- Estudios conceptuales para nuevos diseños.
- Desarrollo detallado de productos.
- Solución de problemas.
- Rediseño.

El análisis por CFD complementa la prueba y experimentación mediante la reducción de esfuerzo total y el costo requerido en la técnica de experimentación y en la adquisición de datos.

Los programas de mecánica de fluidos computacional de Ansys CFD, ya sea Fluent o CFX, están basados en el método de volúmenes finitos donde, el dominio computacional, se discretiza en un conjunto de volúmenes de control (Figura 1.1). Las ecuaciones de conservación para la masa, momento, energía, especies, etc. se resuelven en este conjunto de volúmenes de control. Estas ecuaciones diferenciales parciales se discretizan para ser convertidas en un sistema de ecuaciones algebraicas, que son más sencillas de resolver. Estas ecuaciones algebraicas son resueltas de manera numérica de tal manera que se obtiene una solución aproximada de la solución real

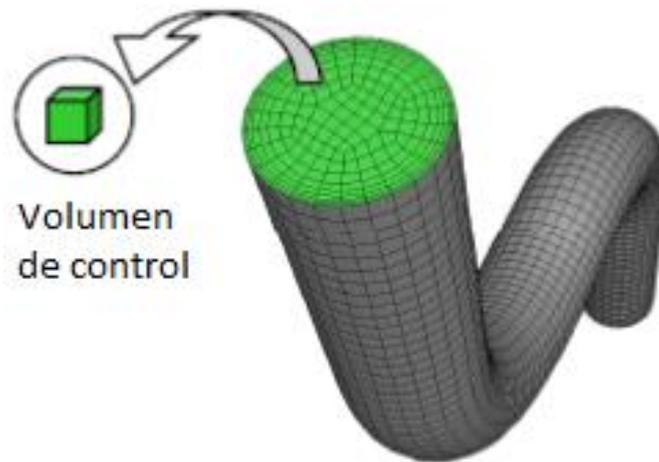


Figura 1.1. Discretización del dominio computacional en volúmenes de control.

Fuente: (La Madrid, 2012)

1.2.2. Metodología general en CFD

Es necesario seguir un conjunto de pasos para poder realizar una simulación CFD, los cuales se desarrollan a continuación.

1.2.2.1. Definir los objetivos de modelado

Se decide qué modelos físicos se van a incluir e implementar en el programa CFD. Se establecen las hipótesis necesarias, tanto para la modelación como para la solución. Generalmente, las hipótesis simplifican el problema y permiten reducir el tiempo de cómputo del programa. Se establece qué nivel de precisión se requiere, esto implica conocer la capacidad de memoria disponible y el tiempo de simulación.

1.2.2.2. Identificar el dominio de interés

Simular todo un sistema físico cuando realmente no es necesario, implicaría mayor costo computacional y tiempo de cálculo, es por ello que, en la mayoría de casos se aísla la zona de mayor interés.

Es importante definir el dominio de cálculo y evaluar qué información se tiene al respecto para poder aplicar las condiciones de frontera para la simulación. En el caso que no se tenga esta información, se podría extender este dominio a una zona donde sí se tenga información.

1.2.2.3. Construcción de la geometría

Se debe definir las dimensiones de la geometría que el fluido va a ocupar en el desarrollo de su flujo. La geometría puede obtenerse a partir de un sólido ya existente, se puede crear recurriendo a algún software externo como Solid Works aunque, el propio Ansys viene con el software Design Modeler. Es importante señalar como buena práctica CFD, la simplificación de la geometría al remover elementos innecesarios como por ejemplo, pernos, filetes, etc. Además, elegir condiciones como de simetría o periodicidad, reducirán los costos computacionales y los requerimientos de memoria.

1.2.2.4. Mallado

Es necesario establecer cuál será la resolución de la malla, considerando que ésta sea capaz de resolver las características geométricas de interés y capturar los gradientes de velocidad, presión, temperatura, etc. Es importante poseer la sensibilidad para decidir si la malla puede capturar con precisión la fenomenología del caso en estudio. También se debe considerar que a mayor complejidad de malla, mayores esfuerzos computacionales son requeridos y por tanto mayor tiempo de simulación. Finalmente, es importante realizar refinamientos en zonas donde se presente la capa límite, pues en ésta se dan los mayores gradientes.

1.2.2.5. Configuración del solucionador

En este punto se debe definir las propiedades de los materiales involucrados (tanto de sólidos, líquidos y gases), los modelos físicos, las condiciones de operación (presión y densidad del lugar, etc.), las condiciones de frontera que serán utilizadas en los modelos, proveer de valores iniciales para la primera iteración, los valores del criterio de convergencia de la simulación.

1.2.2.6. Solución y criterios de convergencia

El sistema de ecuaciones de conservación ya discretizado se resuelve de manera iterativa hasta alcanzar la convergencia bajo los siguientes criterios:

- Los cambios de los residuos de una iteración a otra ya es menor a un valor predeterminado por el usuario.
- La conservación de las propiedades se alcanza midiendo los desbalances.
- Las variables monitoreadas, en el caso de que se hayan seleccionado puntos de monitoreo de interés, deben alcanzar valores constantes.

Es importante señalar que la precisión de la solución aproximada una vez alcanzada la convergencia depende de la precisión de los modelos físicos elegidos, la resolución de la malla, errores numéricos, etc.

1.2.2.7. Post-proceso

En este último paso, se procede a evaluar los resultados finales obtenidos para verificar si son representativos de la solución del campo de flujo, de no ser así, se deben modificar las condiciones de frontera y/o los modelos físicos y realizar una nueva simulación.

Capítulo 2

Proceso hidrotérmico del mango²

2.1. Tratamiento hidrotérmico del mango

La infestación de las frutas por plagas de insectos siempre ha sido una barrera en los mercados internacionales e incluso nacionales. Sin embargo, existen procesos y procedimientos de desinfestación por medio de químicos que al cumplir su objetivo insecticida, también tienen un impacto negativo al fruto y al medio ambiente.

Tratamientos alternativos que utilizan a la energía térmica como la herramienta principal para combatir las plagas, fueron desarrollados con éxito en distintos lugares del mundo. Éstos son los llamados tratamientos térmicos, que abarcan procesos como los fenómenos de conducción del calor, así como convección y radiación. En el caso de la presente tesis, se tiene como objeto de estudio el tratamiento hidrotérmico para la desinfestación del mango que suele estar infestado por la mosca de la fruta "*Ceratitis capitata*". A cierta temperatura objetivo, las larvas de la mosca de la fruta mueren, abriendo las puertas al mercado y sin tener un impacto grave en el ecosistema.

El proceso del tratamiento hidrotérmico del mango consiste en la inmersión de una canasta de jabas que contienen mangos, en un tanque con cierto volumen de agua caliente que se encuentra circulando. La temperatura a la que es sometida la fruta debe ser monitoreada y registrada como parte de la metodología para mantenerla constante durante todo el proceso. Los mangos absorben la energía térmica del agua para así ser transferida desde el exterior hacia su interior. La transferencia de calor desde el agua hacia los mangos se dará por convección forzada que incluye los efectos del movimiento del agua caliente y los efectos de la conducción.

Existen en Piura, equipos de tratamiento hidrotérmico "tradicionales", que pertenecen a empresas del rubro de la exportación de productos agrícolas. Los países importadores de mangos, establecen protocolos para el procesamiento de éstos, a fin de evitar la llegada de plagas que infesten sus territorios y cultivos.

² Esta sección se ha elaborado utilizando las referencias [12] y [13]

Un equipo de investigadores de la Universidad de Piura desarrolló un prototipo de tanque optimizado para el tratamiento hidrotérmico del mango, desde un punto de vista más ingenieril, el cual denominó “híbrido” pues, cumple de manera simultánea con ambos protocolos fitosanitarios dados por los países de EE.UU y Japón. En la Figura 2.1, se aprecia la geometría desarrollada en el ámbito del proyecto N° 147-FINCyT-IA-2013, titulado: “Diseño y construcción de un prototipo dual optimizado, para el proceso hidrotérmico del mango para cumplir con los protocolos fitosanitarios de exportación a los mercados de Japón y Estados Unidos en el Valle de San Lorenzo- Piura”.

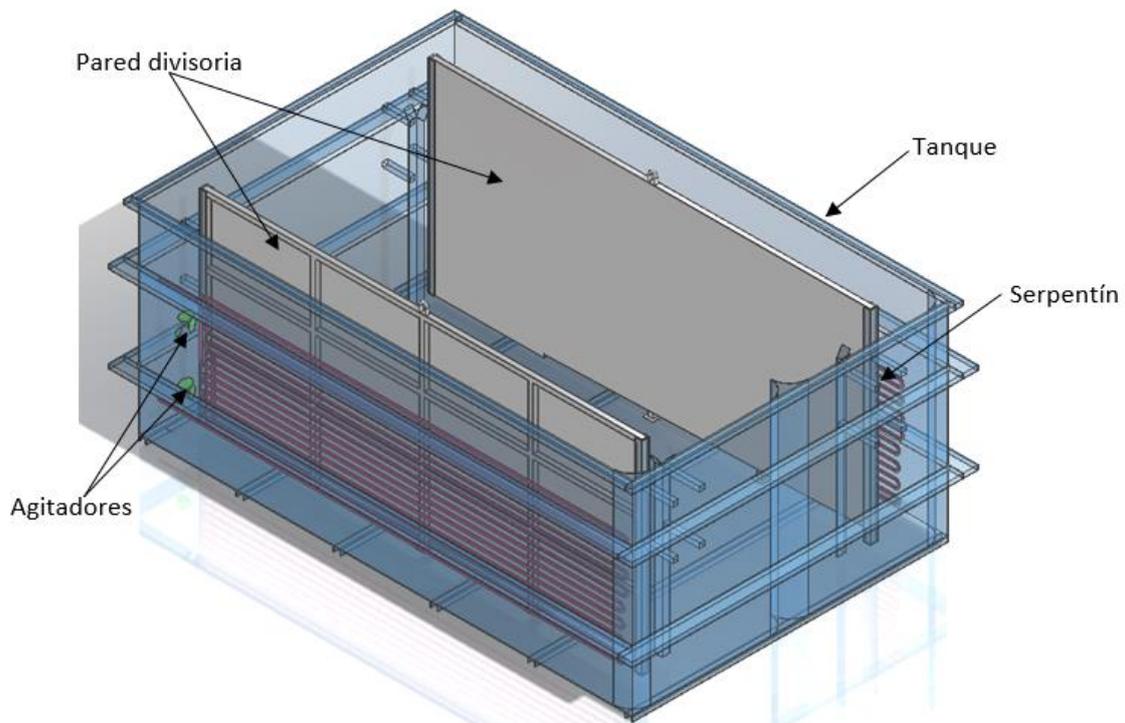


Figura 2. 1. Vista isométrica del tanque “híbrido” de tratamiento hidrotérmico

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

Un equipo como el de la Figura 2.1, para realizar este proceso para el mango, está conformado por:

- Tanque de forma rectangular de $33.2m^3$ donde se calienta agua líquida a temperaturas superiores a $46.5^{\circ}C$ durante todo el proceso del tratamiento hidrotérmico. El tanque se puede apreciar en vista isométrica con sus cotas principales en centímetros en la Figura 2.2.
- Sistema transmisor de calor compuesto de tubos formando dos serpentines en cuyo interior recorre vapor de agua sobrecalentado. Este vapor de agua transferirá su energía térmica hacia el agua líquida contenida en el tanque que está en contacto con las paredes exteriores del serpentín. Los serpentines se pueden apreciar en la Figura 2.3.
- Sistemas de impulsión conformado por agitadores que producen un flujo de forma que acelere el proceso de transferencia de calor por convección desde el vapor de agua hacia el agua líquida contenida en el tanque y, así mismo, del agua líquida

hacia los mangos sumergidos en jabas. Los agitadores se observan en la Figura 2.4.

- Paredes divisorias para separar la zona donde se encuentran los serpentines de la zona donde se encuentra el mango inmerso.
- Sistema de control automático, que permite controlar de acuerdo al estado térmico del agua del tanque, la presión y el flujo de vapor de agua que ingresa hacia los serpentines.

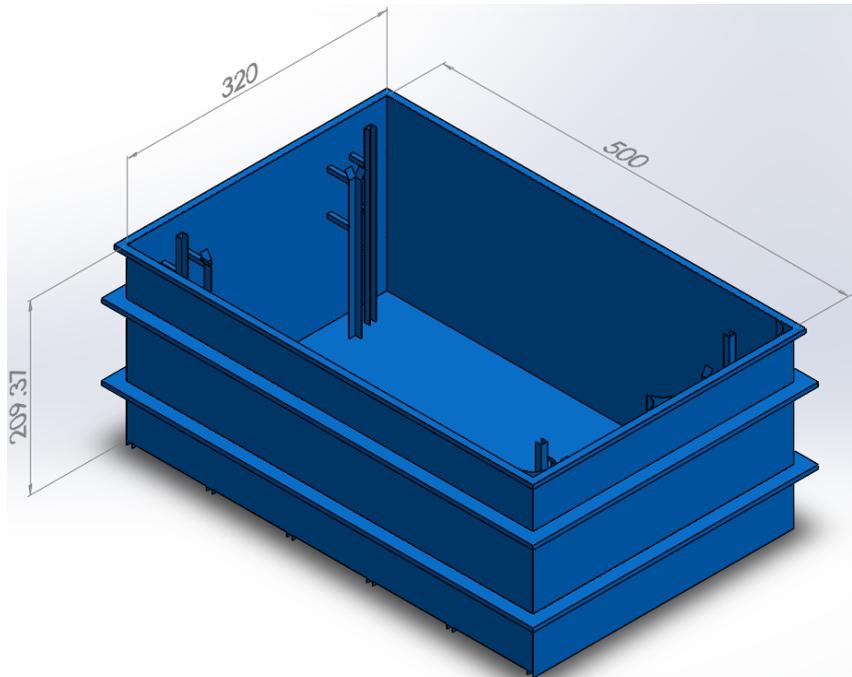


Figura 2. 2. Tanque de forma rectangular del equipo “híbrido” de tratamiento hidrotérmico.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.



Figura 2. 3. Serpentines para intercambio de calor.

Fuente: (De Francesch , 2016)

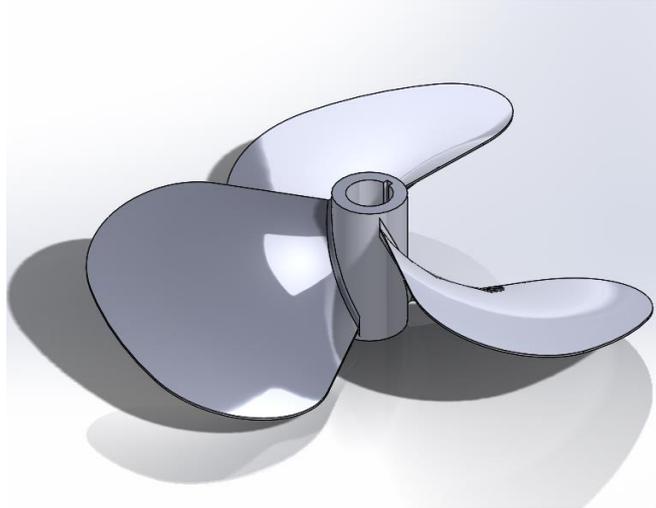


Figura 2. 4. Agitadores.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

El proceso previo al tratamiento hidrotérmico del mango consiste en los siguientes pasos:

- Se colocan los mangos pre-seleccionados en jabas como se observa en la Figura 2.5.
- Las jabas se agrupan en una canasta metálica que luego será sumergida como se observa en las Figuras 2.6 y 2.7.
- Esta canasta se eleva por una grúa y se sumerge en el agua del tanque como se observa en las Figuras 2.8 y 2.9.
- Una vez sumergida la canasta se desacopla de la grúa y se empieza a realizar el tratamiento hidrotérmico.



Figura 2. 5 Colocación de los mangos en jabas.

Fuente: Fotografía personal.



Figura 2. 6. Canasta para jabas de mango.

Fuente: (De Francesch , 2016)



Figura 2. 7. Colocación de las jabas en la canasta de izaje.

Fuente: Fotografía personal.



Figura 2. 8. La canasta se eleva por una grúa y se desplaza hacia el tanque.

Fuente: Fotografía personal.



Figura 2. 9. La canasta se sumerge en el agua contenida por el tanque.

Fuente: Fotografía personal.

2.2. Protocolo de tratamiento hidrotérmico

1. Los mangos deben estar pre-seleccionados por clasificación de peso. El tratamiento de cargas mixtas y de diferente tipo no está permitido.
2. El tiempo estimado para el tratamiento hidrotérmico se determina por el peso máximo de la fruta, para pesos menores a 425g, el tiempo es de 75 minutos y para pesos en el rango 425 a 650g, el tiempo será de 90 minutos. Ver Tabla 2.1.

3. La temperatura de la pulpa al inicio del tratamiento debe ser de 21.1°C (70°F) como mínimo.
4. La fruta debe quedar sumergida a una profundidad de 10 cm o más, debajo de la superficie del agua durante todo el tratamiento.
5. El agua debe circular permanentemente para ser mantenida a 46.1°C (115°F) durante todo el tratamiento.
6. Los “sensores de temperatura de agua” serán monitoreados estrechamente durante los primeros 5 minutos del tratamiento. Es requisito que la temperatura de todos los “sensores de temperatura de agua” (permanentes y portátiles) alcancen al menos 46.1°C (115.0°F) dentro de los 5 primeros minutos. Si no es así, la prueba debe repetirse.
7. La temperatura del agua puede bajar hasta 45.4°C (113.7°F), por un periodo de 10 minutos en tratamientos de 75 minutos y por un periodo de 15 minutos en tratamientos de 90 minutos. Si en el proceso la temperatura del agua cae por debajo de 45.4°C en cualquier momento durante el periodo de tratamiento, éste se rechaza.
8. Durante el tratamiento comercial, el diferencial de la temperatura del agua entre los sensores permanentes del tanque no debe exceder 1°C (1.8°F).
9. En las lecturas de temperatura en los tratamientos de 75 y 90 minutos, el diferencial de la temperatura de la pulpa, entre la temperatura más baja y más alta no puede exceder 3°C (5.4°F). El mínimo de temperatura que puede registrar un sensor de pulpa al inicio del tratamiento es de 37.8°C (100°F) y al final de 45°C (113°F). Si la lectura final es menor de 45°C el tratamiento se rechaza.
10. Si como decisión del empacador, se desean utilizar los mismos frutos en otro tratamiento, estos deben ser enfriados a menos de 32.2 °C.

Tabla 2. 1. Determinación del tiempo de inmersión del proceso hidrotérmico según el tipo de mango.

Forma de la fruta	Peso (gramos)	Tiempo de inmersión (minutos)
Variedades aplanadas y alargadas: <i>Ataulfo, Carrot, Frances, Irwin, Zill y Manila</i> .	Hasta 375	65
	375 a 570	75
Variedades redondeadas: <i>Kent, Keitt, Hayden y Tommy Atkins</i>.	Hasta 425	75
	425 a 650	90

Fuente: (Malca, 2014)

2.2.1. Protocolos de EE.UU y de Japón

Como se mencionó, los países importadores son los que dan ciertas normas fitosanitarias sobre en qué condiciones y de qué modo debe darse el proceso del tratamiento hidrotérmico del producto que van a comprar para así certificar y posteriormente otorgar el permiso de exportación.

El protocolo de EE.UU está parametrizado en cuanto al tiempo de procesamiento del mango. El protocolo japonés se enfoca en alcanzar cierto valor de temperatura indiferentemente del tiempo que haya tomado llegar a ella.

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

- El producto debe estar inmerso por lo menos 75 minutos según el tamaño correspondiente, para un rango de tamaño superior el tiempo mínimo es de 90 minutos.
- La temperatura mínima del fruto al iniciar el tratamiento debe ser mayor a 21.1°C (70°F).
- La temperatura del agua en la tina debe ser mayor de 46.1°C (115°F) por más de un minuto.
- Los primeros 5 minutos son muy importantes ya que ningún sensor de agua debe descender de 46.1°C (115°F).
- El proceso termina al cumplirse el tiempo requerido, según el tamaño del producto.

Para el tratamiento según Japón, se tienen las siguientes especificaciones:

- El lapso del tratamiento depende de la temperatura de la pulpa del mango de la zona más fría de la tina.
- El fin del tratamiento queda determinado cuando todos los sensores de temperatura de pulpa de mango lleguen a 46°C (114.8°F).
- Al iniciar la inmersión en agua caliente, la temperatura de la fruta no debe ser menor a 21.1°C (70°F). Dado que en la zona norte del Perú no hay problema con esta restricción, el paso de selección de mangos a la zona de tratamiento no necesita ningún tipo de precalentamiento.
- La temperatura del agua de la tina no debe de bajar de los 46.4°C (115.5°F) más de un minuto.
- La temperatura inicial del agua en la tina no debe ser mayor a 47°C (116.6°F).

2.2.2. Unificación de protocolos de exportación para la mejora industrial

Mendoza et al. (2015) recurrieron al análisis de registros de temperaturas y a un estudio exhaustivo para la fabricación del tanque “híbrido” y de esta manera poder lograr en este dispositivo, la versatilidad en cumplir ambos protocolos de EE.UU y de Japón.

En la unificación, se hace referencia a cumplir de manera simultánea, para la misma canastilla de mangos, la certificación de ambos protocolos.

Recurriendo a la explicación dada por De Francesch (2016):

Tomando como ejemplo una selección de mango que esté entre los 425 a 650g, según el protocolo de EE.UU corresponde un control de tiempo mínimo de 90 minutos, con el cuidado de los primeros 5 minutos y un set-point de temperatura del agua a 46.1°C (115°F).

Para acoplarlo a los requerimientos de exportación de Japón, se deberá iniciar el tratamiento a una temperatura de agua de 47°C (116.6°F) y así tener a favor el mayor gradiente de temperatura inicial, por tanto la primera valla a superar es que el diseño de

tanque “híbrido” tenga una proporción de volumen de agua tal que, al recibir la carga de mango fría, la temperatura del agua no baje de los 46.1°C (115°F) como exige EE.UU. La solución a esto es aumentar la masa de agua contenida en el tanque, por lo que se deberá utilizar un tanque más grande que el original y así se necesitará mayor calor para mantener el valor de temperatura establecido. La ventaja es que el adicional de calor contenido ayudará enormemente a cumplir el requisito de que ningún sensor de temperatura de agua baje del límite de control inferior de temperatura.

La segunda valla es que el protocolo de EE.UU precisa un set-point mínimo de 46.1°C (115°F), es decir, medio grado Fahrenheit más. Con esto se satisface con ambos protocolos.

La tercera valla es que, una vez que llega el tiempo de tratamiento para EE.UU, no hay obligación de retirar la canastilla de mango del tanque inmediatamente, entonces se aprovecha en dejar sumergido el producto hasta que todos los sensores de pulpa de mango lleguen a los 46°C (114.8°F). Estadísticamente, esto se logra en los 15 a 20 minutos siguientes.

La unificación de protocolos para el tanque “híbrido” se puede resumir en que, al inicio se cuida en cumplir con los requerimientos de EE.UU y en la parte final se determina las exigencias de Japón. En cuanto a tiempos de proceso, una mejora estupenda fuese que el protocolo de Japón se cumpla antes que el de EE.UU, ello sí sería un ahorro muy atractivo.

2.3. Diseño de tanque híbrido – dual para el tratamiento hidrotérmico

Tomado de los laboratorios de Energía y Mecánica, respectivamente, de la Universidad de Piura, se presentan los siguientes diseños del tanque “híbrido” y la canastilla de izaje, que fueron diseñados para el proyecto N° 147-FINCYT-IA-2013, titulado: “Diseño y construcción de un prototipo dual optimizado, para el proceso hidrotérmico del mango para cumplir con los protocolos fitosanitarios de exportación a los mercados de Japón y Estados Unidos en el Valle de San Lorenzo- Piura”. En la Figura 2.10 se muestra el plano de diseño base del tanque de tratamiento hidrotérmico. En la Figura 2.11 se aprecia el plano de la diseño de la canasta de izaje.

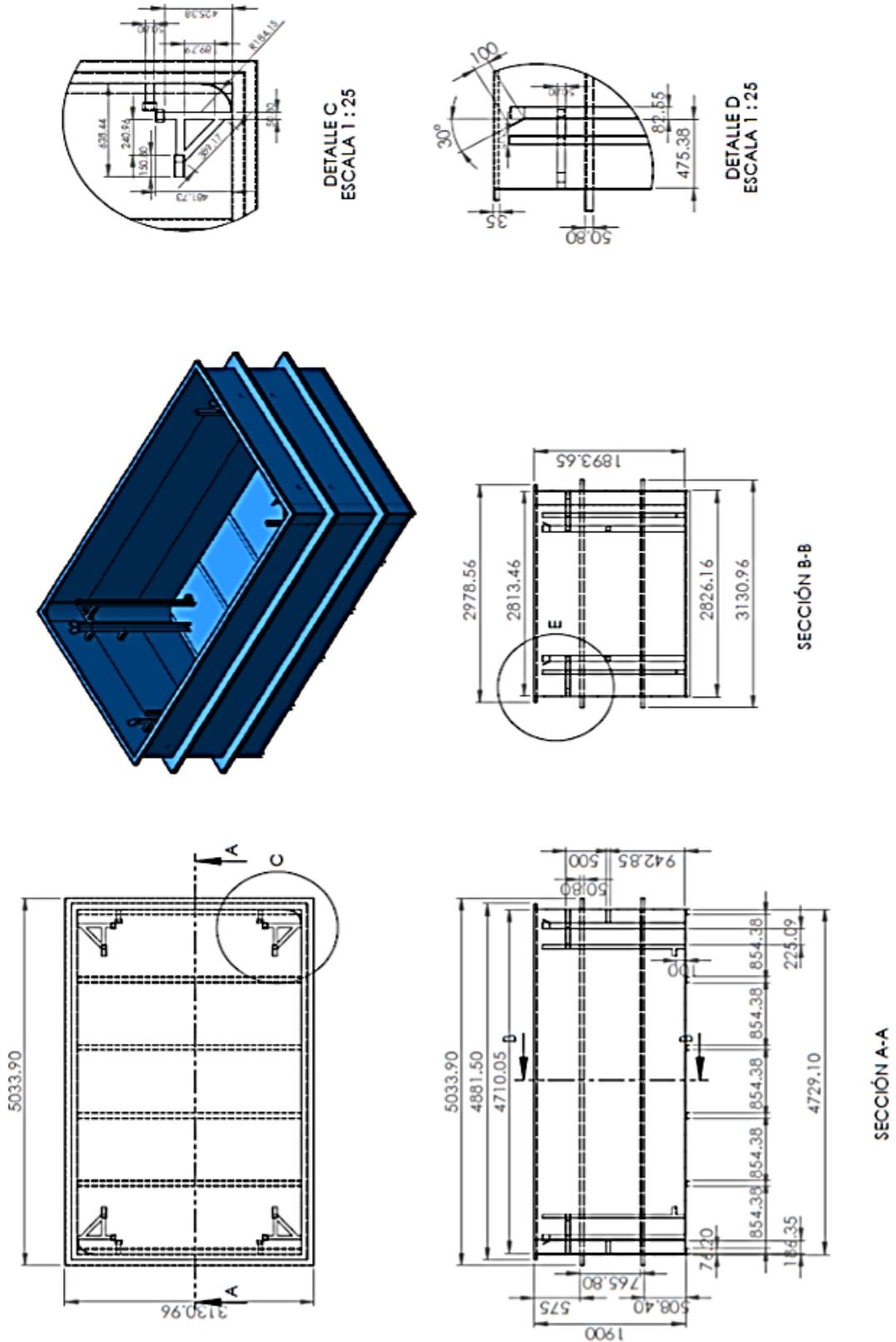


Figura 2. 10. Diseño de tina de tratamiento hidrotérmico.

Fuente: Plano de diseño desarrollado por el laboratorio de Mecánica de la Universidad de Piura.

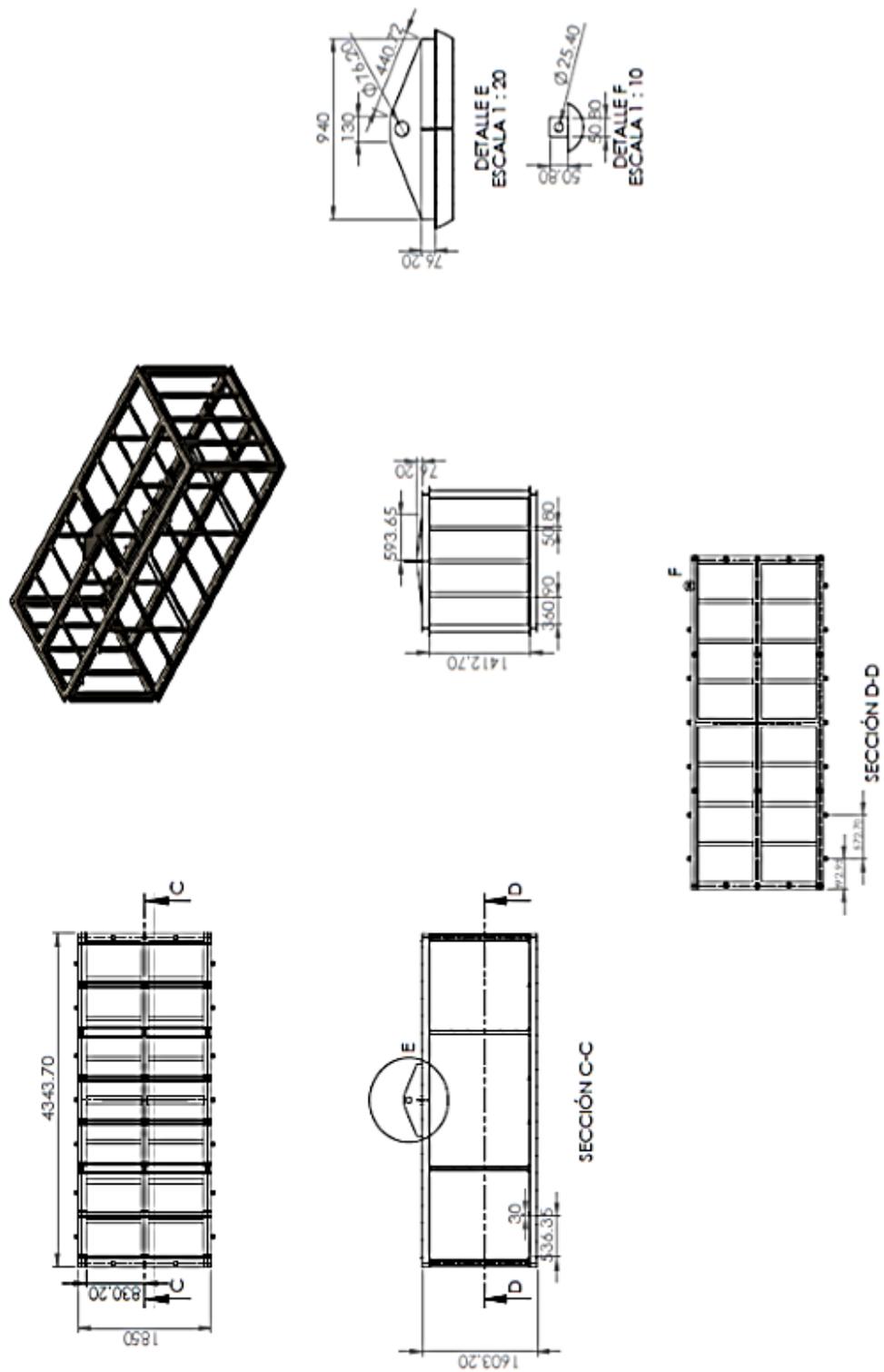


Figura 2. 11. Diseño de canasta de izaje.

Fuente: Plano de diseño desarrollado por el laboratorio de Mecánica de la Universidad de Piura.

Capítulo 3

Metodología numérica y mediciones experimentales

3.1. Metodología numérica del sistema jaba/mango simplificado

Las simulaciones realizadas para el sistema jaba/mango simplificado comprenden tanto el caso de la orientación longitudinal y transversal como los regímenes estacionario y transitorio. Estas simulaciones fueron realizadas con una misma geometría de cálculo y mallado, por lo que se obtuvo el mismo dominio computacional.

3.1.1. Hipótesis de los casos longitudinal y transversal en estado estacionario

Se establecen las siguientes hipótesis que se aplican a ambos casos de orientación del sistema jaba/mango simplificado:

- Flujo tridimensional.
- Régimen estacionario.
- Densidad del agua constante.
- Densidad del mango constante.
- Los mangos son considerados elipsoides sólidos en los que no se distingue entre cáscara, pulpa y pepa, por lo que se considera un cuerpo sólido homogéneo.
- Las paredes de la jaba son adiabáticas.
- Viscosidad dinámica del agua constante.
- Conductividad térmica del agua constante.
- Conductividad térmica del mango constante.

3.1.2. Hipótesis de los casos longitudinal y transversal en estado transitorio

Se establecen las siguientes hipótesis que se aplican a ambos casos de orientación del sistema jaba/mango simplificado:

- Flujo tridimensional.
- Régimen transitorio.
- Densidad del agua constante.

- Densidad del mango constante.
- Los mangos son considerados elipsoides sólidos en los que no se distingue entre cáscara, pulpa y pepa, por lo que se considera un cuerpo sólido homogéneo.
- Las paredes de la jaba son adiabáticas.
- Viscosidad dinámica del agua es constante.
- Conductividad térmica del agua es constante.
- Conductividad térmica del mango es constante.

3.1.3. Construcción de la geometría

La geometría del sistema jaba/mango simplificado está compuesta, principalmente, por una jaba y un conjunto de 23 mangos.

Los mangos se elaboran en el software SolidWorks 2014, a partir de la realización de un único elemento que tiene una forma elipsoidal. Se inicia de una elipse con diámetro mayor de 11 cm y diámetro menor de 9 cm, el cual es un tamaño representativo respecto a los distintos tamaños de mango que son procesados en la agroindustria. En las Figuras 3.1 y 3.2 se puede apreciar la geometría del mango y sus respectivas cotas.

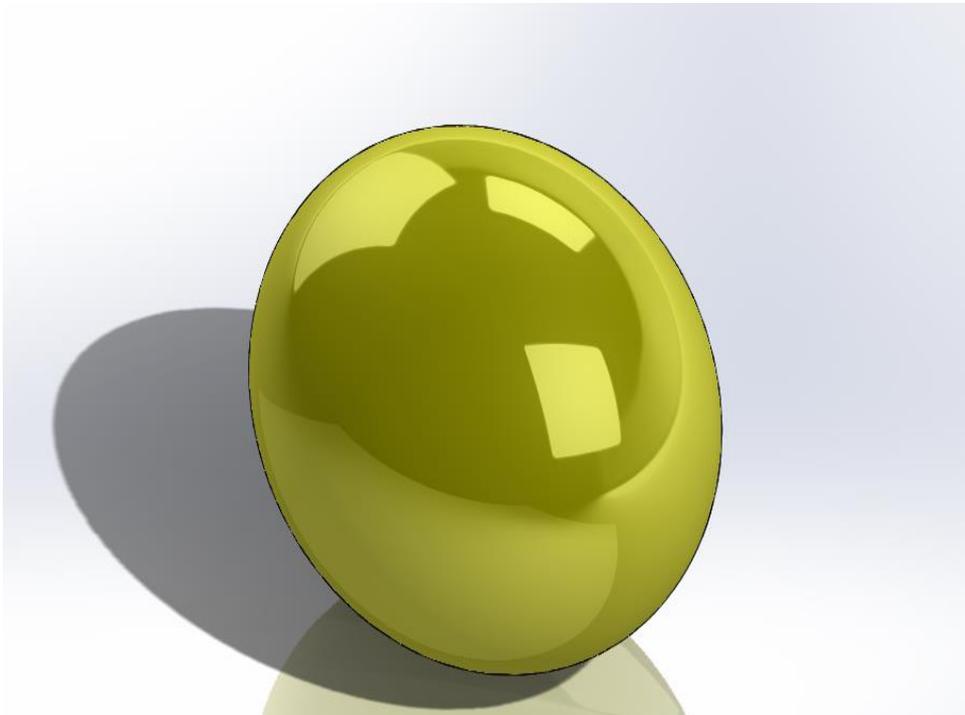


Figura 3. 1. Geometría del mango.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza

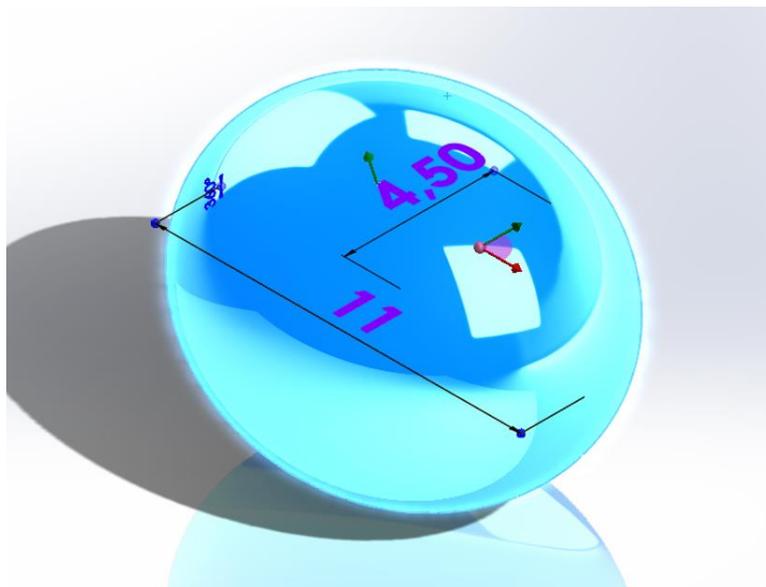


Figura 3. 2. Cotas principales de la geometría del mango.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

La geometría de la jaba se presenta en la Figura 3.3 con las siguientes dimensiones principales: la base de 400 mm de largo y de 300 mm de ancho; 200 mm de altura. Se aprecia la vista frontal de la geometría de la jaba en la Figura 3.4.

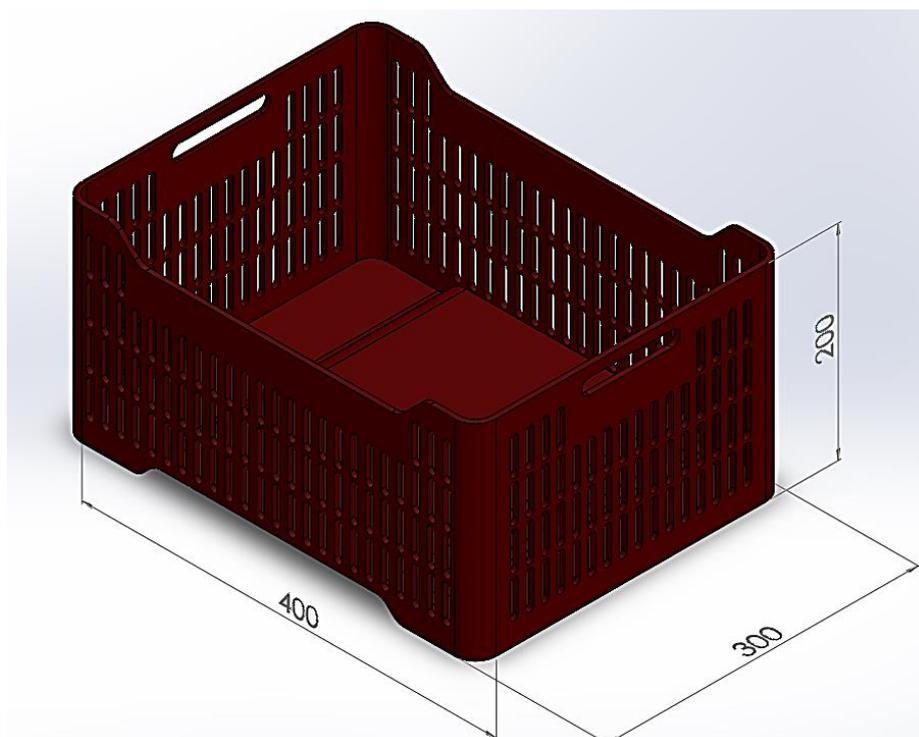


Figura 3. 3. Geometría de la jaba y sus respectivas cotas principales

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

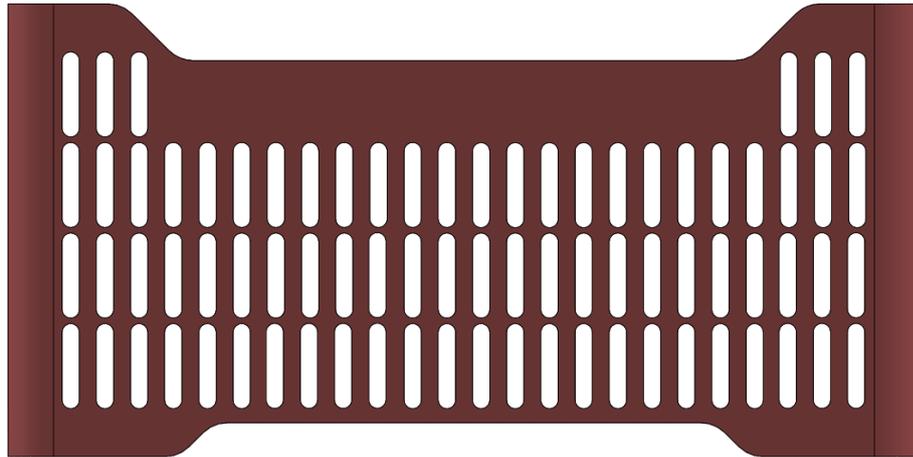


Figura 3. 4. Vista frontal de la geometría de la jaba.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

En la Figura 3.5 se puede apreciar la geometría del sistema jaba/mango simplificado luego del ensamblaje de las geometrías del mango y la jaba.

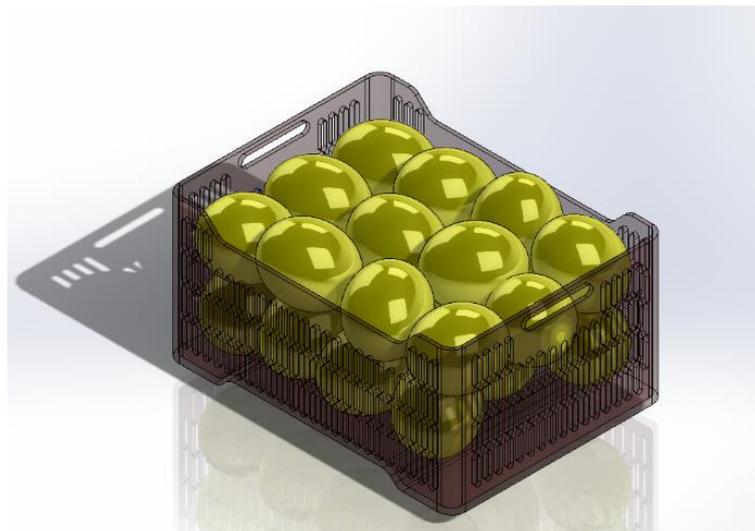


Figura 3. 5. Sistema jaba/mangos simplificado.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

3.1.4. Mallado

Se discretiza el dominio computacional con el software Ansys Meshing Grid 17.0 del sistema jaba/mango simplificado en subdominios y estos subdominios en 3 268 323 elementos. La malla obtenida a partir de la geometría elaborada, se observa en la Figura 3.6. Además se puede apreciar la discretización de los subdominios en la Figuras 3.7 y 3.8.

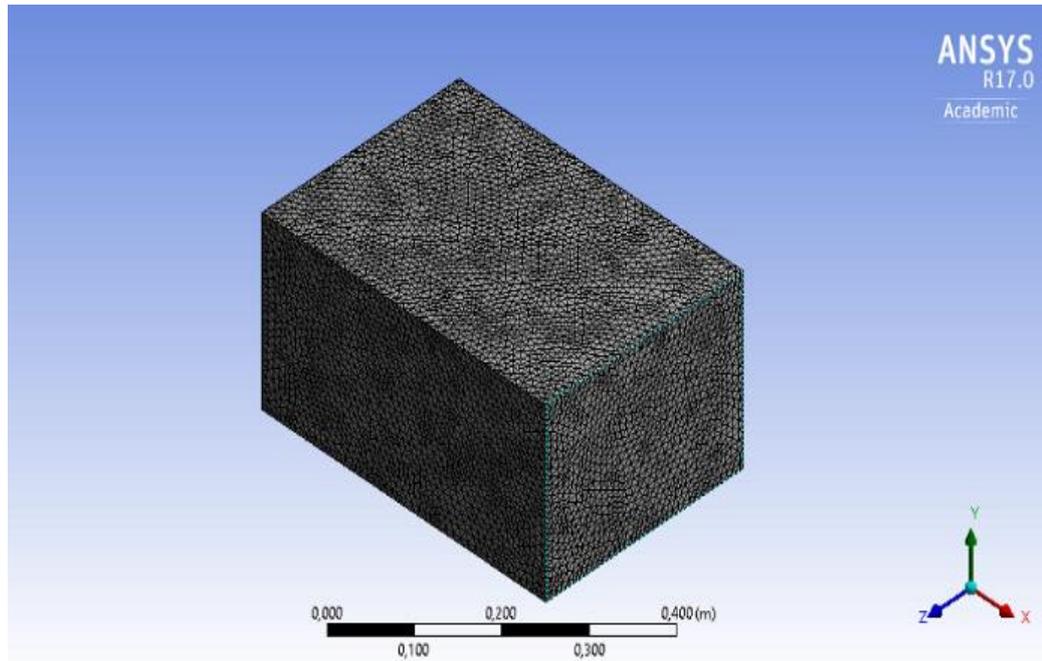


Figura 3. 6. Malla de la geometría del sistema jaba/mango simplificado.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

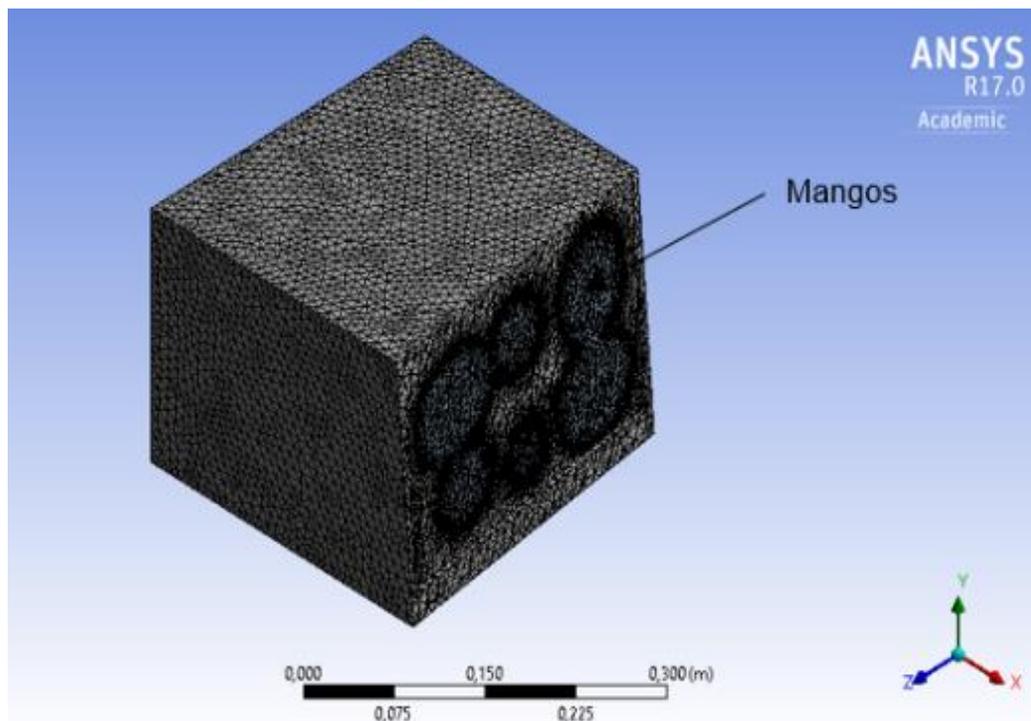


Figura 3. 7. Corte en sección de la malla.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

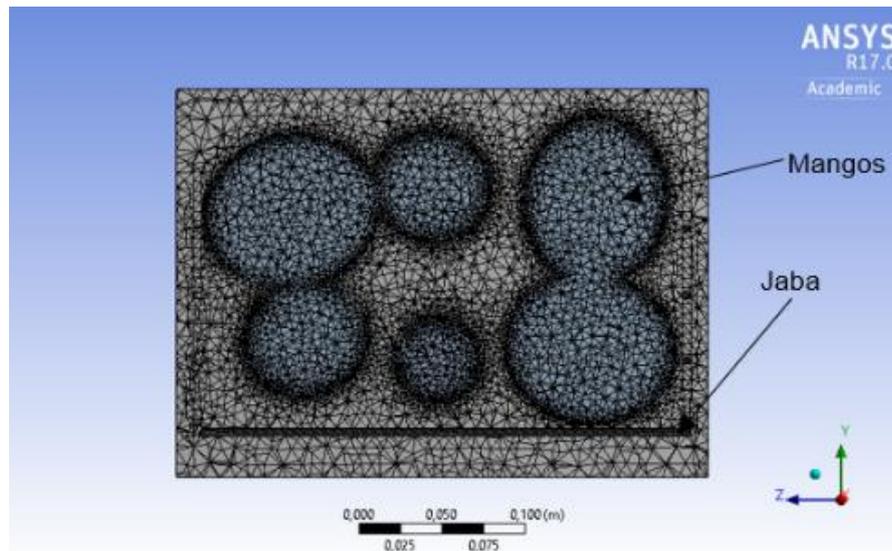


Figura 3. 8. Vista de la sección de corte en la malla.

Fuente: Elaborado por Dr. Elder Mendoza.

Esta malla tiene las siguientes características:

- Número de nodos: 5 128 897.
- Número de elementos: 3 268 323.
- Elementos: Tipo tetraédricos.
- Se refina en las zonas donde se encuentra la capa límite con el fin de captar con mayor precisión los gradientes de temperatura.

3.1.5. Configuración del problema

3.1.5.1. Dominios

Para ambos análisis en el software Ansys CFX 17.0, se colocan dos subdominios: un subdominio de fluido (subdominio agua) y un subdominio sólido (subdominio mangos).

Para el subdominio agua, el cual es un subdominio de fluido, se considera la transferencia de energía térmica despreciando los efectos gravitacionales. Se utiliza el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ junto con un número de Prandtl turbulento de 0.9. Además, el material utilizado es el “Agua líquida” que tiene las siguientes propiedades constantes:

- Densidad de $997 \text{ kg} / \text{m}^3$.
- Calor específico de $4 187 \text{ J} / \text{kgK}$.
- Masa molar de $18.02 \text{ kg} / \text{kmol}$.

Para el subdominio mangos, el cual es un subdominio sólido, se utilizó el modelo de energía térmica para la transferencia de calor despreciando los efectos gravitacionales. El material utilizado fue creado y denominado “Mango” y tiene las siguientes propiedades constantes:

- Densidad de $1\,359\text{ kg/m}^3$.
- Calor específico de $3\,240\text{ J/kgK}$.
- Masa molar de 100 kg/kmol .

3.1.5.2. Condiciones de frontera e iniciales

Las condiciones de frontera se configuran según sea el caso longitudinal o transversal de orientación en que se coloque la jaba frente al flujo de agua de entrada. Serán las mismas para el estudio en los estados estacionario y transitorio.

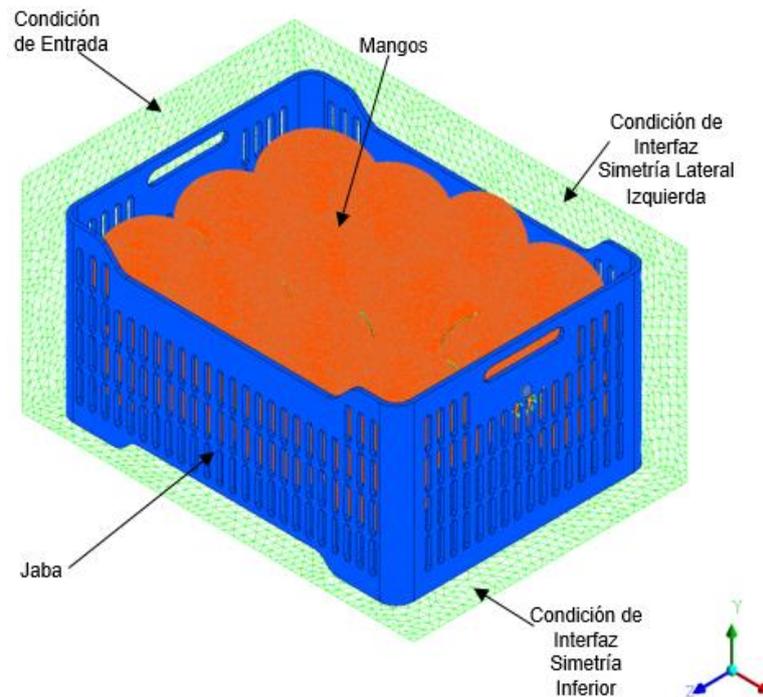


Figura 3. 9. Caso longitudinal. Condiciones de frontera.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.9 se observan las condiciones de frontera para el caso longitudinal. La velocidad de corriente libre del agua en la entrada del sistema para el análisis de la sección 4.1.1 y sección 4.1.2 en el capítulo 4, es de 0.3 m/s y es variable para el análisis de la sección 4.1.3 del capítulo 4. Para ambos análisis la temperatura del agua en la entrada del sistema es de 47.5°C .

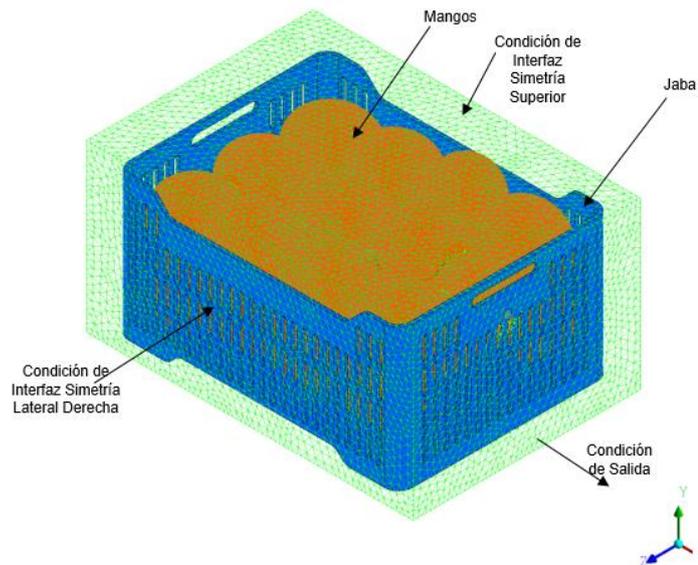


Figura 3. 10. Caso longitudinal. Condiciones de frontera.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.10 se observan condiciones de frontera para el caso longitudinal. Para los análisis del sistema jaba/mango simplificado la presión estática en la salida del sistema es de 1 atmósfera.

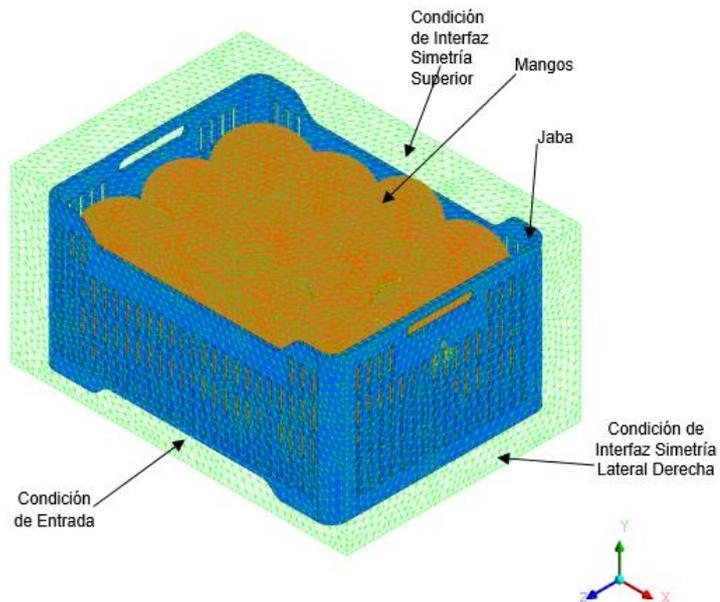


Figura 3. 11. Caso transversal. Condiciones de frontera.

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 3.11 y 3.12 se observan las condiciones de frontera para el caso transversal.

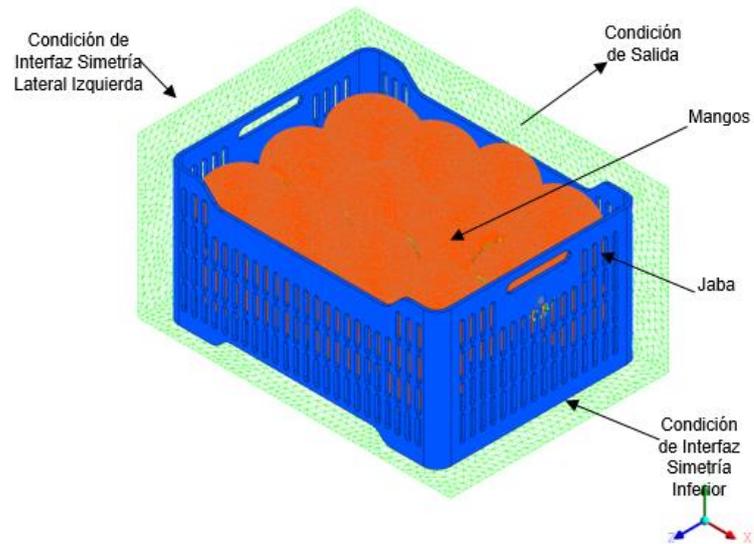


Figura 3. 12. Caso transversal. Condiciones de frontera.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.13 se observan las condiciones de pared, las cuales son características de la jaba y de los mangos.

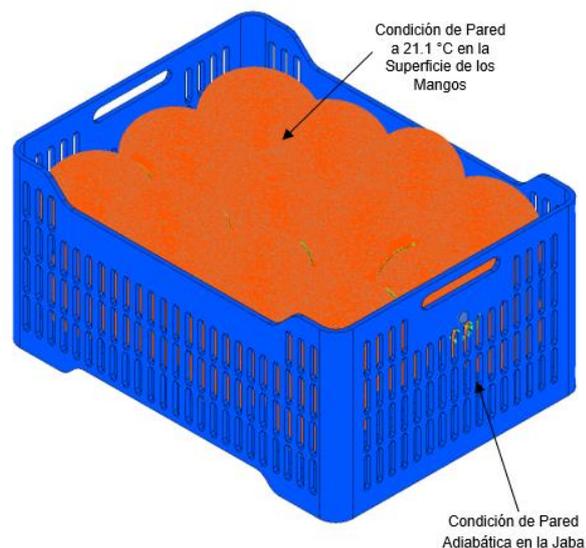


Figura 3. 13. Para ambos casos longitudinal y transversal. Condiciones de frontera.

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta la Tabla 3.1 para ambos casos de orientación de la jaba como cuadro resumen de las condiciones de frontera para el estudio en estado estacionario.

Tabla 3. 1. Cuadro resumen de las condiciones de frontera para ambos casos longitudinal y transversal en estado estacionario.

Región	Condiciones de frontera
Entrada	$T_{\infty} = 47.5^{\circ}\text{C}$, $V_{\infty} = 0.3 \text{ m/s}$
Salida	$P_{sal} = 1 \text{ atm}$
Paredes	$V_s = 0 \text{ m/s}$ (condición de no deslizamiento) $T_{sup-mangos} = 21.1^{\circ}\text{C}$ Adiabática (sólo Jaba)
Interfaces	Periodicidad traslacional

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta además, la Tabla 3.2 como cuadro resumen para ambos casos longitudinal y transversal de las condiciones de frontera e iniciales para el estudio en transitorio.

Tabla 3. 2. Cuadro resumen de las condiciones de frontera e iniciales para ambos casos longitudinal y transversal en estado transitorio.

Región	Condiciones de frontera e iniciales
Entrada	$T_{\infty} = 47.5^{\circ}\text{C}$ $V_{\infty} = 0.005, 0.05, 0.3, 3 \text{ m/s}$
Salida	$P_{sal} = 1 \text{ atm}$
Paredes	$V_s = 0 \text{ m/s}$ (condición de no deslizamiento) $T_m(0) = 21.1^{\circ}\text{C}$ (sólo Mangos) Adiabática (sólo Jaba)
Interfaces	Periodicidad traslacional

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Metodología experimental

Los ensayos realizados en la planta de Biofruit permitieron obtener un conjunto de datos sobre el comportamiento transitorio real del calentamiento de algunos mangos sujetos a medición. Como se observa en la Figura 4.27, en la sección 4.3 del capítulo 4, estos datos experimentales obtenidos permiten validar el modelo numérico-computacional que se ha desarrollado, concluyendo que el sistema jaba/mango simplificado es un modelo representativo del prototipo real con ciertas diferencias como era de esperarse.

3.2.1. Ensayo experimental

El ensayo consistió en el uso de 6 sensores de temperatura RTD PT100 colocados en distintas zonas del tanque para medición de la temperatura del agua y de 3 sensores colocados perforando el interior de los mangos (llegando a la zona de la pulpa). Lamentablemente, no se llevó un control respecto al tamaño de los mangos, es decir, no se monitoreó la selectividad del tamaño de los mangos, pues fueron sometidos a tratamiento, distintos tamaños. Esto implica una diferencia en los valores de los resultados experimentales con numéricos pues, en estos últimos, se tenían mangos de un mismo tamaño como se explicó en la Sección 3.1.3.

La parte de control automático fue monitoreado en tiempo real por un sistema PLC, que en función de la temperatura del agua y de las pulpas de los mangos, regula el funcionamiento de las electroválvulas (permitiendo el paso de vapor de agua por los serpentines del prototipo “híbrido” y por tanto, calentamiento de los mangos).

En la Figura 3.14, se observa como el operario coloca el sensor RTD PT100 en el mango, introduciéndolo hasta el interior o hasta toparse con la pepa de la fruta.

En la Figura 3.15, se observan los cables de los sensores RTD PT100 que van al PLC para el sistema de control.



Figura 3. 14. Colocación de RTD en el interior del mango.

Fuente: Fotografía personal.



Figura 3. 15. Cables de transmisión de las RTD's al PLC.

Fuente: Fotografía personal.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

4.1. Resultados numéricos del sistema jaba/mango simplificado en estado estacionario

4.1.1. Análisis y descripción de parámetros del caso longitudinal

En la Figura 4.1, la flecha negra indica la dirección de entrada del flujo y por dónde lo hace. De esta manera, el flujo realiza un recorrido longitudinal relativo a la geometría de la jaba. En la Figura 4.2 se observa el plano de corte medio que se utiliza más adelante para el análisis de las propiedades a estudiar.

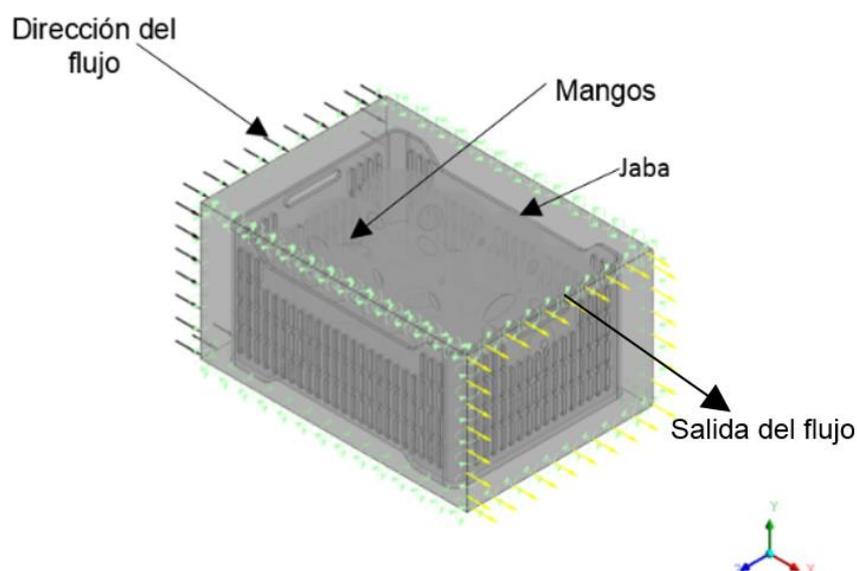


Figura 4. 1. Caso longitudinal.

Fuente: Elaboración propia.

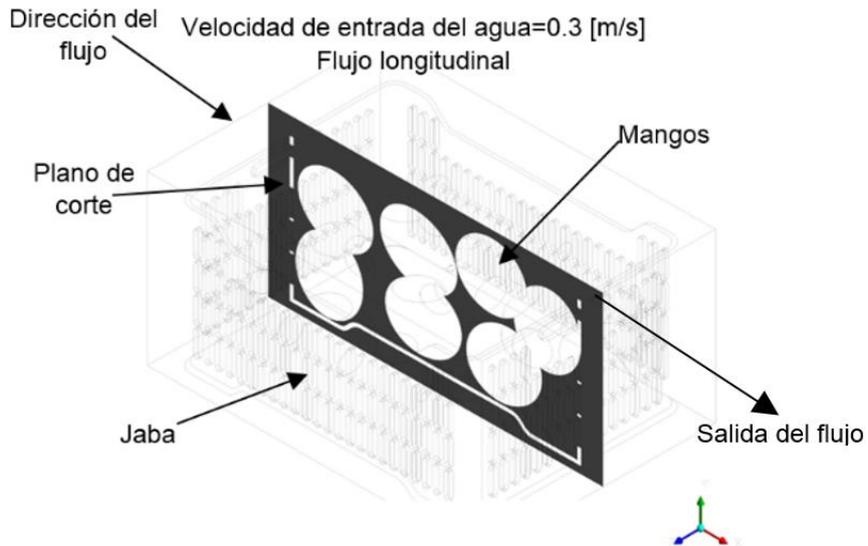


Figura 4. 2. Plano de corte medio en dirección paralela al flujo.

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar la temperatura se establece un plano de análisis representativo. En este caso, es de interés la temperatura a la salida de la jaba, luego de que el flujo transite por los mangos y la jaba, es decir, después del proceso de transferencia de calor en estado estacionario, esto se aprecia en la Figura 4.3.

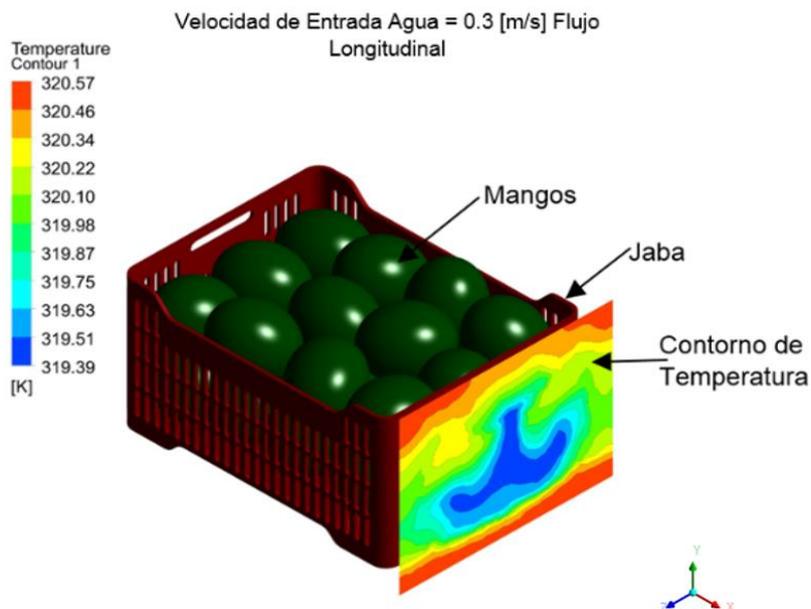


Figura 4. 3. Contorno de temperatura a la salida del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

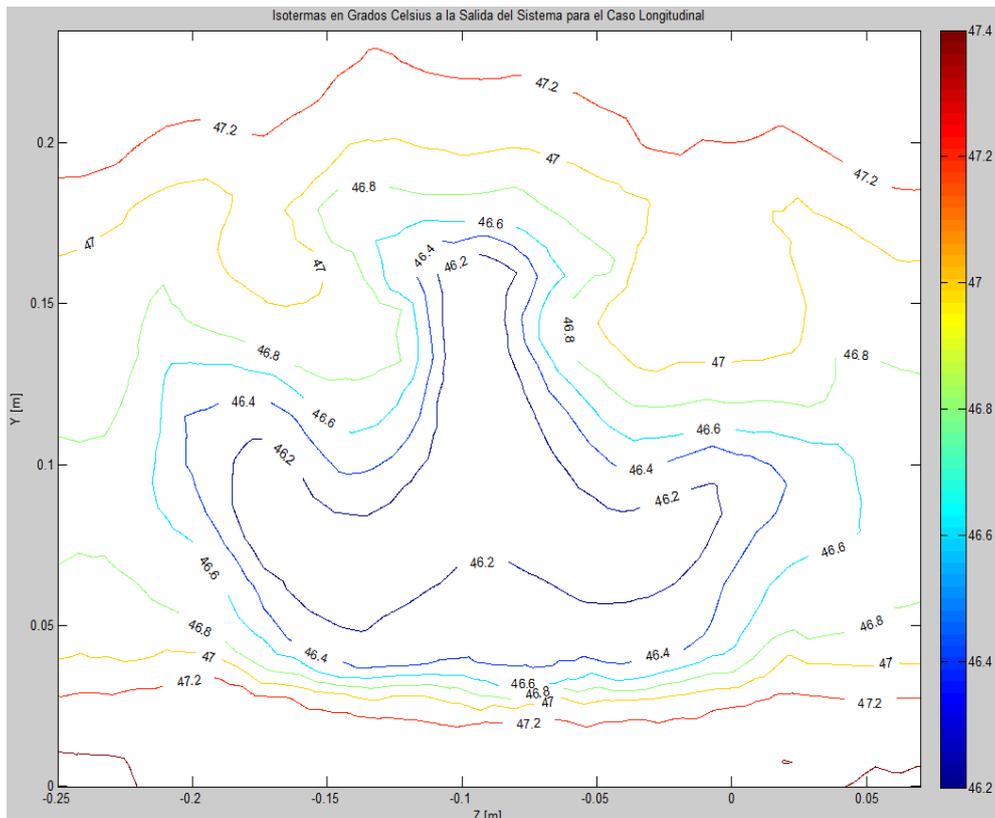


Figura 4. 4. Isothermas en la sección de salida del sistema jaba/mango simplificado en el caso longitudinal.

Fuente: Elaboración propia.

Para mayor detalle, en la Figura 4.4 se muestran las curvas isotérmicas presentes a la salida del sistema jaba/mago simplificado en el caso longitudinal.

La temperatura media del agua en la sección de salida del sistema es de 47°C, es decir, 0.5°C menos a la temperatura del agua a la entrada del dominio computacional.

Para analizar las otras propiedades se utiliza el plano de análisis en la sección media y con dirección del flujo y perpendicular a la base de la jaba mostrado en la Figura 4.2. Se ha analizado la presión como se observa en la Figura 4.5. Existe una región de alta presión en la entrada a las zonas cercanas a la pared de la jaba. La caída de presión se debe a las pérdidas en energía de disipación viscosa debido a los esfuerzos de corte al contacto del fluido con las paredes sólidas (mangos-jaba).

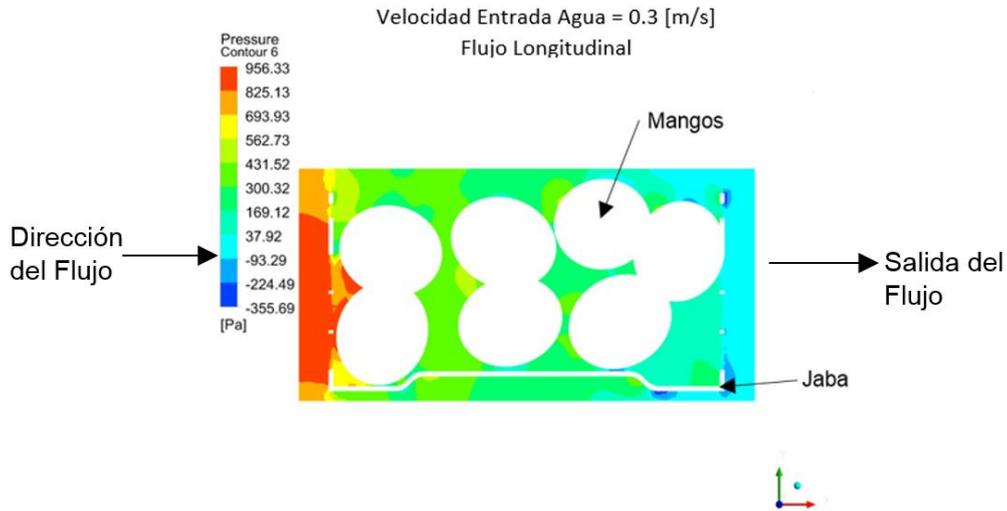


Figura 4. 5. Contorno de presiones distribuido en el plano medio de corte.

Fuente: Elaboración propia.

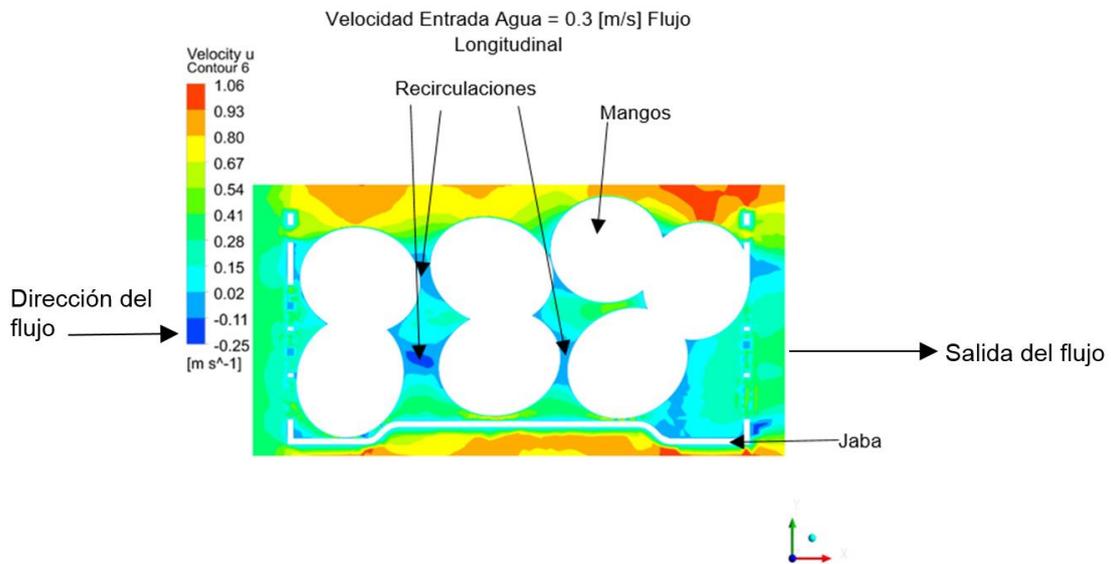


Figura 4. 6. Distribución espacial de la componente X de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, en la Figura 4.6 se puede observar la distribución espacial de la componente X de la velocidad del agua. En las zonas donde se observan cantidades negativas es donde se dan recirculaciones (es decir, flujo que va en el sentido X negativo). Estas recirculaciones son causadas por gradientes positivas de presión (lo que explica que el flujo vaya en sentido contrario en esas zonas) dado que al pasar el fluido por las paredes de los mangos se genera una pérdida de presión por fricción.

4.1.2. Análisis y descripción de parámetros del caso transversal

De manera similar al caso longitudinal se observa en la Figura 4.7 la dirección del flujo. El flujo sigue la dirección del eje Z en el sentido negativo como se puede apreciar. En la Figura 4.8 se muestra el plano de corte en la sección media de la jaba, paralelo a la dirección del flujo.

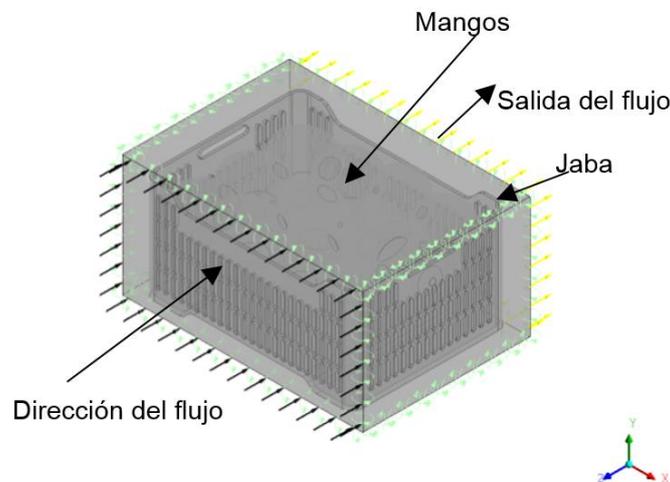


Figura 4. 7. Caso transversal.

Fuente: Elaboración propia.

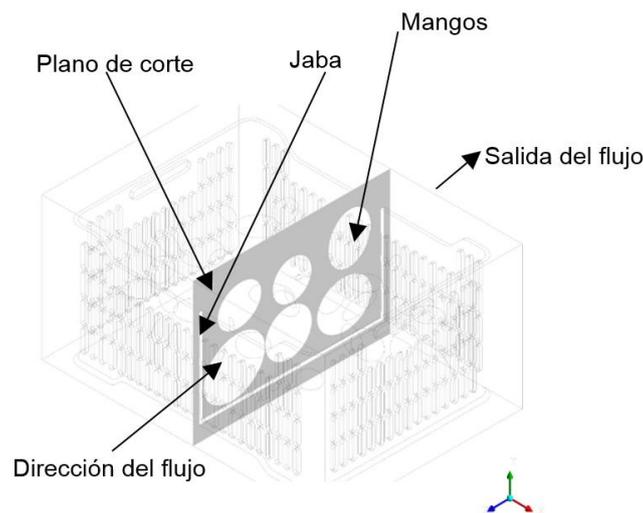


Figura 4. 8. Plano de corte la sección media de la jaba paralelo a la dirección del flujo.

Fuente: Elaboración propia.

Se observan en la Figura 4.9 las curvas isotérmicas en la sección de salida del sistema jaba/mango simplificado para el caso transversal.

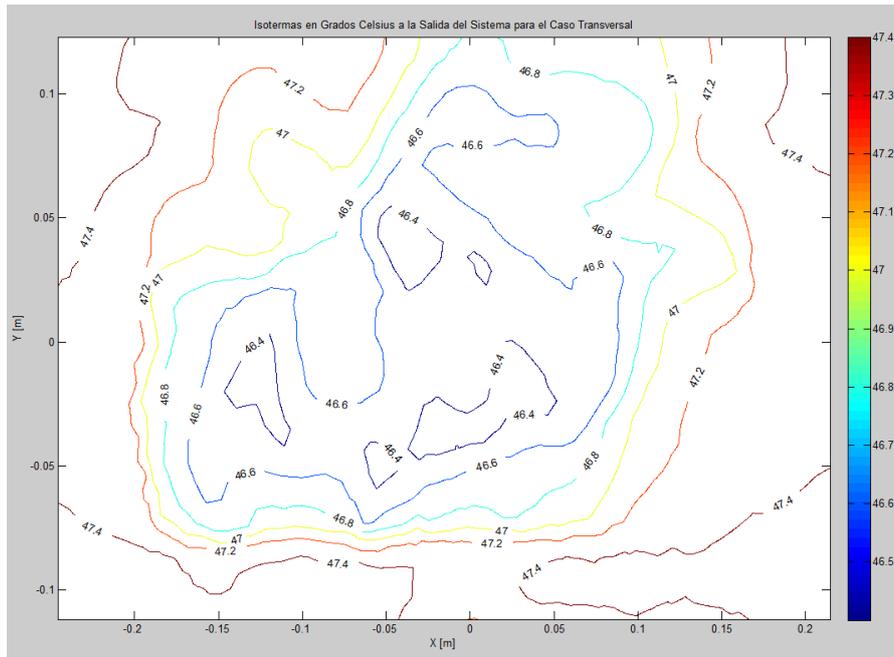


Figura 4. 9. Isotermas en la sección de salida del sistema jaba/mango simplificado en el caso transversal.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura media del agua en la sección de salida es de 47.2°C. Es decir, 0.3°C menor a la temperatura del agua a la entrada del dominio computacional.

En la Figura 4.10 se observa el contorno de presiones distribuido espacialmente. Se observa que las presiones en la entrada son altas al encontrarse con las paredes de la jaba ya que al disminuir la velocidad hay un aumento de presión. Luego, entre los mangos se da una disminución de la presión dado que la velocidad del agua se incrementa por la presencia de una sección más estrecha.

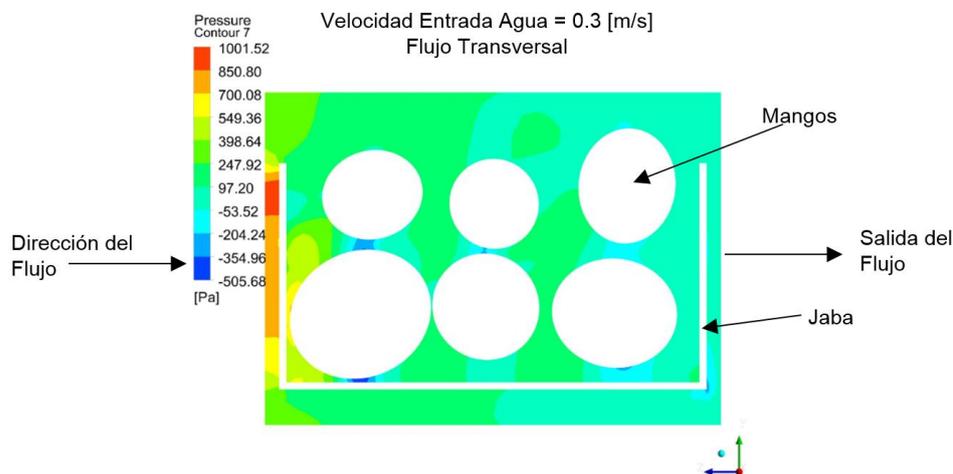


Figura 4. 10. Contorno de presiones distribuido espacialmente.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.11 se observa el contorno de la componente Z de la velocidad. En dicha figura se aprecia que donde se presenta velocidad positiva (en contra del sentido del flujo, es decir, en el sentido Z positivo) se tienen recirculaciones cuya explicación de su existencia ya se fundamentó previamente.

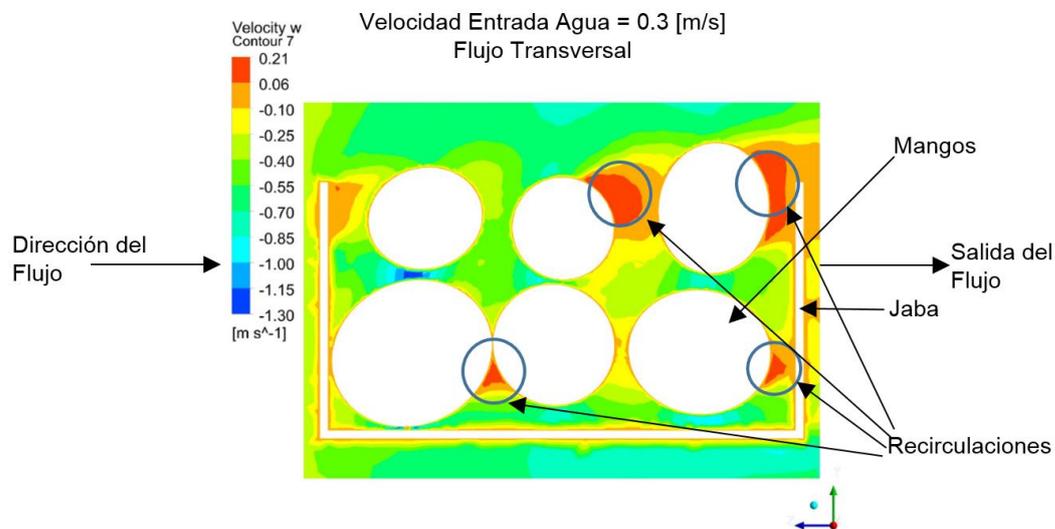


Figura 4. 11. Contorno de la componente Z de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.12 se presenta la existencia de recirculaciones. Además, es evidente el aumento de velocidad entre los mangos debido a la disminución del área de sección transversal.

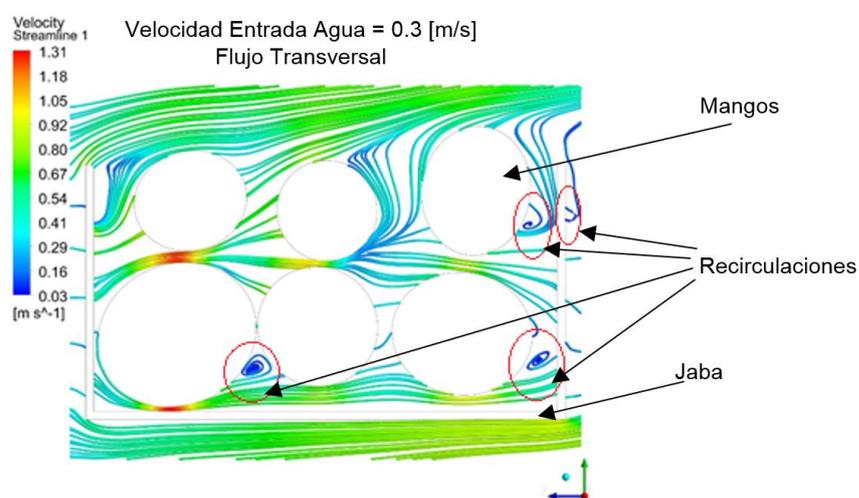


Figura 4. 12. Líneas de corriente en el plano medio de corte.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Análisis paramétrico y comparativo de los casos longitudinal y transversal

Se realiza un conjunto de simulaciones para los casos longitudinal y transversal que permiten estimar los distintos parámetros a partir de la velocidad de entrada que se pretende variar en el sistema de tratamiento hidrotérmico “híbrido”.

Los parámetros a estimar con la simulación son:

- Coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio entre la superficie de los mangos y el flujo de corriente libre, \bar{h} .
- La temperatura media de salida del agua después de pasar por el sistema, \bar{T}_{sal} .
- El flujo de calor sobre los mangos, \dot{q}'' .

El coeficiente convectivo de transferencia de calor aumenta a medida que se eleva la velocidad de corriente libre del agua debido a que el número de Nusselt es proporcional al número de Reynolds según la ecuación (1.15). Este comportamiento de crecimiento se observa claramente en la Figura 4.13. Además, se observa que el coeficiente convectivo para el caso transversal es mayor que el del caso longitudinal por lo que el primer caso favorece una mayor transferencia de calor. Los datos se ajustan con referencia a la (1.15) teniendo como resultados la ecuación (4.1) (caso longitudinal) y la (4.2) (caso transversal).

$$Nu = 0.03459 Re^{0.9} \quad (4.1)$$

$$Nu = 0.0317 Re^{0.91} \quad (4.2)$$

Para llegar a la ecuación (4.1) y (4.2), se procede a mostrar en la Tabla 4.1, los valores de las propiedades constantes utilizadas para calcular el número de Nusselt y de Reynolds, respectivamente.

Tabla 4. 1. Propiedades.

Propiedad	Valor
Longitud característica del sistema jaba/mango simplificado (L_c)	0.83m
Viscosidad dinámica del agua a la temperatura de corriente libre del flujo (μ_w)	0.0005706 kg / (m · s)
Conductividad térmica del agua a la temperatura de corriente libre del flujo (k_f)	0.6406 W / (m · K)

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 4.14 y 4.15 se muestran los valores del número de Nusselt en función del número de Reynolds obtenidos por simulación, con el caso de una esfera bañada por un flujo convectivo (Whitaker, 1972) y las ecuaciones (4.1) y (4.2), respectivamente, tanto para el caso longitudinal como transversal.

Se observa en la Figura 4.16 que a medida que aumenta la velocidad de corriente libre del agua, la temperatura media a la salida disminuye. Esto se debe a que el agua entra a 320.65K (47.5°C) y pasa menos tiempo intercambiando calor con los mangos a medida que la velocidad se incrementa. Además, difieren ambos casos al tener que el caso transversal se da una menor pérdida de energía térmica debido a que, al estar en orientación transversal, el agua recorre una menor longitud (recorre el ancho de la jaba) que en el caso longitudinal (en este caso recorre una distancia igual al largo de la jaba).

En la Figura 4.17, se aprecia que a medida que aumenta la velocidad de corriente libre del agua, el flujo de calor sobre los mangos aumenta. Este es un dato muy importante dado que se puede acelerar el proceso térmico colocando una mayor velocidad en los impulsores que fuerzan el movimiento del agua. También se verifica que el caso transversal es más eficiente que el caso longitudinal al tener un mayor flujo de calor sobre los mangos a igualdad de velocidad de corriente libre del agua.

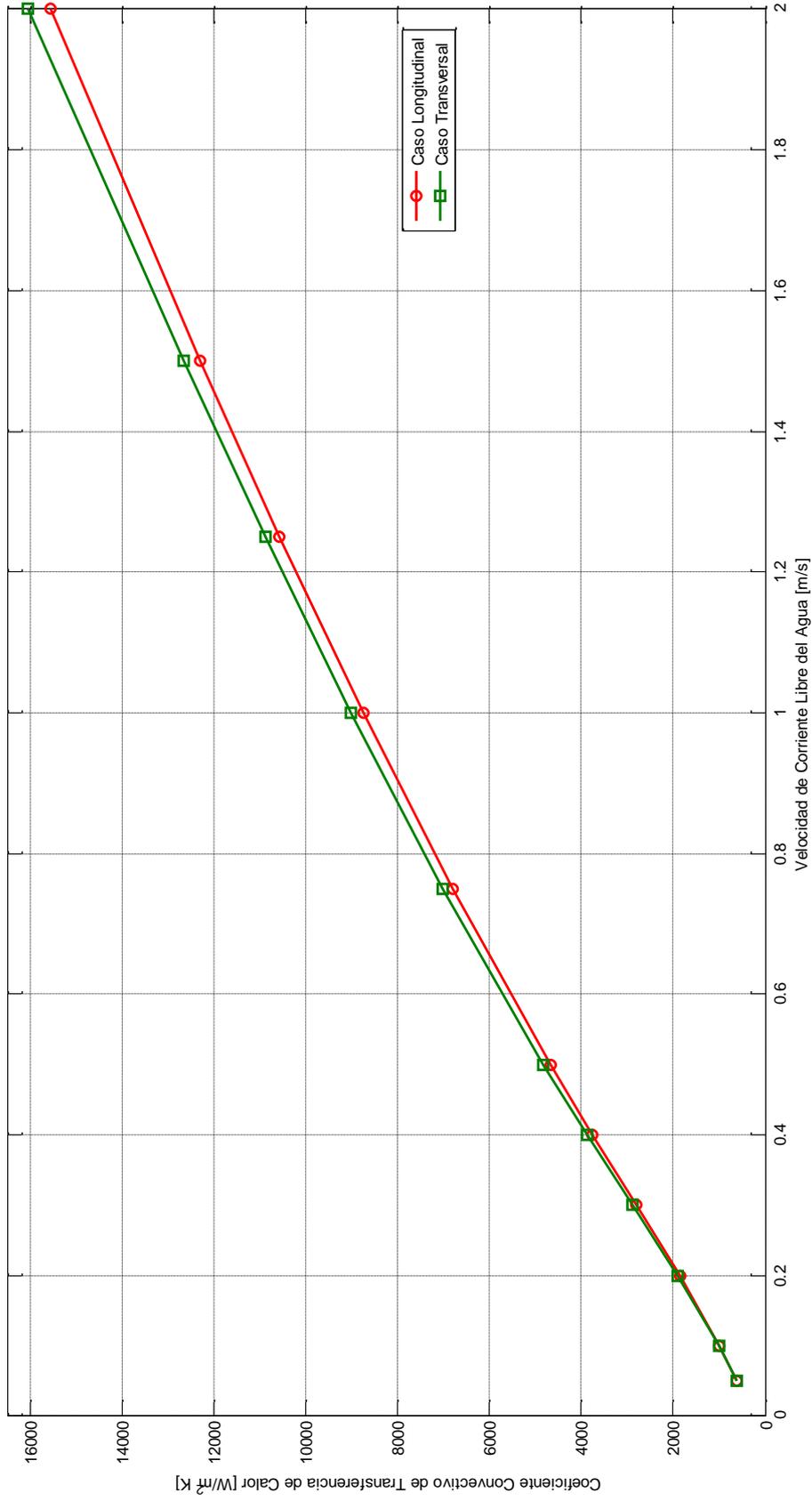


Figura 4. 13. Coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio [W/m^2K] en función de la velocidad de corriente libre del agua [m/s]. Comparación de casos longitudinal y transversal.

Fuente: Elaboración propia.

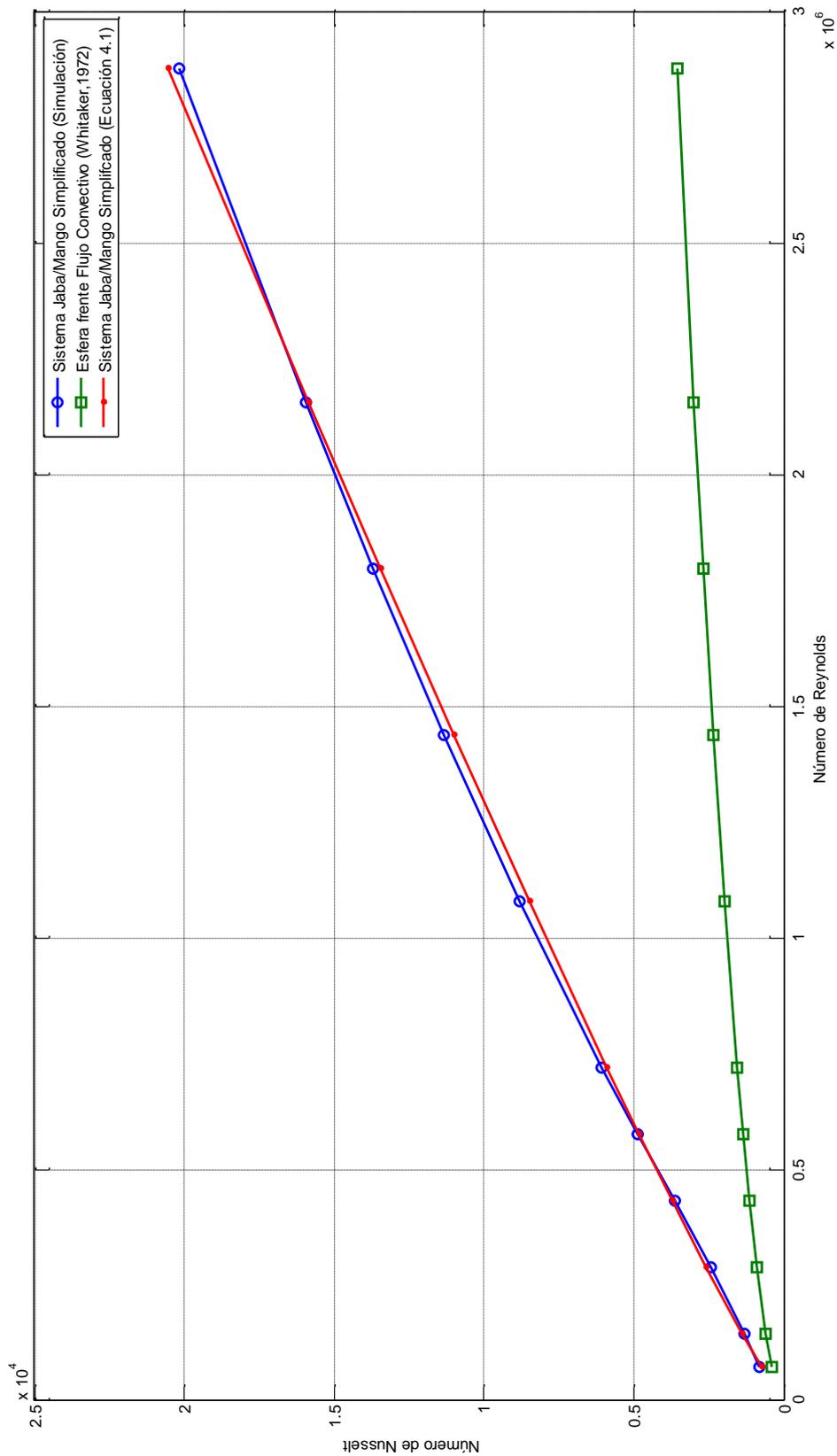


Figura 4. 14. Valores del número de Nusselt en función del número de Reynolds obtenido por simulación, Whitaker (1972) y la ecuación (4.1). Caso longitudinal.

Fuente: Elaboración propia.

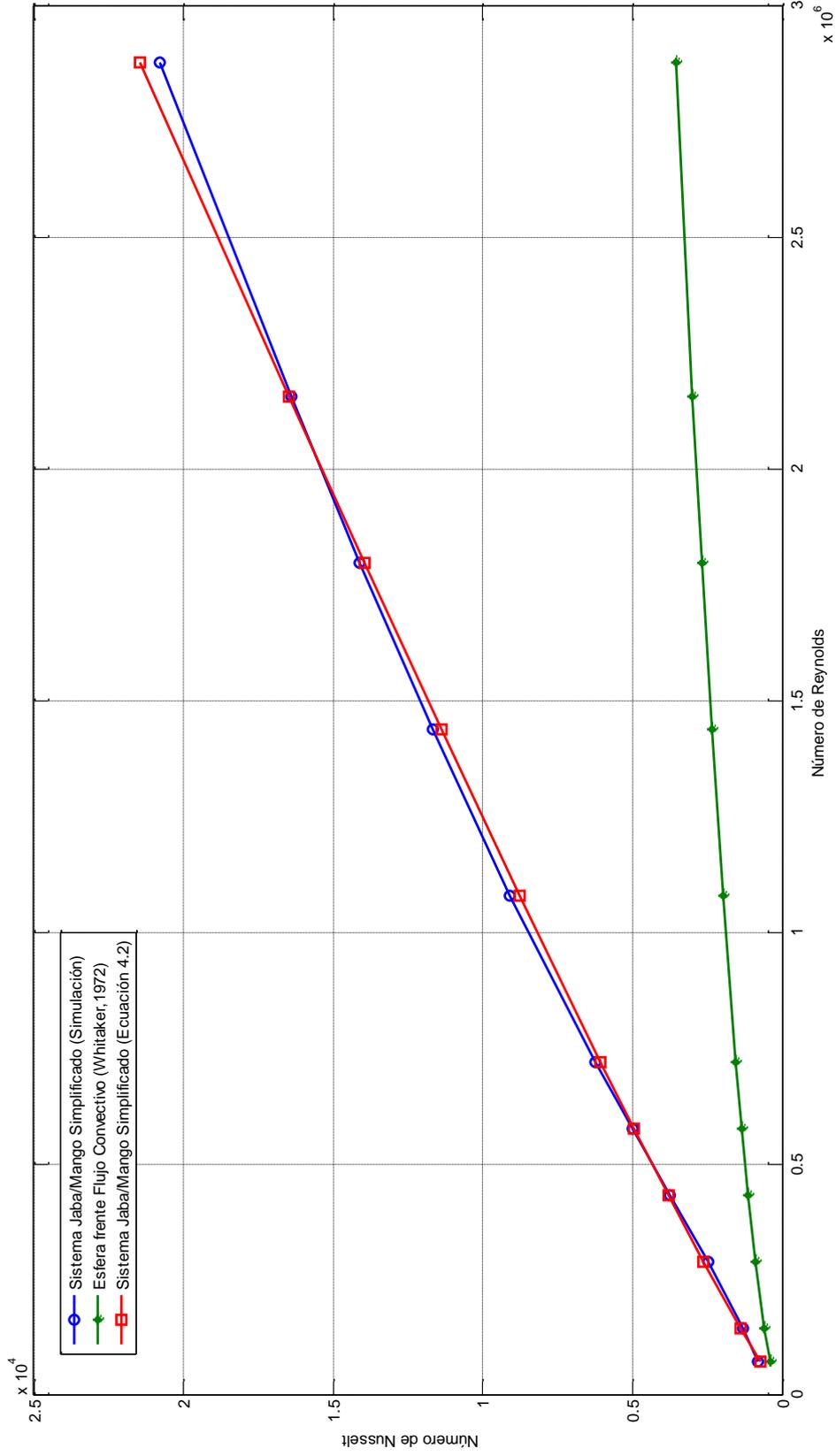


Figura 4. 15. Valores del número de Nusselt en función del número de Reynolds obtenido por simulación, Whitaker (1972) y la ecuación (4.2). Caso transversal.

Fuente: Elaboración propia.

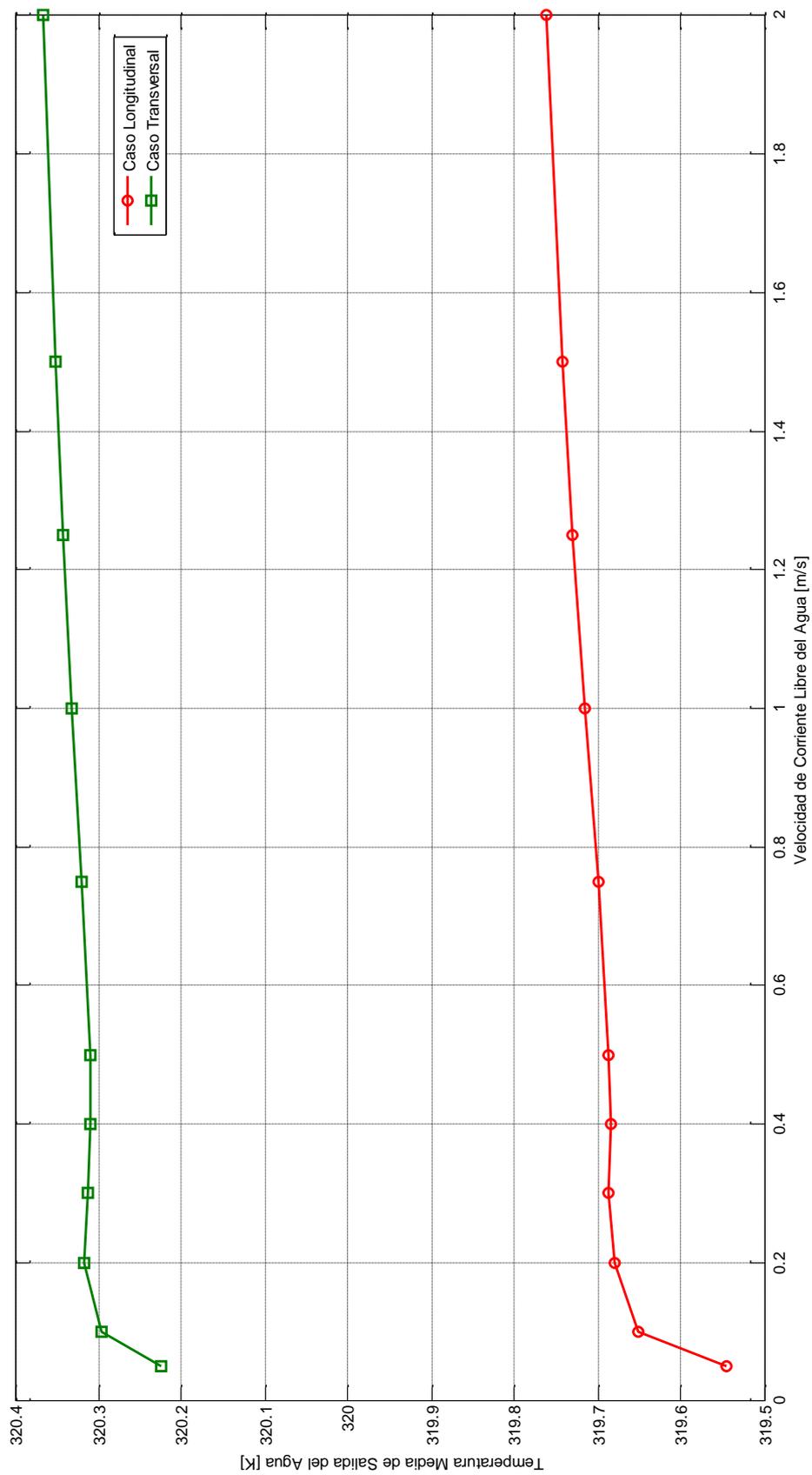
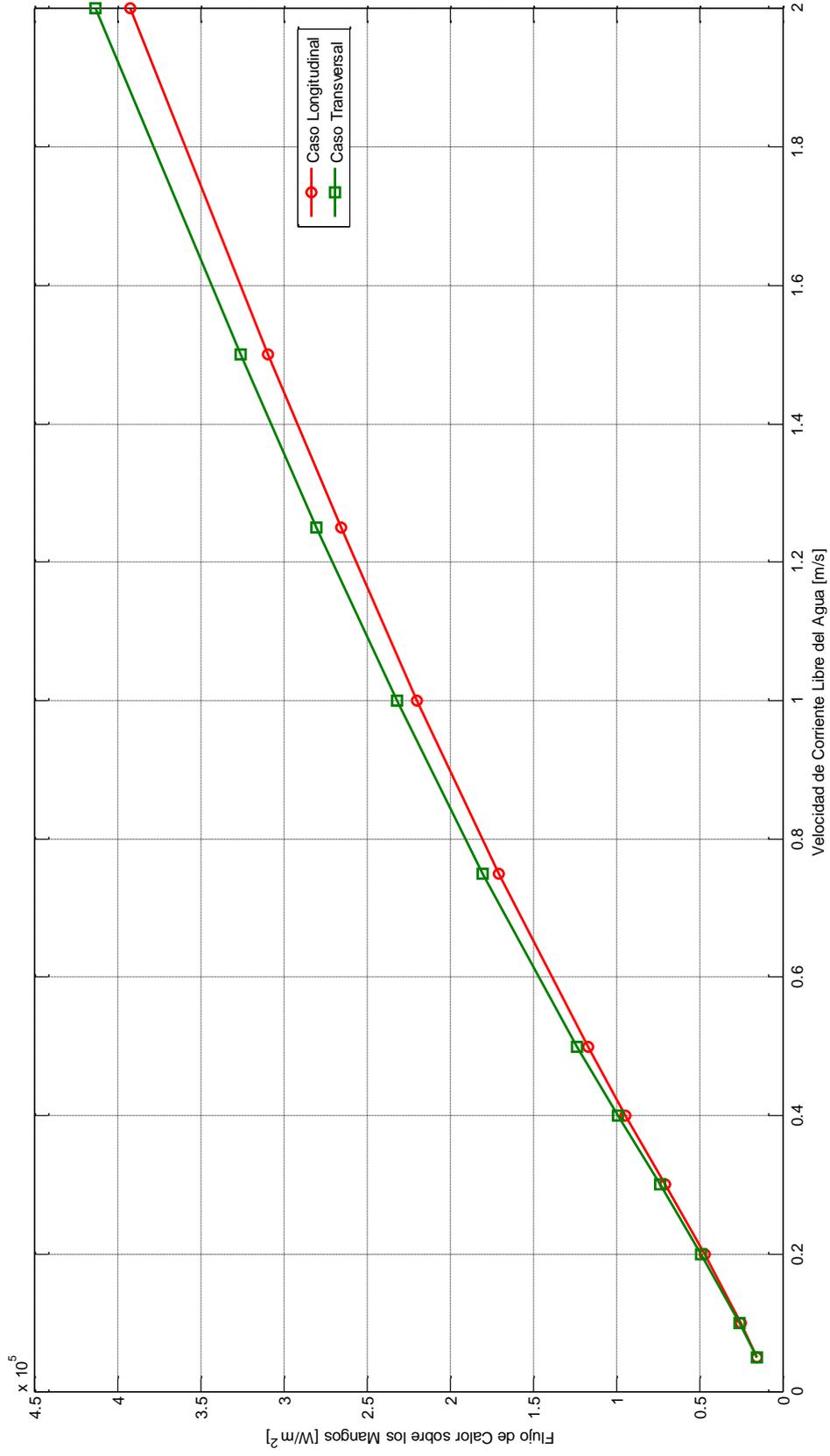


Figura 4. 16. Temperatura media de salida del agua [K] en función de la velocidad de corriente libre del agua [m/s]. Comparación de los casos longitudinal y transversal.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4. 17. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función de la velocidad de corriente libre del agua [m/s].
Comparación de los casos longitudinal y transversal.**

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Resultados numéricos del sistema jaba/mango en estado transitorio

4.2.1. Análisis de transferencia de calor

Se realiza un conjunto de simulaciones en régimen transitorio del sistema jaba/mango simplificado para el caso longitudinal y transversal. Los resultados obtenidos para el caso longitudinal son similares a los del caso transversal por lo que se discuten únicamente los del caso longitudinal. Los resultados del caso transversal se colocan en el anexo B.

Las propiedades obtenidas en las simulaciones están en función del tiempo (durante un intervalo de tiempo de 110 minutos) y para cuatro casos de velocidades de flujo de corriente libre del agua. Estas propiedades son:

- La temperatura media de los mangos, \bar{T}_m . Es importante señalar que esta propiedad media se ha escogido como la temperatura representativa de los mangos en el proceso.
- El coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio entre la superficie de los mangos y el flujo de corriente libre del agua, \bar{h} .
- El flujo de calor sobre los mangos, \bar{q}'' .

En la Figura 4.18, se observa la temperatura media de los mangos en función del tiempo para los 4 casos distintos de velocidad de flujo de corriente libre del agua. Como el protocolo japonés exige que la temperatura final de los mangos sea de 46°C , se traza una recta a esa temperatura para facilitar la identificación de los tiempos a los cuales esta temperatura es alcanzada para los distintos casos de velocidad. Las curvas superiores son las que representan un proceso de calentamiento más rápido. Se aprecia que, las curvas para el caso de 3 m/s y 0.3 m/s son similares no habiendo diferencia significativa de las temperaturas alcanzadas por los mangos, además, son las curvas de los procesos de calentamiento más rápidos. La curva que más se diferencia es el caso de 0.005 m/s , representando el proceso de calentamiento más lento. En la Figura 4.19 se realiza una ampliación en la gráfica en el intervalo de 75 a 110 minutos con el fin de permitir la identificación del tiempo de calentamiento con el cual se cumple con la temperatura de la norma japonesa. La Tabla 4.2 resume el tiempo aproximado al cual los mangos alcanzan dicha temperatura media para los distintos casos de velocidad.

Tabla 4. 2. Tiempo aproximado al cual los mangos alcanzan la temperatura de 46°C para los distintos casos de velocidad de flujo de corriente libre del agua.

Velocidad del flujo de corriente libre del agua [m/s]	Tiempo en el cual los mangos alcanzan la temperatura media de 46°C [Minutos]
3	90
0.3	91
0.05	95.2
0.005	No se alcanza esta temperatura durante los 110 minutos del proceso

Fuente: Elaboración propia.

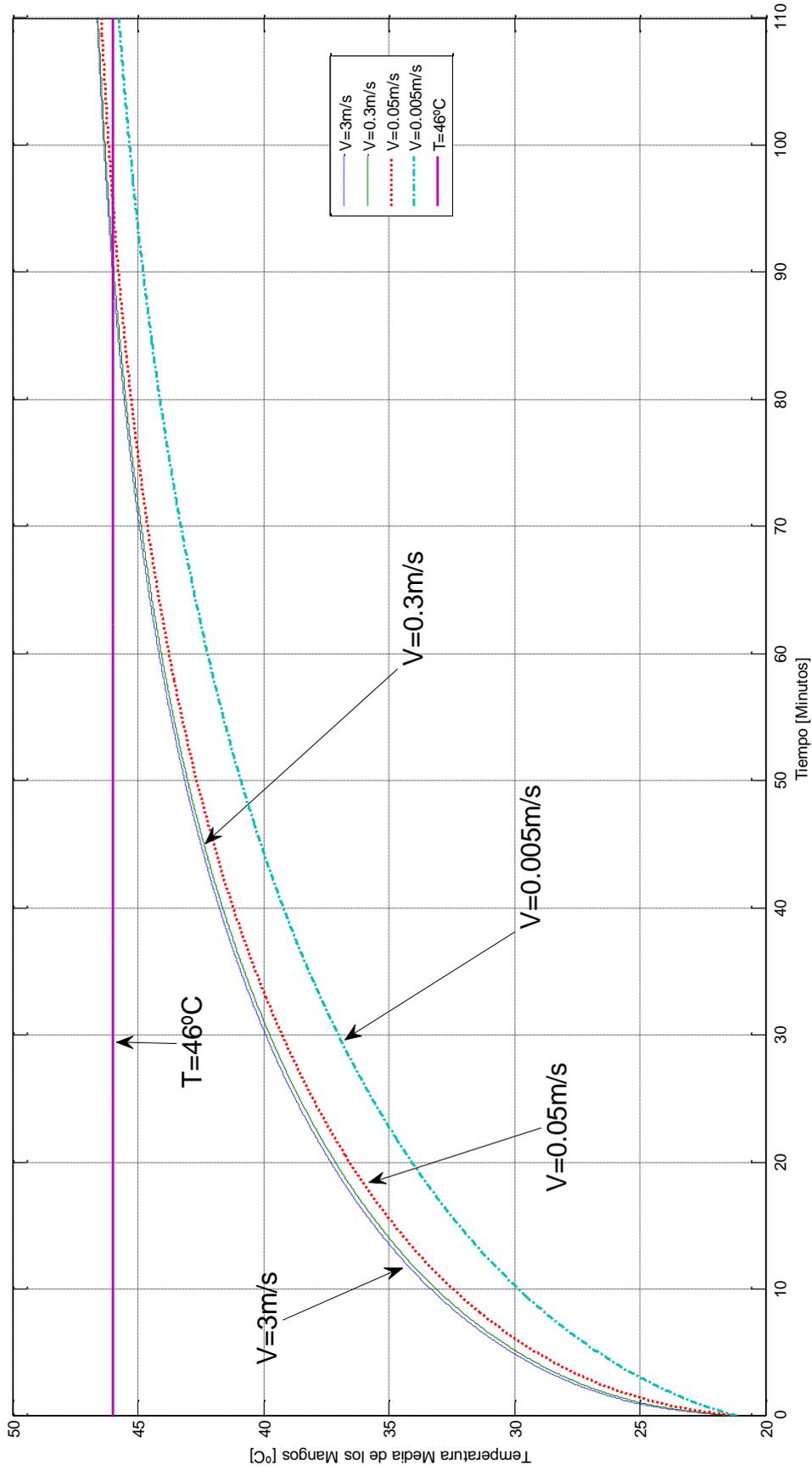


Figura 4. 18. Temperatura media de los mangos [°C] en función del tiempo [Minutos].

Fuente: Elaboración propia.

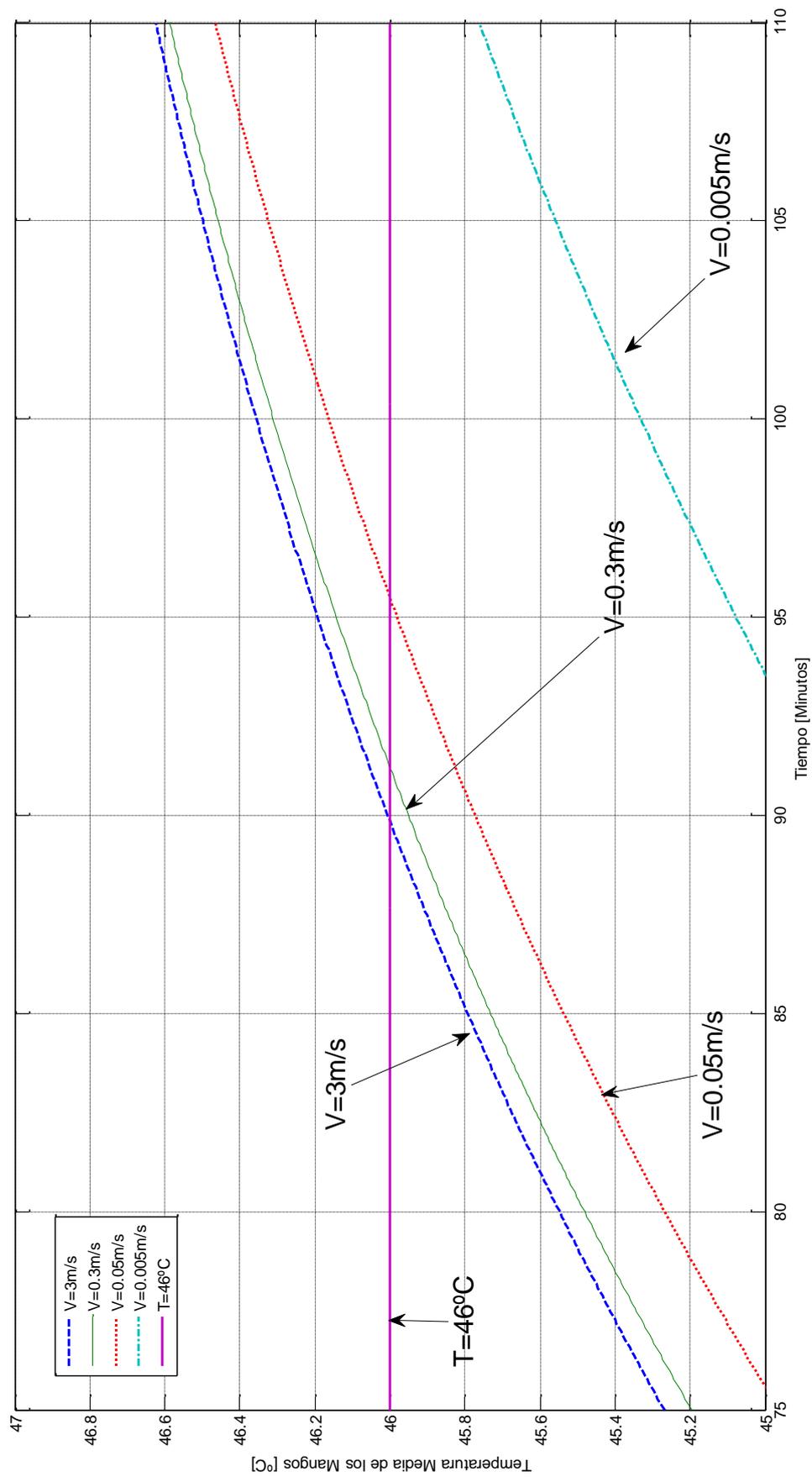


Figura 4. 19. Temperatura media de los mangos [°C] en función del tiempo [Minutos]. Intervalo de 75 a 110 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

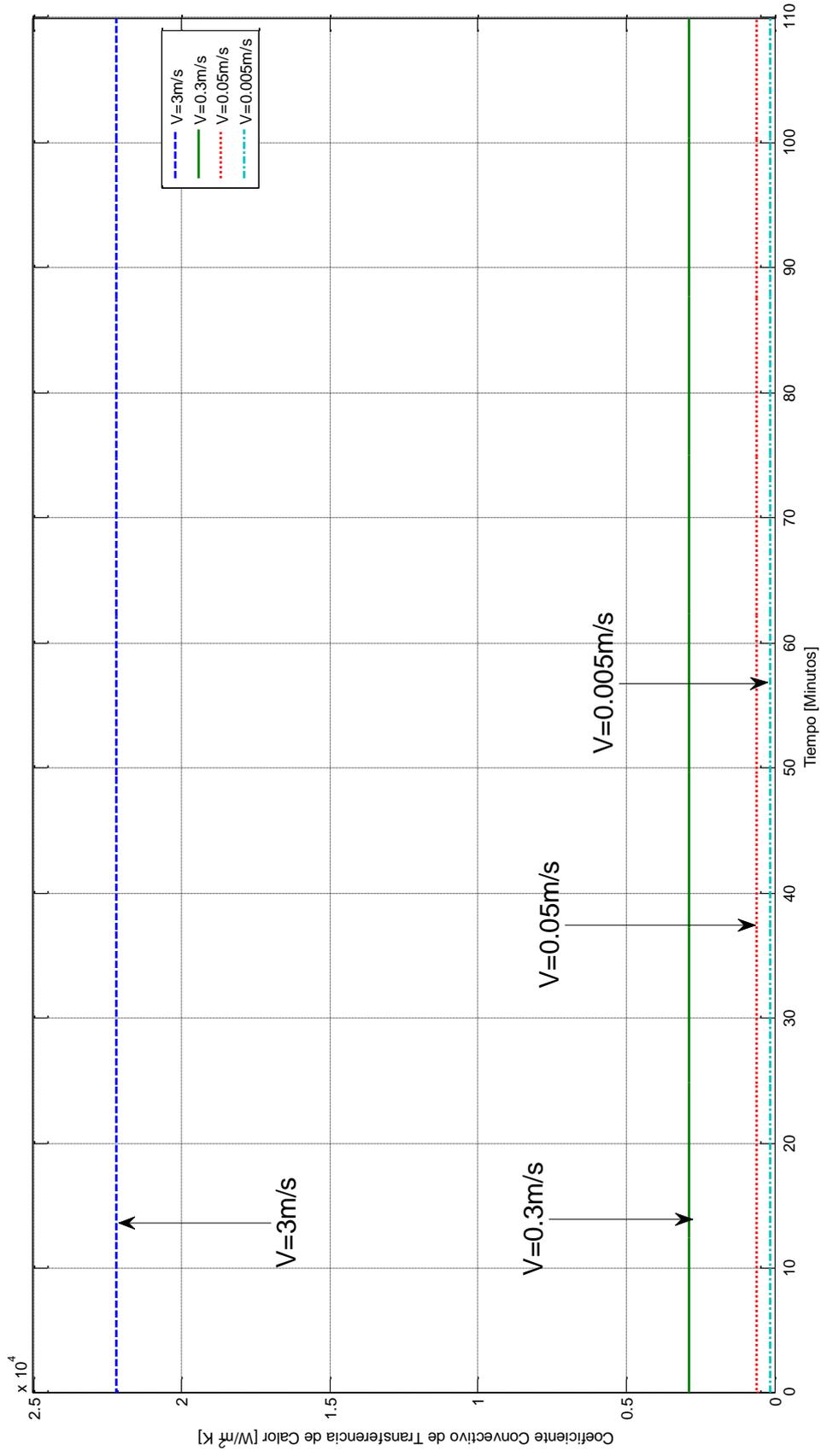


Figura 4. 20. Coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio [$W/m^2 K$] en función del tiempo [Minutos].

Fuente: Elaboración propia.

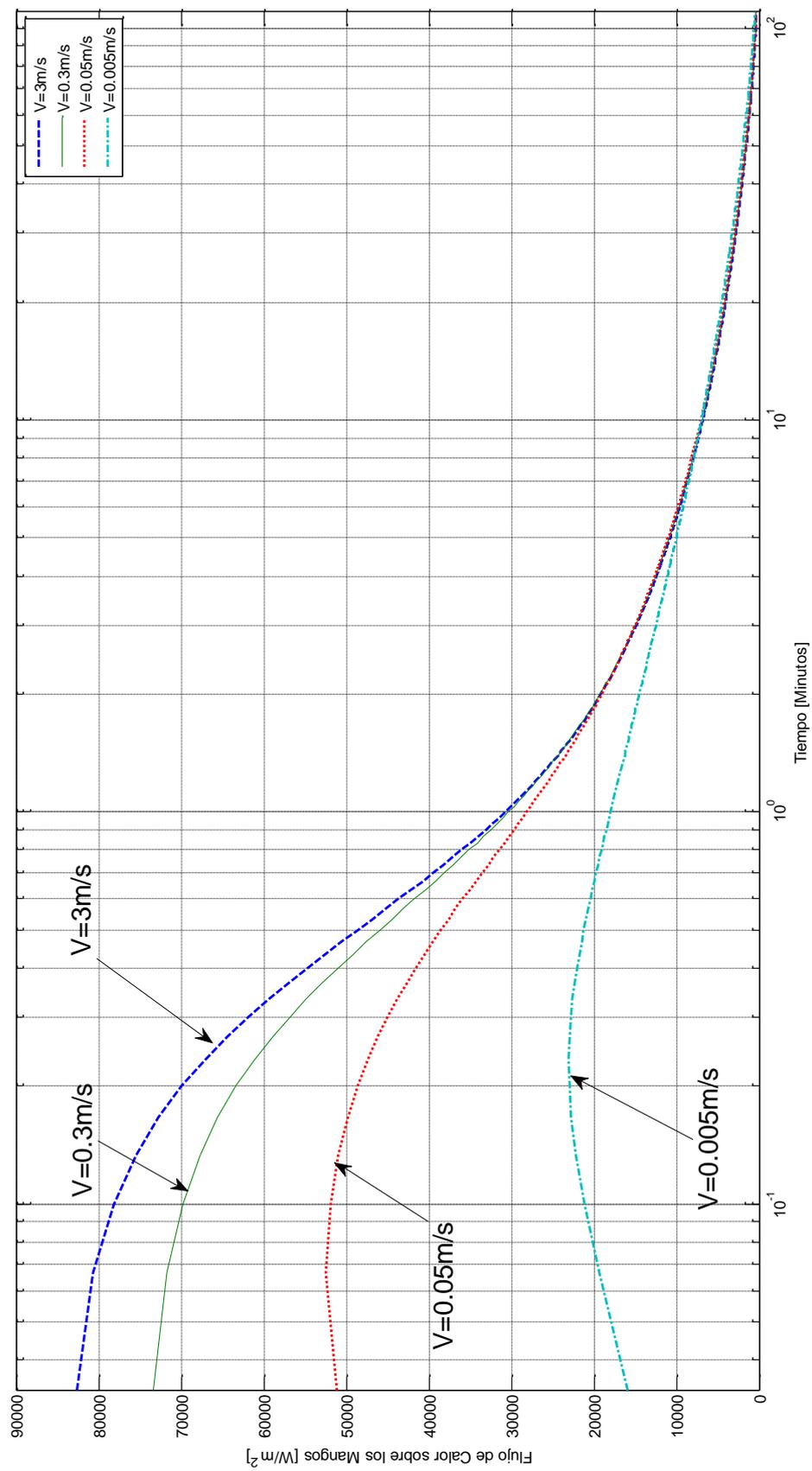


Figura 4. 21. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función del tiempo [Minutos]. La gráfica está en escala semilogarítmica.

Fuente: Elaboración propia.

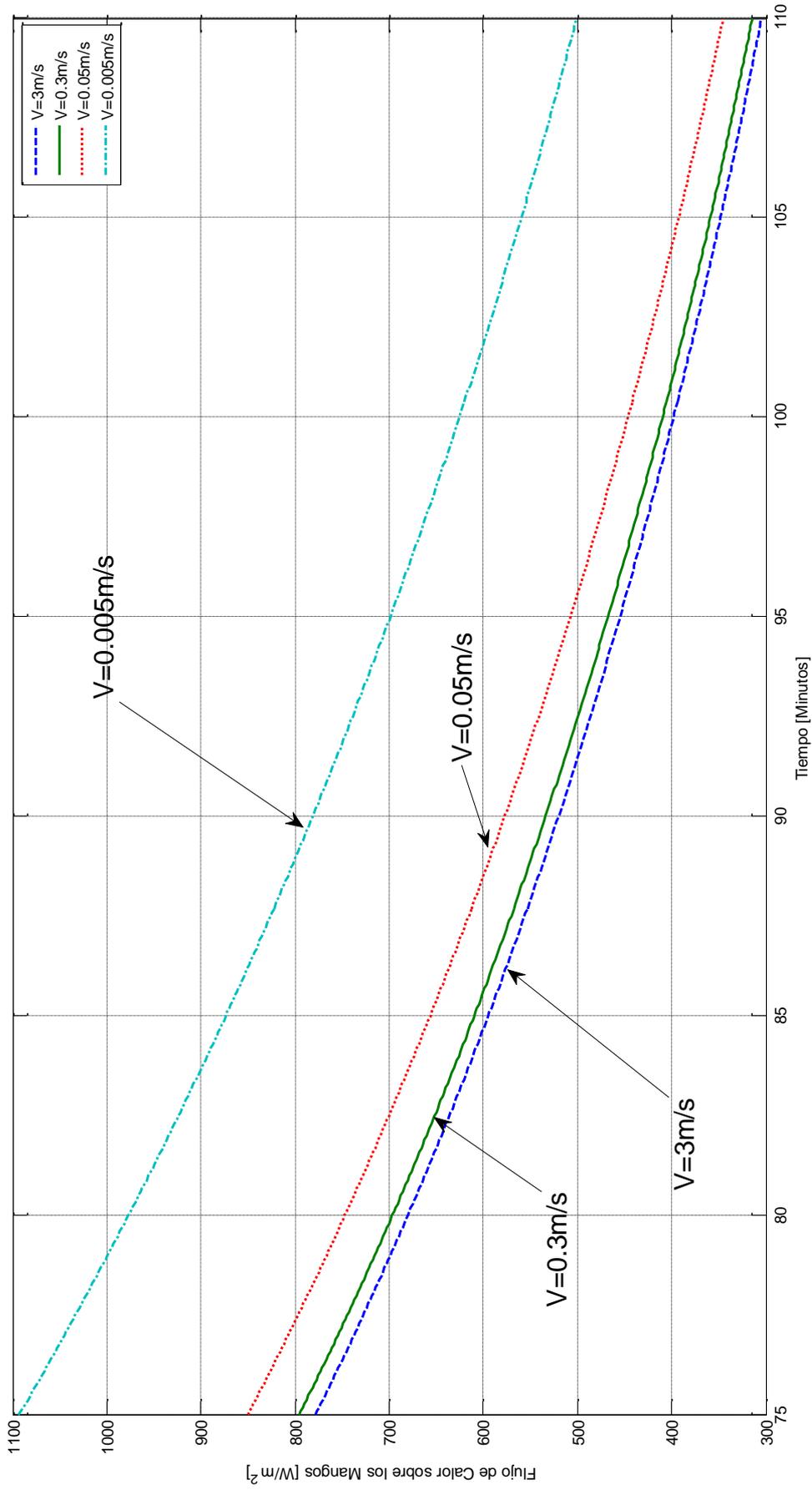


Figura 4. 22. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función del tiempo [Minutos]. Intervalo de 75 a 110 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 4.2, se pone en evidencia que entre las curvas de 3 m/s y 0.3 m/s , existe un desfase temporal de 1 minuto mientras que entre las curvas de 3 m/s y 0.05 m/s dicho desfase es de 5.2 minutos. La curva de 0.005 m/s no alcanza la temperatura exigida durante los primeros 110 minutos.

En la Figura 4.20, se muestran los valores del coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio en función del tiempo para los 4 casos distintos de velocidad. Se aprecia que esta propiedad se mantiene a efectos prácticos constante en el tiempo para los 4 casos. Para la velocidad de 3 m/s el coeficiente convectivo tiene el mayor valor mientras que para la velocidad de 0.005 m/s tiene el menor valor.

En la Figura 4.21, se presenta el flujo de calor sobre los mangos en función del tiempo. Se utiliza una escala semilogarítmica para facilitar la diferenciación de las curvas. Es apreciable que a medida que se incrementa la velocidad de flujo de corriente libre del agua, el flujo de calor es mayor en el momento inicial del proceso de calentamiento debido a que se tiene un mayor coeficiente convectivo. Además, se observa un mayor cambio brusco en la curva al inicio a mayor velocidad de flujo de corriente libre del agua. Para los 10 minutos después del proceso, las curvas prácticamente llegan a ser iguales para cualquier caso de velocidad. En la Figura 4.22 se realiza una ampliación en el intervalo de 75 a 110 minutos donde se observa que a los 110 minutos del proceso, los valores finales del flujo de calor son relativamente cercanos a cero debido a que la temperatura media alcanzada por los mangos es muy cercana a la temperatura del flujo de corriente libre del agua. Las curvas que se encuentran en la parte inferior de la gráfica, son las de los procesos de calentamiento más rápidos. Cabe señalar que para la velocidad de 0.005 m/s , el proceso de calentamiento es más lento. Además, entre 0.3 m/s y 3 m/s no hay diferencia significativa en la duración del proceso de calentamiento aunque representan los procesos de calentamiento más rápidos.

4.2.2. Análisis comparativo de transferencia de calor de una esfera fría sometida a una corriente de agua caliente bajo las mismas condiciones iniciales definidas para el proceso hidrotérmico

En esta sección, se compara los resultados analíticos para una esfera fría sometida a una corriente de agua caliente bajo las mismas condiciones iniciales definidas para el proceso hidrotérmico, para la velocidad de 0.05 m/s , con los resultados de simulación para el sistema jaba/mango obtenidos para la misma velocidad.

El objetivo de esta comparación es establecer si el sistema representado por una esfera con las características térmicas del mango, puede representar el sistema jaba/mango simplificado de tal manera que, el modelo matemático desarrollado por Taler & Octón (2014), y descrito en la sección 1.1.12, y por lo tanto, las ecuaciones de temperatura (1.57) y (1.61), son válidas y aplicables al sistema jaba/mango simplificado.

Para establecer los resultados analíticos para la velocidad de 0.05 m/s , se utilizan las ecuaciones (1.57) y (1.61), y la Tabla A.1, además, con las propiedades del agua a 47.5°C y del mango que se resumen en la Tabla 4.3. También se hace uso de los números de Fourier, Nusselt, Reynolds y Biot.

Tabla 4. 3. Propiedades del agua a 47.5°C y del mango.

Propiedad	Valor
Longitud característica del sistema jaba/mango simplificado (L_c)	0.83m
Viscosidad dinámica a la temperatura de corriente libre del flujo (μ_∞)	0.0005706 kg / (m·s)
Conductividad térmica de la pulpa del mango (k_m)	0.5 W / (m·K)
Conductividad térmica del fluido a la temperatura de corriente libre del flujo (k_f)	0.6406 W / (m·K)
Difusividad térmica de la pulpa del mango (α_m)	$1.5065 \cdot 10^{-7} m^2 / s$
Longitud característica de una esfera con las propiedades del mango (r_m)	0.055m

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de velocidad de $0.05 m/s$, se calcula un número de Biot igual a 110 y se recurre a la Tabla A.1 del anexo A para establecer las raíces de la ecuación (1.42) a utilizar.

En la Figura 4.23, se muestra la temperatura en el centro del mango en función del tiempo para la velocidad de flujo de corriente libre de agua de $0.05 m/s$. En el caso del modelo de esfera, el calentamiento es más rápido que en el caso del sistema jaba/mango simplificado debido a que éste último es un sistema más complejo conformado por 23 mangos. En la Figura 4.24, se realiza una ampliación entre los 7000 a 9000 segundos de tal manera que se aprecia que la curva analítica para una esfera alcanza los 46°C a los 7400 segundos y la curva de simulación alcanza la temperatura de 46°C a los 8300 segundos. Por lo tanto, ambas curvas tienen un desfase de 900 segundos o de 15 minutos.

En la Figura 4.25, se observa la temperatura media de los mangos en función del tiempo para el caso de velocidad de flujo de corriente libre del agua de $0.05 m/s$. Se evidencia tal como sucede en la Figura 4.23, que el calentamiento del modelo de esfera es más veloz que el de los mangos del sistema jaba/mango simplificado por las mismas razones ya expuestas. Cabe señalar que, la curva analítica para una esfera se ha graficado desde los 400 segundos ya que antes de ellos la aproximación de seis raíces no tiene precisión. En la Figura 4.26 se realiza una ampliación entre los 4000 a 6000 segundos donde se aprecia que la curva analítica para una esfera alcanza los 46°C en 4975 segundos y que la curva de simulación para el sistema jaba/mango simplificado alcanza esta temperatura a los 5750 segundos. Por lo tanto, ambas curvas tienen un desfase de 12.92 minutos.

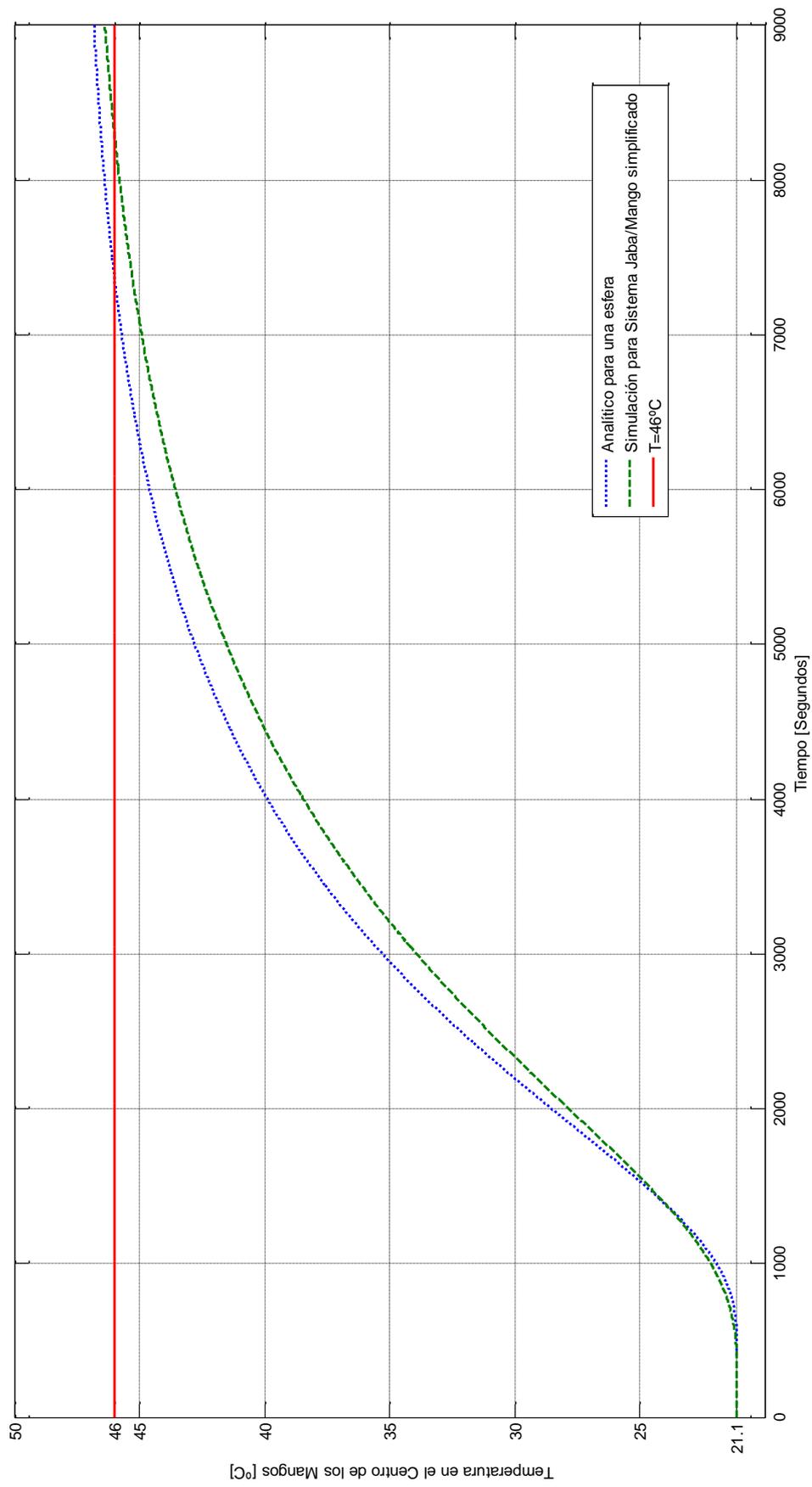


Figura 4. 23. Temperatura en el centro de los mangos [°C] en función del tiempo [Segundos].

Fuente: Elaboración propia.

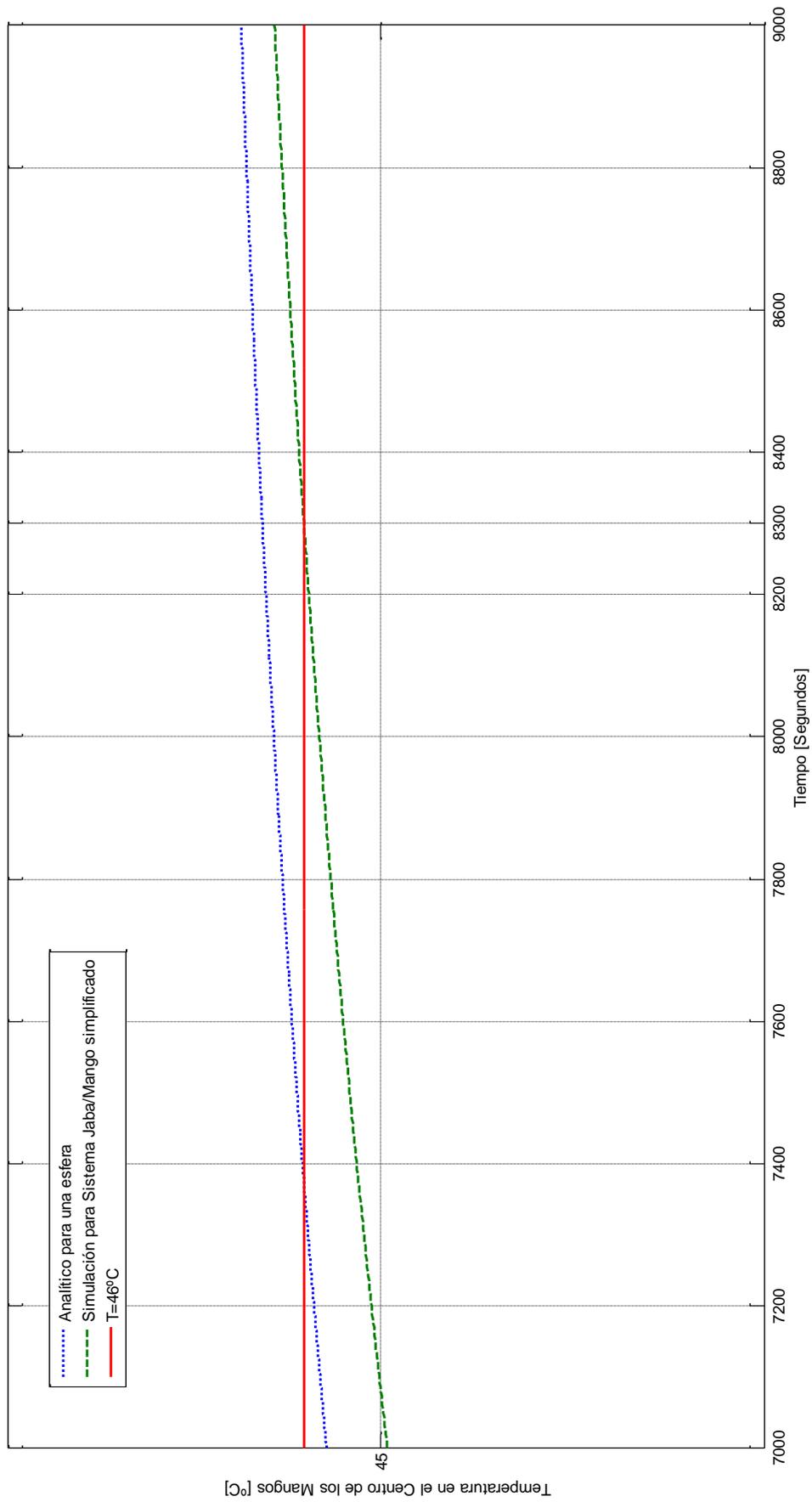


Figura 4. 24. Temperatura en el centro de los mangos [°C] en función del tiempo [Segundos]. Intervalo de 7000 a 9000 segundos.

Fuente: Elaboración propia.

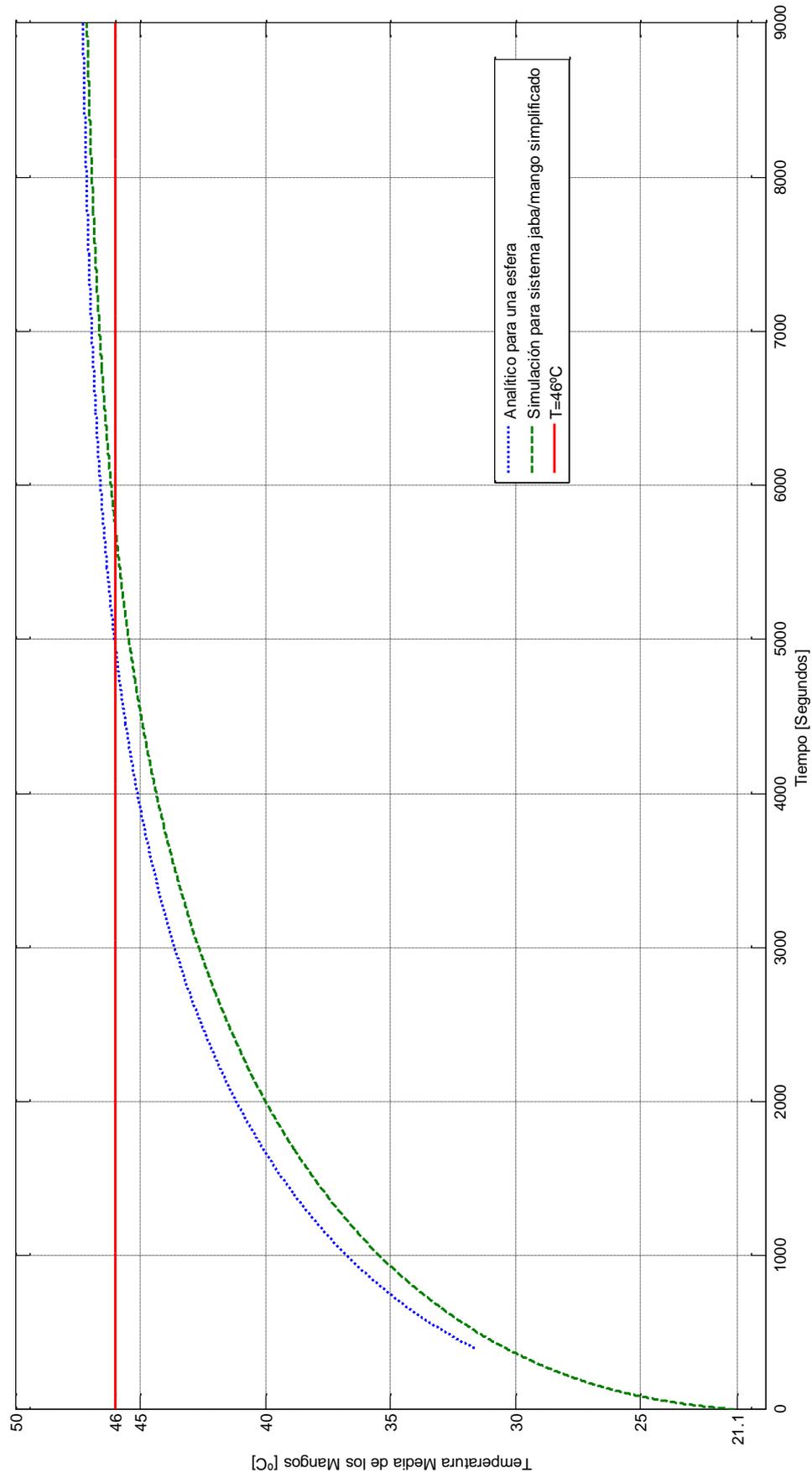


Figura 4. 25. Temperatura media de los mangos [°C] en función del tiempo [Segundos].

Fuente: Elaboración propia.

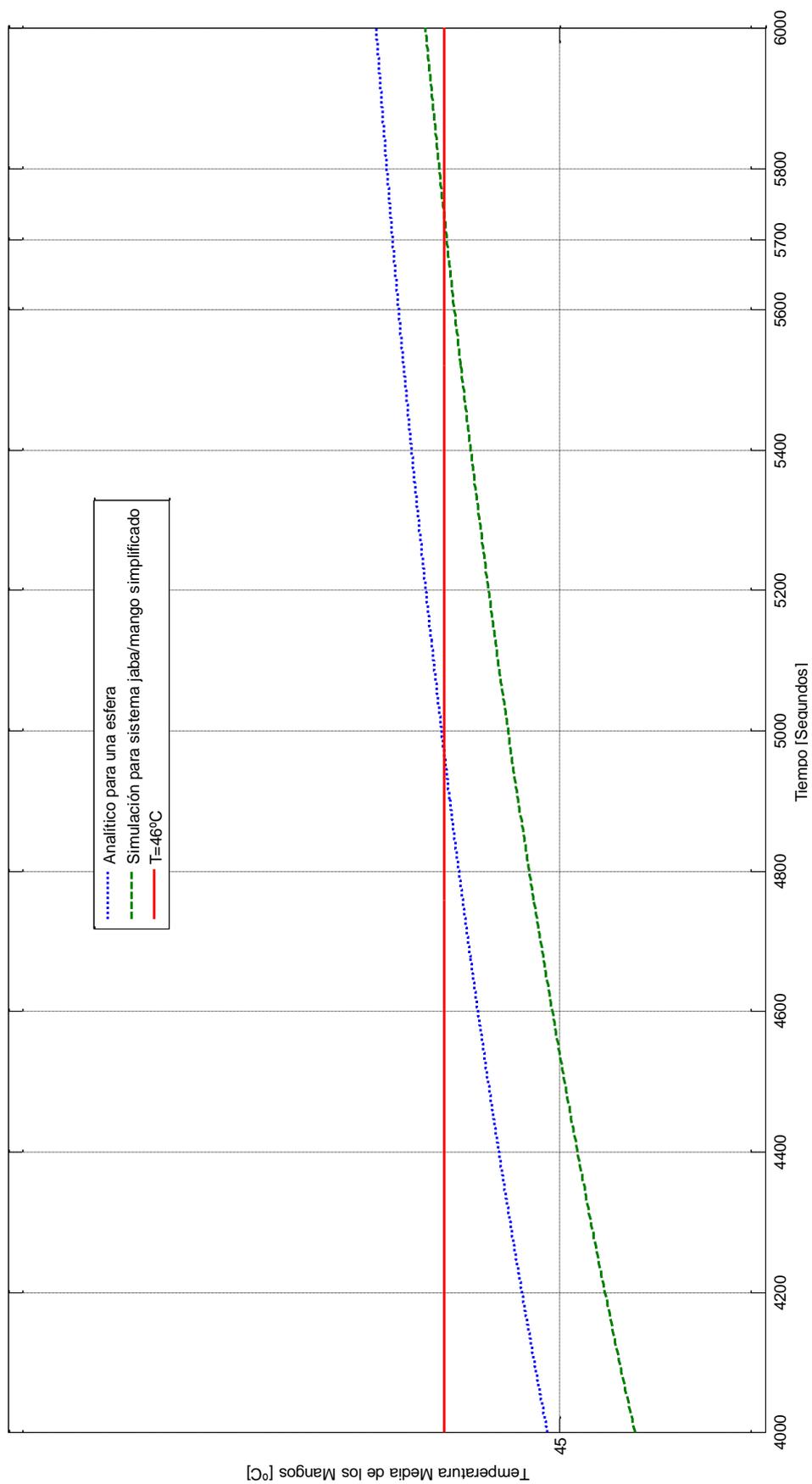


Figura 4. 26. Temperatura media de los mangos [°C] en función del tiempo [Segundos]. Intervalo de 4000 a 6000 segundos.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Resultados experimentales y validación del modelo numérico

En esta sección se comparan los resultados experimentales con los resultados numéricos. De esta manera, se procede a validar el modelo numérico. En la Figura 4.27 se presenta la curva experimental de calentamiento de un mango frente a la curva simulada.

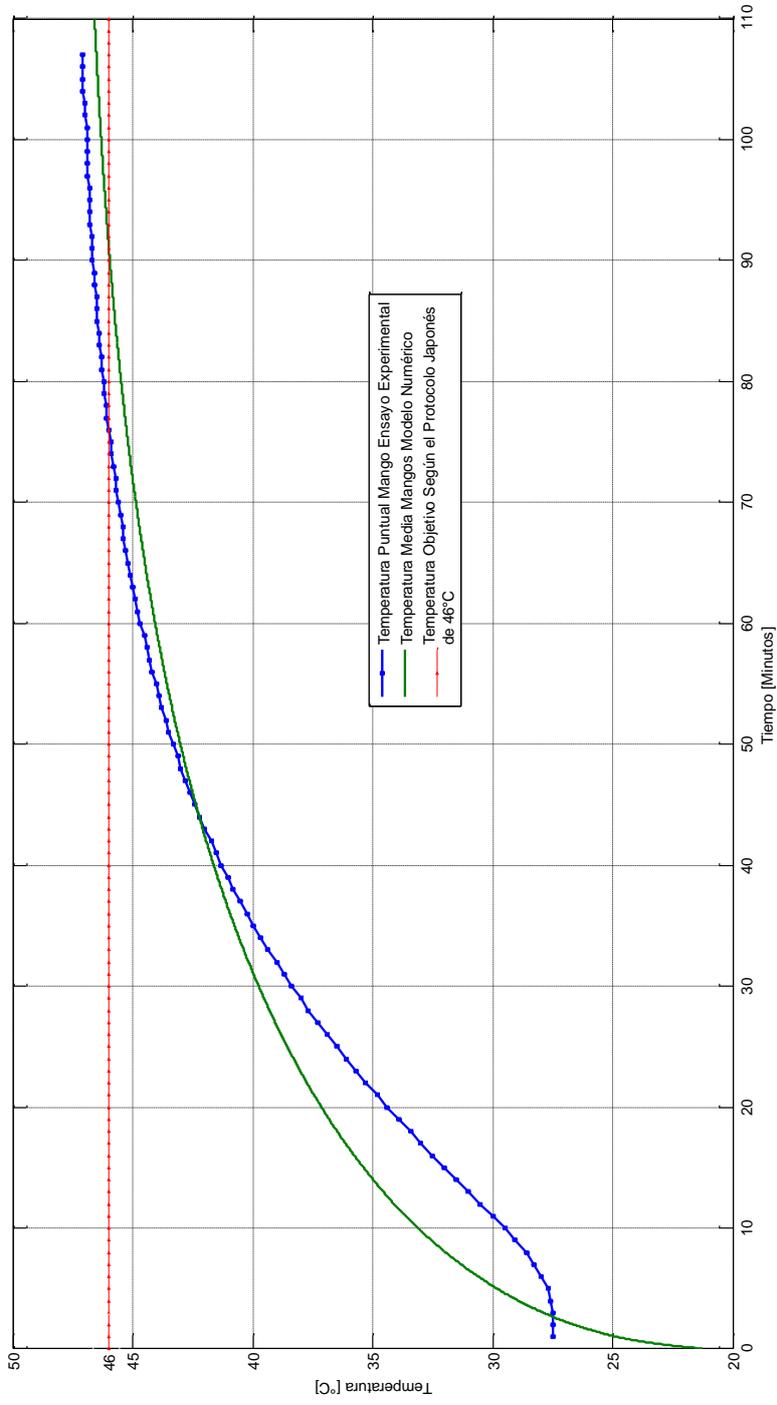


Figura 4. 27. Comparación de la curva de temperatura experimental y simulada en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

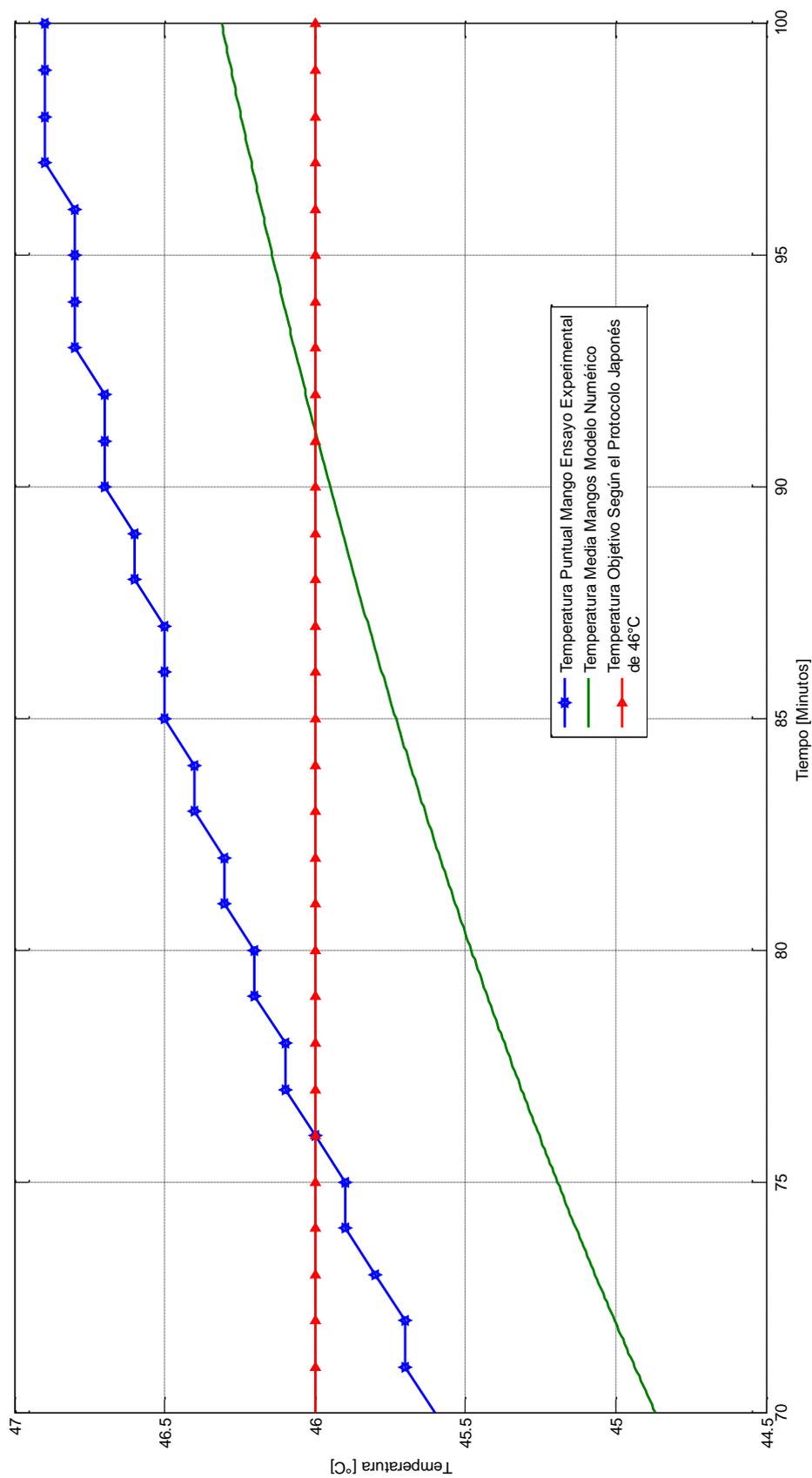


Figura 4. 28. Comparación de la curva de temperatura experimental y simulada en función del tiempo. Intervalo de 70 a 100 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.27 ilustra que ambas curvas tienen el mismo comportamiento, sin embargo, tienen un desfase debido a que la temperatura inicial de los mangos en el ensayo real no fue de 21.1°C , sino, de aproximadamente 27.7°C . En la Figura 4.28, se presentan las curvas de calentamiento de la Figura 4.27 con una ampliación de tal manera que se pueden diferenciar los tiempos en que las temperaturas alcanzan los 46°C . De esta forma, se puede apreciar que el desfase presente es de 15 minutos. No obstante, el modelo numérico ha quedado validado.

Conclusiones

En esta tesis, se utilizó la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con el fin de establecer un modelo numérico que describa el comportamiento del prototipo “híbrido” para el tratamiento hidrotérmico del mango.

Se establecieron criterios que permitan mejorar la eficiencia del proceso de calentamiento, a expensas de aumentar el coeficiente convectivo de transferencia de calor, por medio del incremento de la velocidad del flujo de agua impulsada por los agitadores.

El análisis numérico en estado estacionario permitió visualizar parámetros de interés como la presión, la temperatura, la velocidad y las líneas de corriente para poder discutir el porqué de su comportamiento.

Se estimó una correlación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en función del número de Reynolds para el sistema jaba/mango simplificado.

El análisis paramétrico y comparativo en estado estacionario indicó que la orientación transversal favorece muy ligeramente la transferencia de calor (las propiedades térmicas prácticamente no son afectadas). Por otro lado, el aumento de velocidad del flujo de agua sí favorece la transferencia de calor, sin embargo, este análisis no indica hasta qué punto resulta favorable, lo cual sí es indicado por el análisis en estado transitorio.

El estudio demostró que el modelo matemático de calentamiento conductivo transitorio de una esfera bañada por un flujo convectivo a igualdad de condiciones iniciales que el proceso hidrotérmico, podría representar el calentamiento simulado por el modelo numérico, se concluyó que el modelo de esfera, se calienta mucho más rápido que los 23 mangos del sistema jaba/mango simplificado, debido a su alta simplicidad geométrica. En este caso, esto es fácil de corroborar por simple lógica, dado que un solo mango se calienta mucho más rápido que 23 mangos elipsoidales sólidos. Esto implica que, el modelo matemático propuesto por Taler & Octon (2014) no representaría de manera significativa el calentamiento del proceso real, de 175 canastas con mangos irregulares.

Es importante resaltar que el modelo numérico representa de manera más simplificada la complejidad geométrica y operacional del prototipo de tanque “híbrido” para el tratamiento hidrotérmico de mango operando bajo los protocolos fitosanitarios dados por EE.UU y Japón.

Con los resultados experimentales, se pudo validar el modelo como representativo, con un desfase en retraso de 15 minutos respecto al calentamiento real, debido a la desigualdad de condiciones iniciales.

El modelo numérico permitió establecer una velocidad del flujo de agua en la zona central del tanque, a base de un análisis paramétrico en estado transitorio, de tal manera que se mejore la transferencia de calor hasta cierto límite, donde se concluyó lo siguiente:

- Se corroboró en este análisis, que a medida que se eleva la velocidad del flujo de agua, la transferencia de calor del agua caliente hacia los mangos se incrementa debido al aumento del coeficiente convectivo de transferencia de calor.
- Se determinó un rango de velocidades del flujo de agua (0.005 – 3 m/s) en el cual el tiempo del proceso del mango se puede reducir de 110 a 90 minutos.
- El incremento de la transferencia de calor del agua caliente hacia los mangos deja de ser significativo a partir de una velocidad de flujo de agua de 0.3 m/s, de tal manera que se considera esta velocidad como límite.
- De esta manera, ya se tiene un criterio de mejora de eficiencia del calentamiento real, a expensas del aumento de costos que implica elevar la velocidad de giro de los impulsores (incremento de potencia mecánica), por lo que un incremento de velocidad del flujo de agua por encima de 0.3 m/s, ya no representa una mejora significativa en el calentamiento de los mangos.

Bibliografía

- [1] Whitaker, S. (1972). Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed bed and tube bundles. *AIChE Journal*, 365.
- [2] Taler, J., & Octón, P. (2014). Transient heat conduction in sphere. 6187-6196.
- [3] Ansys CFX-Solver Theory Guide. (2013).
- [4] Cengel, Y. A. (2000). *Termodinámica*. McGrawHill.
- [5] Chapman, A. (1984). *Transmisión de Calor*. Madrid: Bellisco. Librería Editorial.
- [6] Jiji, L. M. (2006). *Heat Convection*. New York: Springer.
- [7] La Madrid Olivares, R. (Enero de 2012). Uso eficiente de la energía térmica producida por la combustión de biomasa. Piura: Tesis para optar el Título de Master en Gestión y Auditorías Ambientales.
- [8] Mendoza, E., Marcelo, D., Villar, P. I., & Ouelis, J. (2015). Estudio analítico de campo y de simulación numérico computacional en el comportamiento fluidodinámico y térmico de equipos de tratamiento hidrotérmico del mango.
- [9] Q. Kern, D. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Compañía Editorial Continental.
- [10] Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2013). *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*. ELSEVIER.
- [11] Shaughnessy, E., Katz, I. M., & Schaffer, J. (2005). *Introduction to Fluid Mechanics*. Oxford: Oxford Univeristy Press.
- [12] De Francesch Saavedra, L. G. (2016). *Estudio y optimización del modo de control del proceso de tratamiento hidrotérmico para mangos*. Piura, Perú.
- [13] Malca, V. J. (2014). *Estado del Arte del Tratamiento Hidrotérmico del Mango en el Perú*. Piura: Universidad de Piura.

Anexo A

La Tabla A.1 obtenida de Taler & Octón (2014), presenta las primeras 6 raíces de la ecuación (1.42) para algunos números de Biot.

Tabla A. 1.- Primeras 6 raíces de la ecuación (1.42).

<i>Bi</i>	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6
10	2.8363	5.7172	8.6587	11.653	14.687	17.748
30	3.0372	6.0766	9.1201	12.169	15.225	18.287
40	3.0632	6.1273	9.1933	12.262	15.333	18.409
50	3.0788	6.1582	9.2384	12.32	15.403	18.489
60	3.0893	6.1788	9.269	12.36	15.452	18.545
70	3.0967	6.1937	9.2909	12.389	15.487	18.586
80	3.1023	6.2048	9.3075	12.411	15.514	18.618
90	3.1067	6.2135	9.3204	12.428	15.535	18.643
100	3.1102	6.2204	9.3308	12.441	15.552	18.663
110	3.1130	6.2261	9.3393	12.453	15.566	18.68
120	3.1154	6.2309	9.3464	12.462	15.578	18.694
130	3.1174	6.2349	9.3524	12.47	15.58	18.706
140	3.1192	6.2383	9.3576	12.477	15.596	18.716
150	3.1207	6.2413	9.362	12.483	15.604	18.725

Fuente: (Taler & Octón, 2014)

Anexo B

En esta sección se presentan los resultados de simulación para el caso transversal.

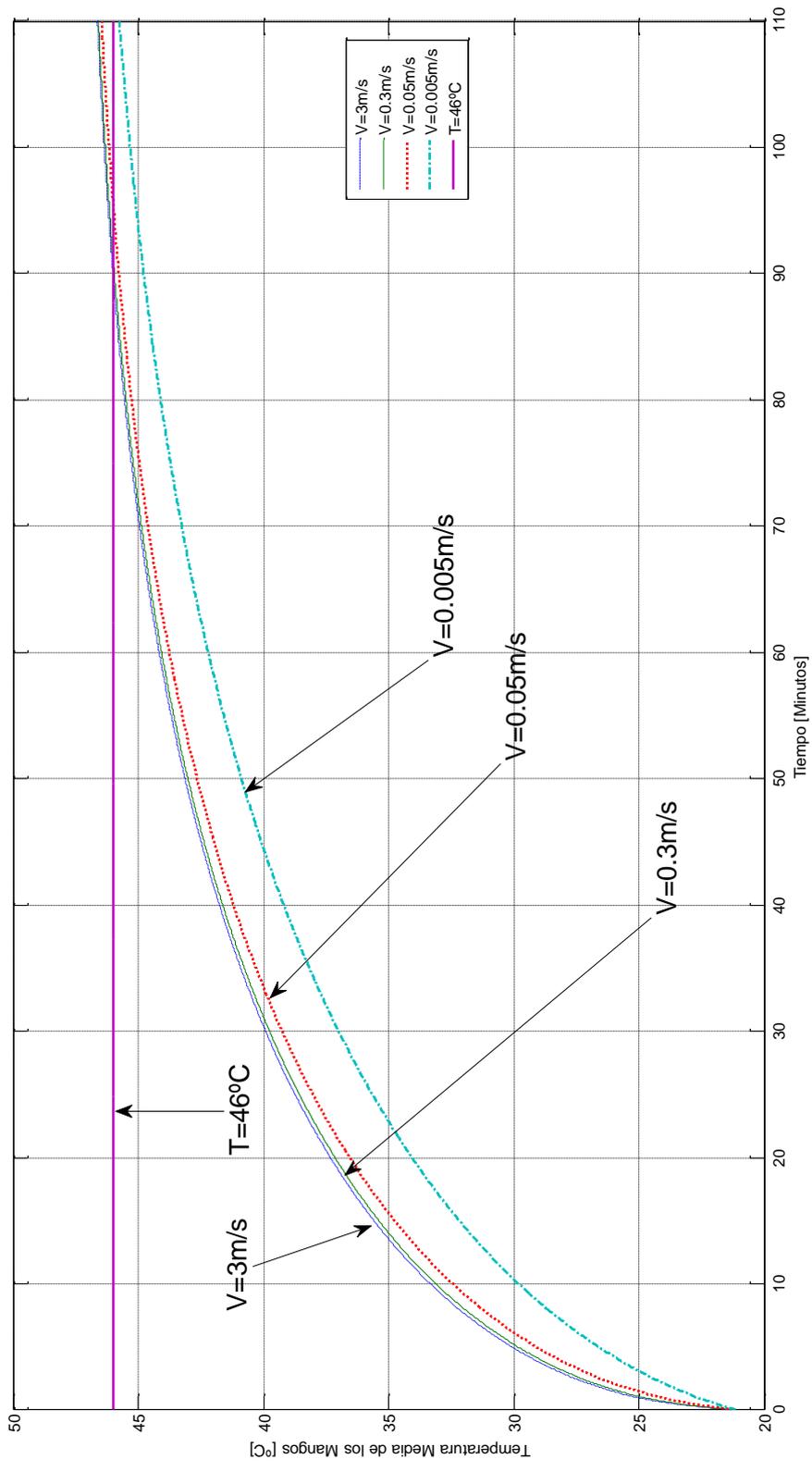


Figura B. 1. Temperatura media de los mangos [°C] en función del tiempo [Minutos].

Fuente: Elaboración propia.

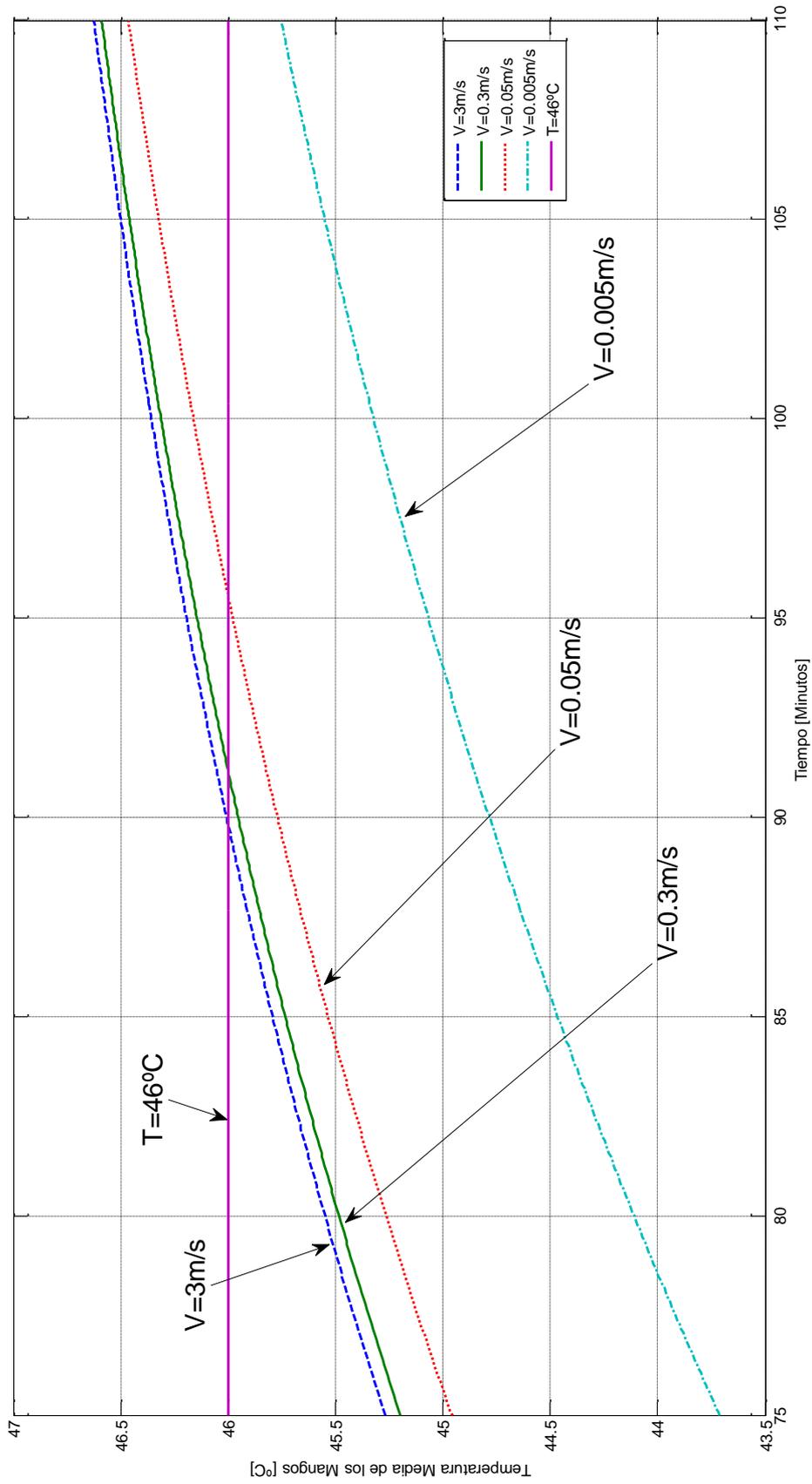


Figura B. 2. Temperatura media de los mangos [°C] en función del tiempo [Minutos]. Intervalo de 75 a 110 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

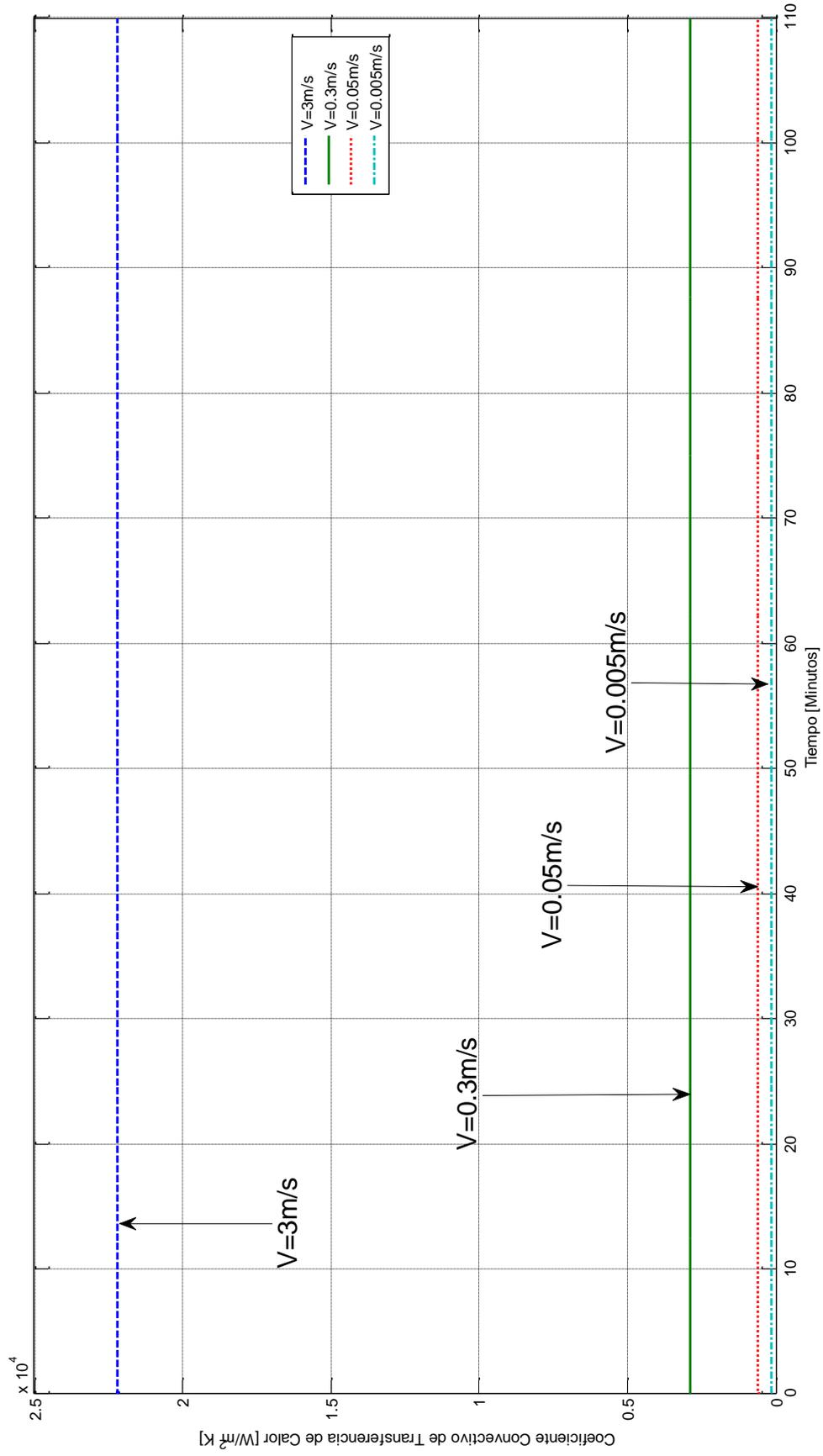


Figura B. 3. Coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio [W/m^2K] en función del tiempo [Minutos].

Fuente: Elaboración propia.

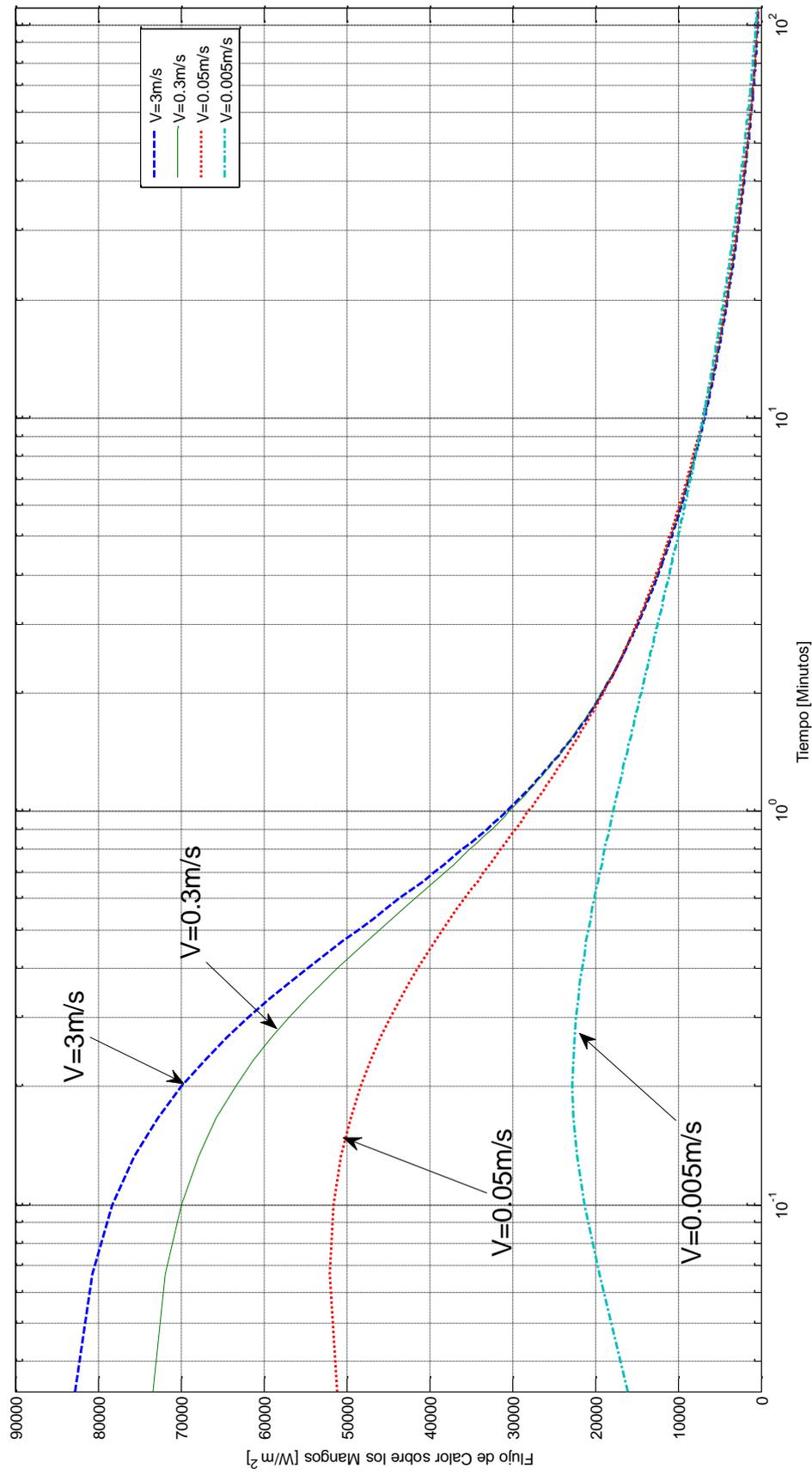


Figura B. 4. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función del tiempo [Minutos]. La gráfica se encuentra en escala semilogarítmica.

Fuente: Elaboración propia.

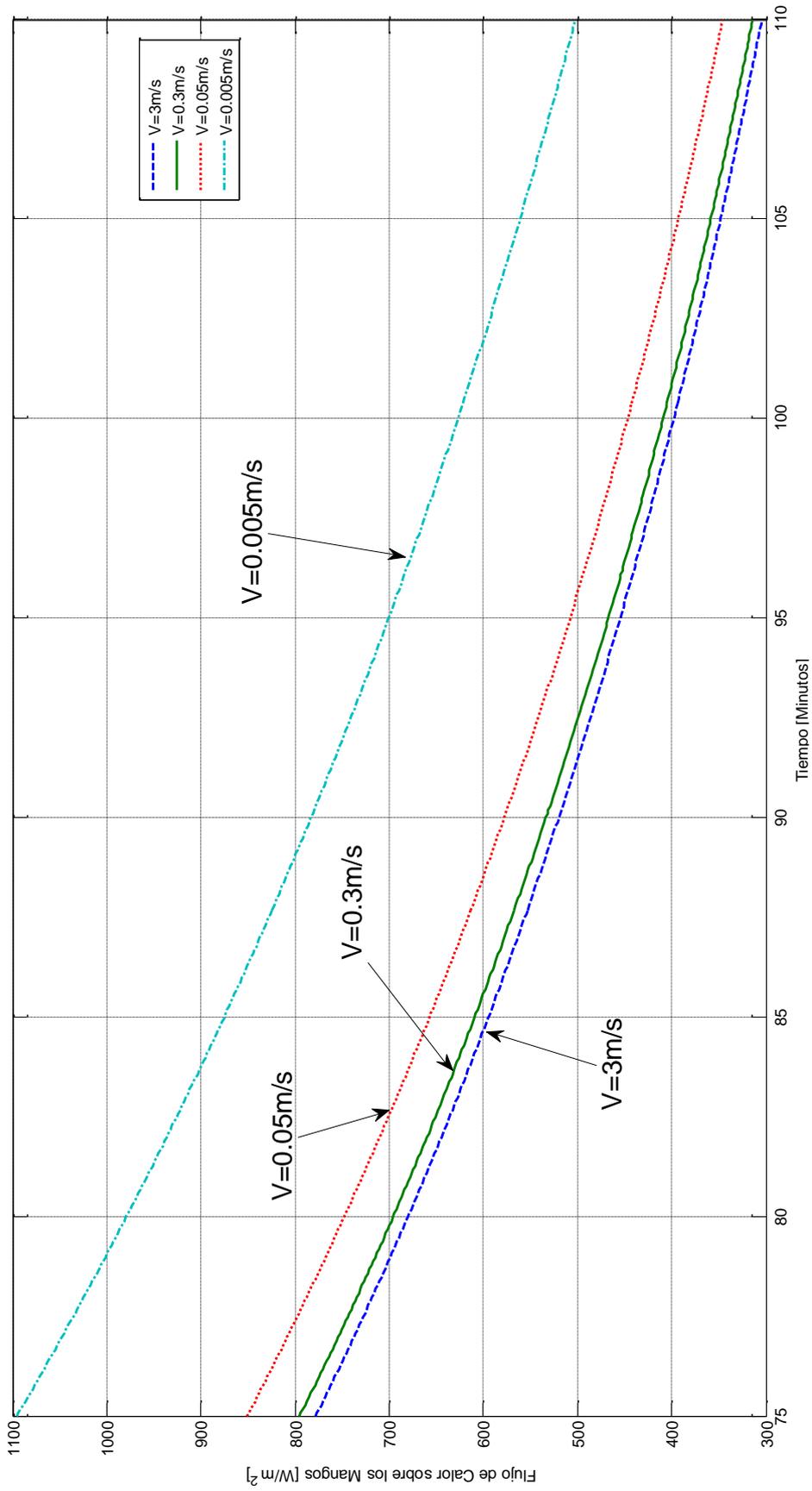


Figura B. 5. Flujo de calor sobre los mangos [W/m^2] en función del tiempo [Minutos]. Intervalo de 75 a 110 minutos.

Fuente: Elaboración propia.