



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelado del proceso de transferencia de calor y masa  
durante el secado por convección de frutas**

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

**Freddy André Elías Chiyón  
Anthony Rolando Ocaña Huamán  
Israel Said Ortiz Monzón**

**Asesor:  
Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Piura, noviembre de 2020**



## Resumen Analítico-Informativo

### **Modelado del proceso de transferencia de calor y masa durante el secado por convección de frutas**

**Freddy André Elías Chiyón, Anthony Rolando Ocaña Huamán, Israel Said Ortiz Monzón**

**Asesor(es): Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Trabajo de investigación.**

**Grado de Bachiller en Ingeniería**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, noviembre de 2020**

**Palabras claves:** calor, convección, masa, manzana, modelo, secado, simulación, transferencia.

**Introducción:** El secado de frutas es un método de deshidratación que se usa desde tiempos antiguos y a que ha ido avanzando de la mano con el desarrollo tecnológico. Entre los beneficios de este método se encuentran: Aumentar la vida útil, reducir el peso y volumen para optimizar los procesos de transporte y/o almacenamiento. Es un método complejo que implica la combinación de transferencia de calor y masa, el cambio de propiedades físicas y la contracción del material. Para el desarrollo de este trabajo se consideró un método de secado de frutas por medio de aire caliente a 60°C.

**Metodología:** Se desarrollaron dos modelos matemáticos para la transferencia de calor y masa durante el secado por convección de la fruta aplicando los conocimientos adquiridos durante la carrera. Ambos modelos son usados para predecir la distribución de temperatura y humedad dentro de la fruta durante el proceso de secado. En el primer modelo desarrollado se considera la difusividad de humedad dependiente de la temperatura y en el siguiente modelo se consideró la difusividad de humedad dependiente de la contracción. Para poder realizar los modelos se utilizaron formulas obtenidas de la revisión literaria realizada previamente. El método utilizado para realizar la aproximación es el método de diferencias finitas el cual se implementó en el software *MATLAB*. La fruta escogida para realizar los modelos es la manzana de la cual se puede obtener sus propiedades del libro Transferencia de calor de Cengel, donde también se encontraron fórmulas que serán útiles para desarrollar los modelos.

**Resultados:** Los resultados obtenidos se compararon con investigaciones encontradas en la revisión literaria las cuales analizan de igual manera todo el proceso de secado, y se observó que el modelo desarrollado considerando la contracción se asemeja más a las gráficas experimentales obtenidas por los autores pues ambos modelos presentan un tiempo de secado similar, con la diferencia de que la pendiente al inicio de la curva realizada en esta investigación es menor a la pendiente de la curva obtenida experimentalmente; por lo que se concluye que el modelo presentado considerando la contracción en este trabajo de investigación es un modelo válido para el proceso de secado por convección con aire caliente.

**Conclusiones:** El secado de frutas es un proceso importante en la industria alimentaria y realizando simulaciones previas a la implementación de este proceso se puede ayudar a mejorar la calidad de fruta obtenida pues se pueden manejar de una manera más eficiente los parámetros que intervienen.

**Fecha de elaboración del resumen:** noviembre de 2020

## Analytical-Informative Summary

### **Modelado del proceso de transferencia de calor y masa durante el secado por convección de frutas**

**Freddy André Elías Chiyón, Anthony Rolando Ocaña Huamán, Israel Said Ortiz Monzón**

**Asesor(es): Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Trabajo de investigación.**

**Grado de Bachiller en Ingeniería**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, Noviembre de 2020**

**Keywords:** apple, convection, heat, drying, mass, model, simulation, transfer.

**Introduction:** Dried fruit is a dehydrate method used since ancient times and it has been progressing along with technological development. There are several advantages about this method like: increase shelf life, reduce weight and volume to optimize the shipping and storage process. It is a complex method that implies the combination of mass and heat transfer, the change of the physical properties and shrinkage of material. To development of this investigation was considered a hot air of 60°C.

**Methodology:** Two mathematical models were developed for the mass and heat transfer during the convection drying of the fruit, applying the acquired knowledge during in the career. Both models are used to predict the distribution of temperature and moisture in the fruit during the drying process. In the first developed model has been considered temperature-dependent humidity diffusivity; and in the next model, a shrinkage-dependent moisture diffusivity. To be able to do the models, formulas obtained from the literary carried review previously were used. The used method to perform the approximation is the finite difference method which was implemented in the MATLAB software.

The chosen fruit to do the models is apple from which its properties can be obtained from the book Cengel Heat Transfer, where formulas were also found that will be useful to develop the models.

**Results:** The results obtained were compared with investigations found in the literary review which analyze the entire drying process in the same way, and it was observed that the developed model considering the shrinkage is more similar to the experimental graphs obtained by the authors, since both models present a similar drying time; with the difference in the slope at the beginning of the curve done in this investigation is less than the slope of the curve obtained experimentally. Then it is concluded that the model presented considering shrinkage in this research work is a valid model for the convection drying process with hot air.

**Conclusions:** Dried fruit is an important process in the food industry and doing simulations previous to the implementation of this process can help to improve the quality of the fruit obtained because the parameters involved can be handled more efficiently.

**Summary date:** November 9<sup>th</sup>, 2020

## Tabla de contenido

Introducción .....	1
Capítulo 1 Deshidratación de frutas.....	3
1.1.    Historia.....	3
1.2.    Deshidratadores.....	3
1.2.1.    Deshidratador de secado al ambiente.....	4
1.2.2.    Deshidratador solar.....	5
1.2.3.    Deshidratador por calor artificial.....	6
1.3.    Técnicas de eliminación de agua.....	6
1.4.    Secado por convección .....	7
1.4.1.    Transferencia de calor por convección.....	9
1.4.2.    Máquinas comerciales secadoras por convección.....	9
1.4.3.    Métodos para obtener aire caliente.....	11
Capítulo 2 Estado del arte .....	15
2.1.    Características del material alimenticio.....	16
2.2.    Efectos de las condiciones de secado.....	17
2.2.1.    Temperatura de aire de secado.....	17
2.2.2.    Velocidad del aire de secado.....	17
Capítulo 3 Análisis del sistema .....	19
3.1.    Modelación matemática del sistema.....	21
3.1.1.    Planteamiento del modelo.....	21
3.1.1.    Consideraciones de análisis.....	29
3.2.    Cálculos analíticos.....	30
Capítulo 4 Modelación y resultados.....	33
4.1.    Modelo considerando la difusividad de humedad dependiente de la temperatura.....	33

4.2.	Modelo considerando la difusividad de humedad dependiente de la contracción..	33
.....		33
Capítulo 5 Discusión de Resultados .....		37
5.1.	Evaluación de parámetros definidos .....	37
5.1.1.	Temperatura.....	37
5.1.1.	Humedad.....	38
5.1.2.	Flujo de calor .....	39
5.2.	Justificación de resultados.....	40
Conclusiones.....		45
Referencias bibliográficas .....		47
Anexos .....		49
Anexo 1. Código desarrollado en Matlab .....		51
Anexo 2. Diseño de secadores por convección en SolidWorks.....		57



### Lista de tablas

Tabla 1: Técnicas de eliminación de agua Fuente: Elaboración propia. ....	7
Tabla 2: Tabla de producción del secado industrial. Fuente: (Ohaco, 2012).....	8





## Lista de figuras

Figura 1: Diagrama de secador al medio ambiente. ....	4
Figura 2: Diagrama de secador solar. ....	5
Figura 3: Diagrama de secador artificial. ....	6
Figura 4: Deshidratador por convección industrial CE 130. ....	10
Figura 5: Deshidratador por convección Beltron GMBH. ....	10
Figura 6: Deshidratador por convección Chiozzi e Cavazzuti. ....	11
Figura 7: Calentador por resistencia eléctrica ....	11
Figura 8: Pistón de dos tiempos. ....	12
Figura 9: Diagrama de secador por placas térmicas. ....	13
Figura 10: Idealización de la rebanada de fruta. ....	19
Figura 11: Diagrama de transferencia de calor y masa. ....	21
Figura 12: Diagrama de nodos. ....	22
Figura 13: Diagrama de nodos. ....	22
Figura 14: Diagrama de calor. ....	23
Figura 15: Diagrama de nodos 3D. ....	26
Figura 16: Gráfica temperatura vs tiempo. ....	34
Figura 17: Gráfica humedad vs tiempo. ....	34
Figura 18: Gráfica temperatura vs tiempo. ....	35
Figura 19: Gráfica humedad vs tiempo. ....	36
Figura 20: Diagrama de humedad y temperatura. ....	39
Figura 21: Gráfica flujo de calor vs tiempo. ....	40
Figura 22: Gráfica temperatura vs tiempo. ....	41
Figura 23: gráfica masa vs tiempo. ....	42
Figura 24: Temperatura experimental y temperatura del modelo desarrollado. . ....	43
Figura 25: Temperatura experimental vs temperatura del modelo desarrollado. ....	43

Figura 26: Temperatura experimental y temperatura del modelo desarrollado. .... 44

Figura 27: Temperatura experimental y temperatura del modelo desarrollado. .... 44



## **Introducción**

El secado de frutas y verduras exige especial atención, ya que se consideran fuentes importantes de vitaminas y minerales esenciales para la humanidad. Las frutas deshidratadas han adquirido importancia comercial y su crecimiento a escala comercial se ha convertido en un sector importante de la industria agrícola. Las pérdidas de frutas y verduras en países en desarrollo se estima que representa alrededor del 30 – 40% de la producción.

El secado de frutas es un método de deshidratación que se ha usado desde tiempos antiguos. Entre sus beneficios se encuentra: aumentar la vida útil, reducir el peso y volumen para optimizar su transporte y almacenamiento y disminuir la tasa de crecimiento microbiana.

Este proceso cobra importancia en el transporte de frutas, ya que cuando se transportan a largas distancias y no cuentan con un ambiente óptimo de conservación, la fruta tiende a deteriorarse, por ende, existe una pérdida económica. Otro beneficio es, el valor agregado de la fruta deshidratada, ya que esta puede generar un mayor margen de ganancia a la exportación de productos frescos.

El método de secado por convección es uno de los métodos de deshidratación más usados en la industria y, de entre los diferentes fluidos utilizados, uno uso común es aire caliente, cuyas propiedades termodinámicas no deben ser tan elevadas, como es, su temperatura y velocidad, con el fin de evitar el deterioro de la fruta durante el proceso de secado.



## **Capítulo 1**

### **Deshidratación de frutas**

#### **1.1. Historia**

La deshidratación de frutas es un sistema de conservación que se remonta a tiempos del Neolítico, donde el hombre deja la vida nómada, tomando la agricultura como principal actividad.

En la antigüedad, se utilizaba este proceso de secado con ayuda del sol a base de prueba y error para conservar los alimentos en tiempos de escasez. Comercialmente, esta técnica que convierte la fruta fresca en alimentos deshidratados, el cual añade valor agregado al productos; así mismo, disminuye costos de transporte, distribución y almacenaje debido a la disminución de peso y volumen; además, es importante mencionar que la deshidratación es el método más barato de conservación, y el idóneo para comunidades que no tienen oportunidades de conseguir otros métodos de conservación. (Ohaco, 2012)

Para ahondar en el tema de la deshidratación de frutas, es necesario saber la distinción entre secado y deshidratación:

- **Deshidratación:**

Método de conservación que se basa en la eliminación del agua presente en la fruta, mediante el tratamiento con calor artificial, como es el aire calentado.

- **Secado:**

Método de conservación que se basa en la eliminación del agua presente en la fruta, mediante el tratamiento en condiciones ambientales, tales como el secado al sol.

#### **1.2. Deshidratadores**

Para la deshidratación de frutas, es necesario equipamiento especial que proporcione las condiciones adecuadas para el correcto procesamiento de la fruta para su deshidratación; Los deshidratadores que serán explicados en el presente trabajo de investigación serán los destinados a la deshidratación industrial.

Antes de detallar la estructura de un deshidratador, es preciso resaltar los diferentes métodos que existen de deshidratación:

- Al ambiente
- Al ambiente con mejor aprovechamiento del calor solar (Secador solar)
- Calor artificial
- Calentadores eléctricos

Para cada uno de estos tipos de deshidratación existe un modelo de secador; los cuales serán explicados a continuación:

### 1.2.1. *Deshidratador de secado al ambiente*

Tipo de deshidratador de fácil manejo, que aprovecha el calor generado por el sol y otras condiciones ambientales, como el viento, para reducir la humedad dentro de las futas. Este deshidratador debe ser construido en un lugar llamado cancha de secado. El cual está en una zona aislado de la contaminación y en un lugar con buena exposición al sol, el tamaño de la cancha de secado depende directamente del número de bandejas de secado que se colocaran. Las bandejas en este deshidratador se suelen colocar mirando al Norte, para un mejor aprovechamiento de los rayos del sol (Ohaco, 2012). En la Fig. 1 se muestra un esquema de este tipo de deshidratador.

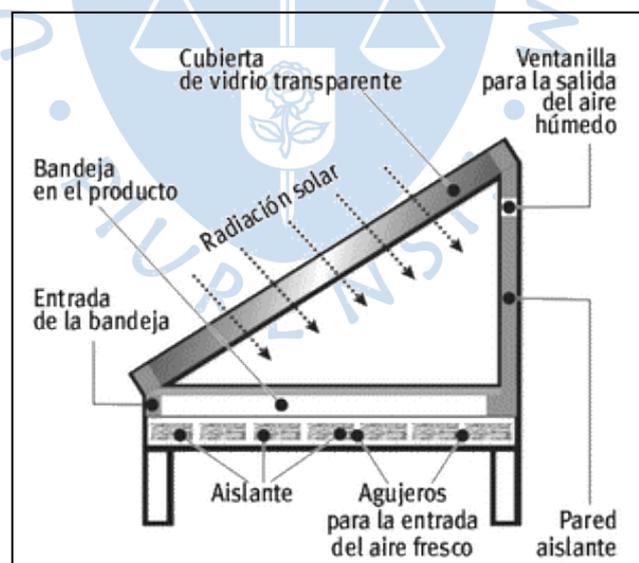


Figura 1: Diagrama de secador al medio ambiente.

Fuente: (Ohaco, 2012).

#### **Ventajas:**

- Construcción rápida, económica y sencilla.
- Fácil manejo.

**Desventajas:**

- Las bandejas deben cuidarse adecuadamente para evitar su rápido deterioro, limpiarse y guardarse en las horas que no se utilicen.
- Este secador depende mucho de las condiciones climáticas y la temperatura ambiental.
- El producto final no es de muy buena calidad, ya que al estar expuesto directamente al ambiente y a la luz solar, que muchas veces es perjudicial.

**1.2.2. Deshidratador solar**

Este deshidratador que aprovecha con mayor rendimiento el calor del sol, para el calentamiento de aire que luego circulara a través del producto.

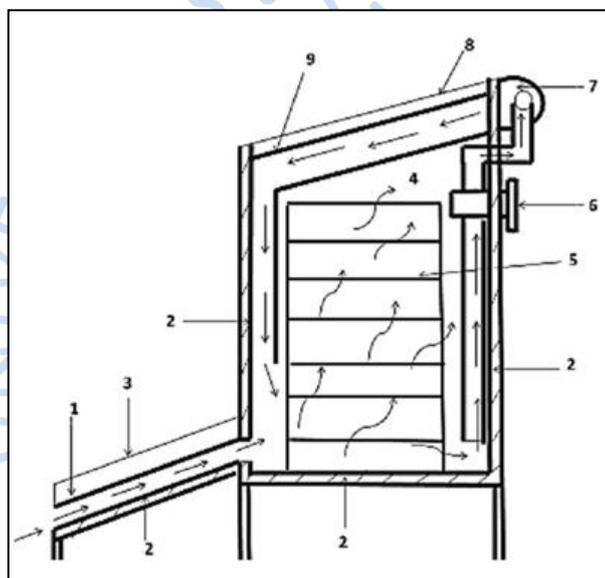


Figura 2: Diagrama de secador solar.

Fuente: (Ohaco, 2012).

**Ventajas:**

- Aunque es mayor el costo económico que el secador anterior, sigue siendo de relativo precio económico.
- Mejor aprovechamiento del calor solar y mejor ventilación de aire al producto.
- El producto se encuentra protegido de la exposición directa a la luz solar y al ambiente.

**Desventajas:**

- Cantidad de procesamiento relativamente baja del producto.
- Si no está bien sellado, puede tener filtraciones de aire húmedo al ambiente.

### 1.2.3. Deshidratador por calor artificial

Este tipo de deshidratador se caracteriza por calentar el aire de la cámara de secado a través de una pantalla metálica por conducción. La fuente de calor puede ser: agua caliente, aceites térmicos, gases de combustión o resistencias eléctricas. (Fito & Grau, 2001)

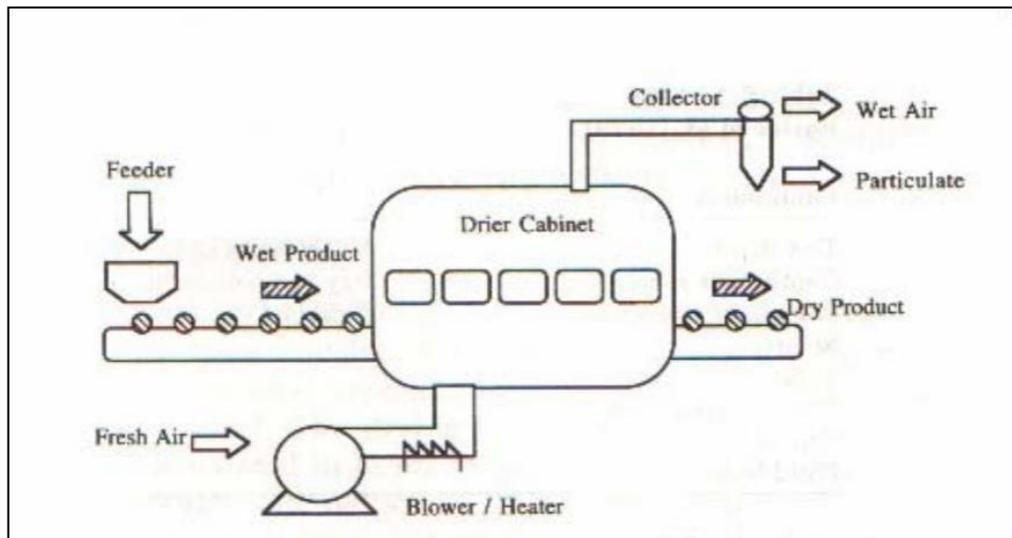


Figura 3: Diagrama de secador artificial.

Fuente: (Ohaco, 2012).

#### Ventajas:

- Puede reutilizar el calor de gases de salida de algún proceso, como los gases de combustión, como fuente de calor para el aire de la cámara.
- Puede funcionar en régimen continuo o intermitente.
- Son apropiados para la desecación a presiones reducidas y en atmósferas inertes.

#### Desventajas:

- Movilización del fluido calentado para transferir calor a otro material o fluido.
- Necesitas una alta cantidad de combustible y de calor generado.

Para un mayor entendimiento de la utilización del equipamiento en los procesos, se presenta una tabla con los equipamientos y condiciones para el proceso de deshidratación de frutas (Ohaco, 2012)

### 1.3. Técnicas de eliminación de agua

Proceso	Descripción
<b>PRENSADO</b>	Método de eliminación de agua por medio de la compresión, que consiste en comprimir al sistema en condiciones adecuadas permitir al líquido abandonar el sistema, mientras el sólido queda retenido en las superficies encargadas de la compresión.

<b>CENTRIFUGACIÓN</b>	El principio fundamental de este método consiste en una fuerza centrífuga suficientemente alta, que permita que el líquido contenido en el sistema se separe del componente sólido.
<b>EVAPORACIÓN SUPERFICIAL</b>	Se basa en la exposición del sistema a un fluido de mayor temperatura, con la finalidad de elevar la temperatura del líquido en él, y abandone el sistema por evaporación.
<b>ÓSMOSIS</b>	Al sumergir un producto en una disolución concentrada de sal o azúcar se da desde el interior de las células del producto, un flujo de agua hacia la disolución más concentrada, todo esto a través de una membrana semipermeable. Dicho flujo es causado por la diferencia de concentraciones de agua entre el alimento y la disolución.
<b>LIOFILIZACIÓN</b>	Para esta operación se necesita el material previamente congelado y trabajar en condiciones de vacío, ya que el líquido a eliminar será separado del producto por sublimación.
<b>CONGELACIÓN</b>	Al congelar un producto que contiene un líquido, este se separa paulatinamente ya que va adquiriendo forma sólida al abandonar el sistema, aumentando la concentración del material sólido, es decir, desecando al producto.

Tabla 1: Técnicas de eliminación de agua

Fuente: Elaboración propia.

#### 1.4. Secado por convección

Al colocar un material con un contenido de humedad significativo en una corriente de aire caliente, existirá un fenómeno denominado transferencia de calor la cual se compone principalmente de una transferencia de calor por convección. Además, existirá una transferencia de masa ya que, debido al aumento de temperatura del material, su contenido de agua interno elevará su temperatura hasta llegar a evaporarla arrastrando este contenido de humedad lejos de la superficie del material. El sistema se considera como un material húmedo, que consiste en un sólido inerte humedecido. Las propiedades del aire como temperatura, humedad y velocidad se mantienen constantes.

Los fluidos usados para el proceso pueden ser:

- Aire calentado por resistencias eléctricas.
- Aire calentado por vapor de agua.
- Productos de combustión.
- Gases inertes.
- Vapor recalentado.
- Aire calentado por radiación solar

Operación o Proceso	Escala de producción		
	Hogareña	Comercial de pequeña escala	Comercial de mediana o gran escala
Cosecha	manual	Manual o mecanizada	Manual o mecanizada
Lavado	Manual	Pequeñas lavadoras	Lavadoras automáticas
Pelado, cortado, etc.	Manual	Pequeñas máquinas	Máquinas automáticas
Protección al pardeamiento oxidativo	Salmuera (20 g de sal por litro de agua)	Salmuera (si se trata de producción en línea no es necesario)	-----
Escaldado o blanqueo (Hortalizas)	Agua potable hirviendo	Escaldadores discontinuos o continuos	Escaldadores continuos
Tratamiento con soda cáustica para Frutas	Cacerola de acero inoxidable. Capacidad 3 litros por kg de fruta	Idem hogareño con recipientes más grandes	Tratamientos con equipos continuos
Tratamiento con SO <sub>2</sub> para Frutas	Cajón y bandejas estandarizadas. Dosis indicada en cada receta	Cámaras de tratamiento. Puede ser la misma sala de secado	Cámaras de tratamiento especiales
ENFRIADO			
Hortalizas luego del escaldado	Inmersión en agua fría	Inmersión en agua enfriada, discontinuo o continuo	Inmersión en agua enfriada, continuo
Frutas	-----	-----	-----
Disposición para la deshidratación	Bandejas de madera y "mosquitero" plástico sanitario	Idem hogareño o Bandejas de malla de acero inoxidable	Se utilizan secadores continuos
Equipo de secado Capacidad Temperaturas	Al ambiente, etc. 3 kg por bandeja Máxima 60 °C	Salas de secado 20 kg/día por m <sup>2</sup> Máxima 60 °C	Equipos continuos 500 a 5000 kg/h Máxima 60 °C
Envasado	Cualquier película impermeable al vapor de agua. El celofán es muy adecuado	Cualquier película impermeable al vapor de agua. El celofán es muy adecuado	Cualquier película impermeable al vapor de agua. El celofán es muy adecuado
Almacenamiento Temperatura Capacidad	Ambiente -----	Deposito fresco y oscuro Ambiente 500 kg/m <sup>3</sup> útil	Deposito fresco y oscuro Ambiente 600 kg/m <sup>3</sup> útil

Tabla 2: Tabla de producción del secado industrial.

Fuente: (Ohaco, 2012).

En el proceso de secado existe una transferencia de calor y una transferencia de masa, el elemento dispuesto para el secado es calentado y esto conlleva a una deshidratación, el agua sale del elemento en forma de vapor de agua al ambiente.

El secado puede provocar cambios indeseables en los alimentos. El tamaño, forma y peso puede cambiar considerablemente del producto original, el secado puede llegar hasta en convertir en polvo el producto o eliminar casi toda la humedad de este. Esto genera una pérdida en material, sin embargo, es más sencillo de transportar, almacenar y conservar que un producto fresco. (Fito & Grau, 2001)

#### **1.4.1. Transferencia de calor por convección**

La transferencia de calor por convección es el intercambio de calor de un fluido en movimiento hacia un sólido u otro material. La convección no se entiende sin este movimiento de fluido para realizar el intercambio, por lo que, la velocidad de transferencia de calor de un fluido es más rápida y eficiente por convección que por otro mecanismo de transferencia (Cengel & Ghajar, 2011).

La transferencia de calor por convección depende de la intensidad de las siguientes propiedades del fluido: viscosidad dinámica ( $\mu$ ), conductividad térmica ( $\kappa$ ), densidad ( $\rho$ ), y calor específico ( $C_p$ ); así como la velocidad del fluido ( $v$ ). También de la misma manera depende de la configuración geométrica y la aspereza de la superficie, además del tipo de fluido, ya sea laminar o turbulento. Su dependencia en tantas variables muestra que la convección es el mecanismo más complejo para transferir calor (Cengel & Ghajar, 2011).

#### **1.4.2. Máquinas comerciales secadoras por convección**

Existen distintas máquinas secadoras por convección:

- CE 130 Secado por convección. Marca GUNT HAMBURG: Se dispone de cuatro bandejas metálicas de material inoxidable en un canal de secado. El flujo de aire calentado atraviesa las bandejas secando el producto. El aire se puede calentar con un dispositivo de calefacción regulable. Los valores medidos más relevantes como la variación de masa, humedad, temperatura y velocidad de flujo se pueden transmitir directamente a una PC, se presenta este tipo de máquina en la Fig. 4.
- Secador por convección. Marca: Beltron GmbH: Secador por convección especializado secado de materiales de aislamiento en productos electrónicos y pasta metálica. El calentamiento del aire es por resistencias eléctricas y este fluido se mueve a través de

toda la cinta transportadora. Una maquina comercial que existe en las industrias se puede apreciar en la Fig. 5.



Figura 4: Deshidratador por convección industrial CE 130.

Fuente: (Hamburg, 2020)



Figura 5: Deshidratador por convección Beltron GMBH

Fuente: (Direct Indsutry, 2020)

- Secador de aire caliente DIDO SHOP. Marca: Chiossi e Cavazzuti srl: Secador por convección de aire caliente para imprenta. En la Fig.6 se aprecia dicha máquina, esta cuenta con 3 bandejas de entrada de material sólido listo para ser impreso, asimismo, cuenta con una pantalla que muestra las principales variables.



Figura 6: Deshidratador por convección Chiozzi e Cavazzuti

Fuente: (Direct Industry, 2020)

### 1.4.3. Métodos para obtener aire caliente

- Mediante resistencias:

Para este método de calentamiento de aire se utilizarán resistencias con un material que soporten altas temperaturas (ejemplo: Nicromo), además de una fuente que proporcione potencia suficiente para elevar la temperatura de dichas herramientas (Pasar alta intensidad de corriente) y una fuente impulsora de aire (Ejemplo: Ventilador), el método consiste en hacer pasar un flujo determinado de aire a través de resistencias las cuales se encontrarían a una temperatura elevada, por los principios de transferencia de calor el aire en contacto aumentará su temperatura cumpliendo así el objetivo, dicho método es utilizado en secadoras de cabello.

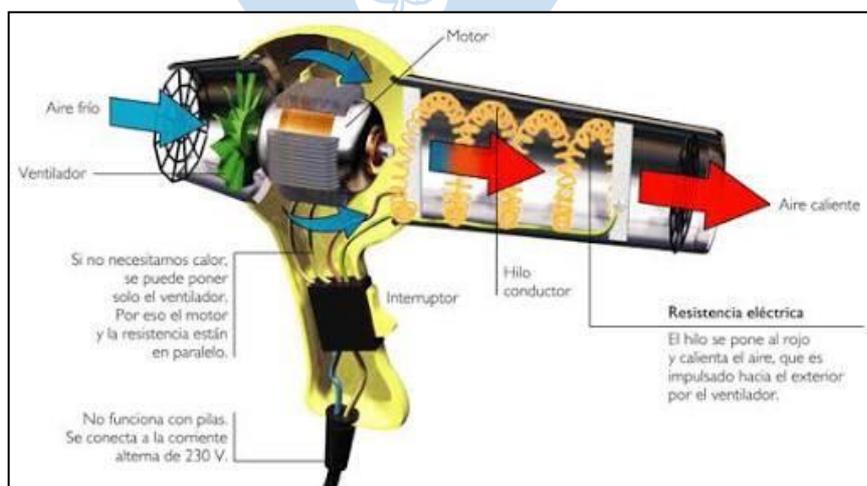


Figura 7: Calentador por resistencia eléctrica

Fuente: (Sitesgoogle, 2008)

- Mediante aumento de presión:

Para casos prácticos reales se puede considerar al aire como un gas ideal, por lo tanto gracias a la ecuación de gases ideales  $PV = RTn$  manteniendo constante el volumen de aire al igual que la constante del gas (R) y cantidad de sustancia (n) podemos aumentar la temperatura de dicho gas aumentando la presión ya que son directamente proporcionales, se puede lograr dicha acción con un compresor de gases expulsando finalmente aire caliente de este. A continuación, se muestra un compresor simple con una entrada o admisión y su respectiva salida.

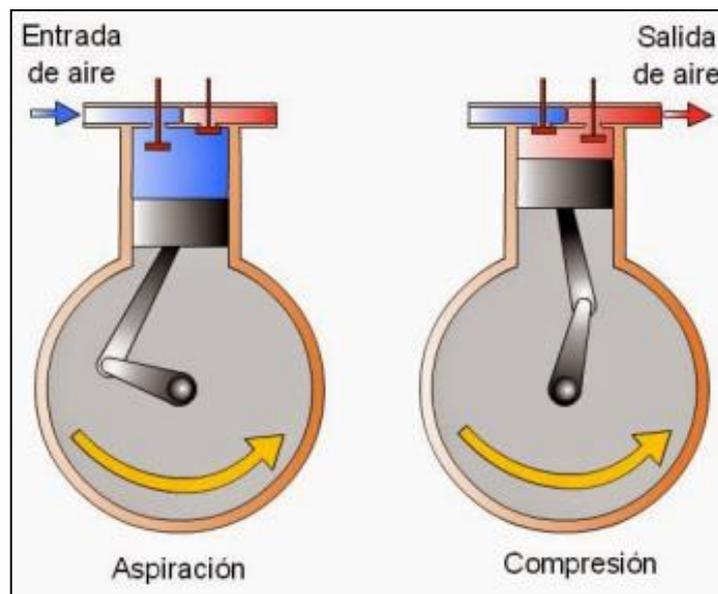


Figura 8: Pistón de dos tiempos.

Fuente: (Rubín, 2015)

- Mediante convección con placas térmicas:

Usado en el proyecto “Secadores solares – térmicos para granos y frutas para utilizarlo en zonas remotas”. Consiste en utilizar placas metálicas las cuales están expuestas a radiación solar, esto proporciona un aumento en su temperatura; seguido se hace pasar un flujo de aire constante a través de ellas, las cuales están encapsuladas en una caja, gracias a que el aire observe calor mediante convección por las placas hace que aumente la temperatura de dicho gas, cumpliendo así el objetivo. Se aprecia en la Ilustración 3 el paso continuo de aire por las placas, aumentando su temperatura por convección.

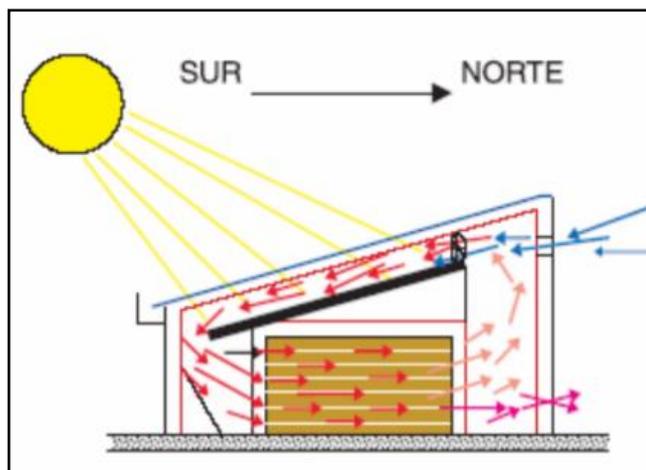


Figura 9: Diagrama de secador por placas térmicas.

Fuente: (Sitesgoogle, 2008)





## Capítulo 2

### Estado del arte

El presente trabajo está enfocado en la simulación de transferencia de calor y masa, fenómenos los cuales se llevan a cabo dentro de la rodaja de una fruta, para la presente investigación se eligió una manzana como elemento a secar.

Con la ayuda de métodos numéricos de apoyo, se utilizó el método de diferencias finitas para solucionar las ecuaciones presentes; por lo cual, se revisaron los siguientes artículos donde estudian el proceso de secado convectivo en diversas frutas, además realizan la determinación de parámetros físicos de las frutas y toman ciertas restricciones en para el modelo del proceso:

En (Serdar & Ayse, 2016) Se evaluó el proceso de deshidratación de la fruta espino, en un secador convectivo en diferentes condiciones: con temperaturas del aire de 50, 60 y 70°C; y con velocidades del aire de 0.5, 0.9 y 1.3 m/s; se obtuvieron datos importantes del modelado del proceso, como el coeficiente de difusión efectiva del fruto ( $D_{eff}$ ) mediante el modelo de difusión de Fick, cuyos valores variaron de  $2.34 \cdot 10^{-10}$  a  $2.09 \cdot 10^{-9}$  m/s<sup>2</sup>; y la energía de activación se obtuvo con la ecuación tipo Arrhenius. Los resultados de las pruebas experimentales se ajustaron con distintos modelos matemáticos; además compararon el impacto que tiene el cambio de temperatura y de velocidades del aire en el proceso de secado; resultando en una reducción del tiempo de secado muy notable frente al aumento de temperatura del aire, y una reducción no apreciable al aumento de la velocidad del aire.

En el estudio de (Okay Megues & Can , 2005) utilizaron un secador convectivo de laboratorio con calentamiento por resistencias eléctricas, mediante el proceso de secado de manzana de capa fina y la relación de humedad en cualquier con el tiempo de secado fue comparado por los métodos de *Newton*, *Page*, *Modified Page*, *Henderson y Pabis*, *Logarítmico*, *Exponencial*, *Wang y Singh*, entre otros. Los resultados se modelaron con ayuda del método de regresión lineal múltiple; Utilizando el error cuadrático medio como parámetro de relación

para escoger el modelo con mejor ajuste a los datos experimentales. Según los resultados, es posible predecir el contenido de humedad del producto con un modelo generalizado que muestra el efecto de la temperatura y la velocidad del aire de secado.

### **2.1. Características del material alimenticio**

Para realizar un modelado adecuado del proceso de secado, se debe tener en cuenta las características del material alimenticio que se va a analizar. La compleja estructura de frutas y vegetales aumenta la dificultad de realizar un modelado de la contracción, por lo que se define cada elemento en 4 distintas categorías: elástico lineal, hiperelástico, elastoplástico y viscoplástico. De esta manera se simplifica la manera en cómo se modela la contracción del alimento, de hecho, como asegura (Pérez Suelo, 2017), aproxima los elementos de análisis a una goma o algún elástico. Sin embargo, este método puede no ser del todo acertado con respecto a la realidad.

Se presentan diferentes tipos de consideraciones para los alimentos:

- Material alimenticio como viscoelástico

La propiedad de viscoelasticidad exhibe en el material características viscosas y elásticas, mientras que se produce una deformación en el elemento. Generalmente las frutas y vegetales que mejor se ajustan a esta definición son los que contienen la mayor cantidad de humedad. Los modelos Maxwell y Kelvin bajo la definición de elemento viscoelástico, son los modelos simplificados más parecido a la realidad, por lo que son modelos que son confiables para obtener una predicción fiable del proceso de secado y la contracción.

- Material alimenticio como elástico o hiperelástico

Se considera un elemento elástico cuando la deformación por contracción del proceso de secado es muy pequeña.

Dentro de los elementos elásticos se pueden diferenciar como elástico lineal, donde rige la Ley de Hooke para modelar la contracción de la fruta, y como elástico no lineal donde se rige bajo la ley constitutiva de Neo-Hookean. Así mismo, de acuerdo con la Ley de Hooke el estrés y la tensión se encuentran de manera proporcional hasta un límite aproximado del 10% dependiendo de la fruta o el vegetal. En cambio, un modelo no lineal puede predecir mejor grandes deformaciones del elemento.

- Material alimenticio como elastoplástico

Frutas y vegetales son definidos como material elastoplástico cuando exhibe ambas propiedades elásticas y plásticas. Asumen que una fruta o vegetal es elastoplástico con una

pequeña región en estrés; sin embargo (Serdar & Ayse, 2016) argumenta que se necesita de una porción significativa de 30% a 70% de zona en límite elástico y rotura por tracción.

## **2.2. Efectos de las condiciones de secado**

### **2.2.1. Temperatura de aire de secado**

La temperatura del aire es factor directo sobre el alimento secado, pues en gran mayoría de frutas y vegetales se produce una gran contracción a bajas temperaturas (20 ° C); a diferencia del secado a altas temperaturas (50 a 70 ° C), que el material sufre una contracción limitada (Ohaco, 2012).

A bajas temperaturas la humedad se transporta por capas hacia el exterior del elemento, de esta manera el estrés generado es mínimo, la contracción es uniforme y pronunciada. A altas temperaturas, el secado en la superficie del elemento se produce rápidamente, haciendo un exterior duro, por lo que la contracción se ve limitada por la capa seca exterior.

### **2.2.2. Velocidad del aire de secado**

La contracción del fruto decrece a medida que la velocidad del aire aumenta, en consecuencia, a baja velocidad el alimento se contrae de manera uniforme. (Orsat, Changrue, & Raghavan, 2006) explica que para velocidades de secado altas se formara un bajo contenido de humedad en la parte externa del material formando una cubierta rígida y complica la extracción de humedad de la parte interna del material, se denomina como al efecto de "endurecimiento de la caja", si se utiliza una baja velocidad la difusión del agua del interior ocurre al mismo ritmo que de la superficie.



### Capítulo 3

#### Análisis del sistema

Para el análisis del sistema se ha considerado una manzana la cual para ser secada será cortada en rodajas de cierto diámetro, obteniendo así una geometría para el modelo de un cilindro de radio  $R$  y espesor  $L$ . Sin embargo, se puede hacer una simplificación a la geometría pues si se analiza las propiedades en una línea radial del cilindro, al distribuirse uniformemente la temperatura y concentración en el modelo se puede decir que todas las líneas radiales tendrán las mismas propiedades, y también al ser un cilindro posee simetría en la mitad de su espesor, por lo que la geometría para analizar quedaría simplificada por un rectángulo de base  $R$  y altura  $L/2$ . Para el modelo definido las fronteras serán solo los lados del rectángulo que están expuesto al fluido que realizara el proceso de secado.

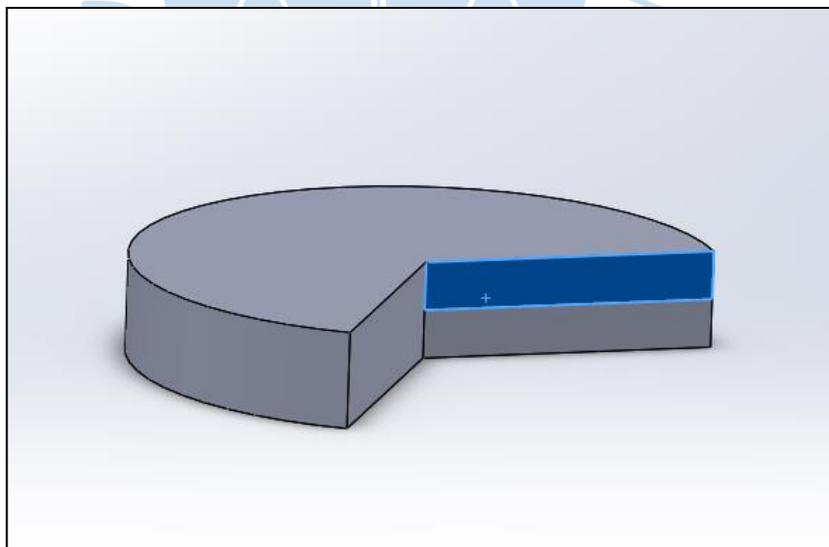


Figura 10: Idealización de la rebanada de fruta.

Fuente: Elaboración propia.

El método por el cual será secada la fruta será secado por convección de aire caliente. En este método de secado emplear aire caliente a altas temperaturas afectan las propiedades sensoriales del producto y su valor nutricional según Vega y Fito (2005), definir la temperatura

de secado es de suma importancia para los estudios cinéticos pues es evidente que al tener una mayor temperatura se acelera el proceso de secado sin embargo este secado abrupto puede generar pérdida de calidad en el producto final. La cinética del proceso de secado utilizando aire caliente depende tanto de la geometría y espesor del producto como de las propiedades del aire de secado, como son la humedad relativa ambiental, temperatura y velocidad del flujo de aire, por lo que para la deshidratación de frutas por este método se recomienda utilizar temperaturas entre (40–80 °C) con velocidades de aire de  $1.0 \pm 0.3$  m/s (Fito & Grau, 2001).

En la Fig. 12 se puede apreciar los fenómenos ocurridos en el modelo y su dirección durante el secado:

- Transferencia de calor por convección: Es el tipo de transferencia de calor que existe entre una superficie sólida y un fluido que se encuentra en movimiento sobre la superficie y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido sea el movimiento del fluido, mayor será la transferencia de calor por convección (Cengel & Ghajar, 2011). En el sistema estudiado la transferencia de calor se da entre el aire caliente y la rodaja de manzana que se desea secar.
- Transferencia de calor por conducción: Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las partículas adyacentes menos energéticas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases (Cengel & Ghajar, 2011). En el caso del secado de la rodaja de manzana la transferencia de calor por conducción se da desde las fronteras de la rodaja hacia el interior de esta.
- Difusión de agua: Este fenómeno contempla el movimiento de la masa de agua dentro de la fruta y se da gracias al gradiente de concentración que hay en el interior de la fruta; a mayor diferencia de concentraciones mayor el movimiento de masa de agua. En la rodaja esta difusión de agua se da debido a que el fluido de trabajo tiene menor concentración de humedad que la rodaja, esto genera el movimiento de masa de agua desde el interior de la rodaja hacia el fluido de trabajo; por lo que para abandonar la superficie de la rodaja el agua se tendrá que evaporar.
- Contracciones: Este fenómeno es generado debido a la pérdida de masa de agua ocurrida durante el proceso de secado; para el modelo desarrollado considerando este fenómeno se asume una contracción una radial y axial las cuales son proporcionales a sus medidas y dependientes de la humedad instantánea.

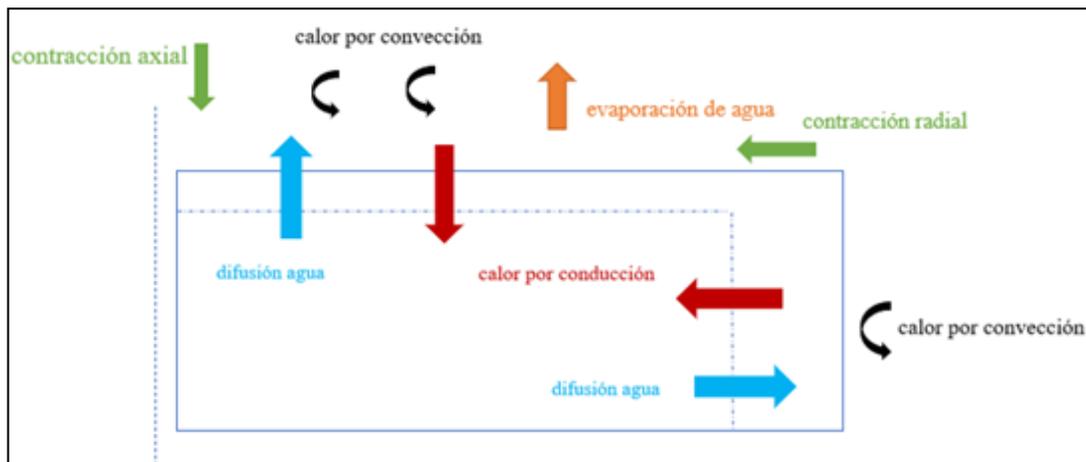


Figura 11: Diagrama de transferencia de calor y masa.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1. Modelación matemática del sistema

#### 3.1.1. Planteamiento del modelo

Los modelados planteados se basan en ecuaciones diferenciales acopladas de transferencia de calor y difusión de masa las cuales se implementan mediante el método de diferencias finitas. Este planteamiento se realizó de una manera similar a como se analiza en el capítulo 5 de (Cengel & Ghajar, 2011) que se basan en el método de diferencias finitas para general mallas y nodos en el modelo a analizar. La ecuación (1) es la ecuación de transferencia de calor a partir de la cual se hace el análisis en cada nodo de la malla que se genera, la malla y el análisis del nodo se aprecian en las Fig. 13 y 14 respectivamente.

- Ecuación de Transferencia de calor:

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \text{Flujo de calor [W]}$$

$$\dot{m} = \text{flujo másico} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$c_p = \text{calor específico del material} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} \right]$$

$$\Delta T = \text{diferencial de temperatura} [^\circ\text{C}]$$

$$\Delta x = \text{diferencial de posición [m]}$$

$$\dot{Q}_l = \text{Flujo de calor en las frontera de los nodos [W]}$$

$$\alpha = \text{Difusividad térmica de la fruta} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

$$\tau = \text{Número discro de Fourier [Adimensional]}$$

$i = \text{instante de tiempo cualquiera [adimensional]}$

$k = \text{conductividad del material } \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$

$hl = \text{Coeficiente convectivo para las caras laterales de la rodaja } \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

$l = \text{separacion entre nodos [m]}$

$\Delta t = \text{diferencial de temperatura } [^\circ C]$

$ha = \text{Coeficiente convectivo para las tapas de las rodajas } \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

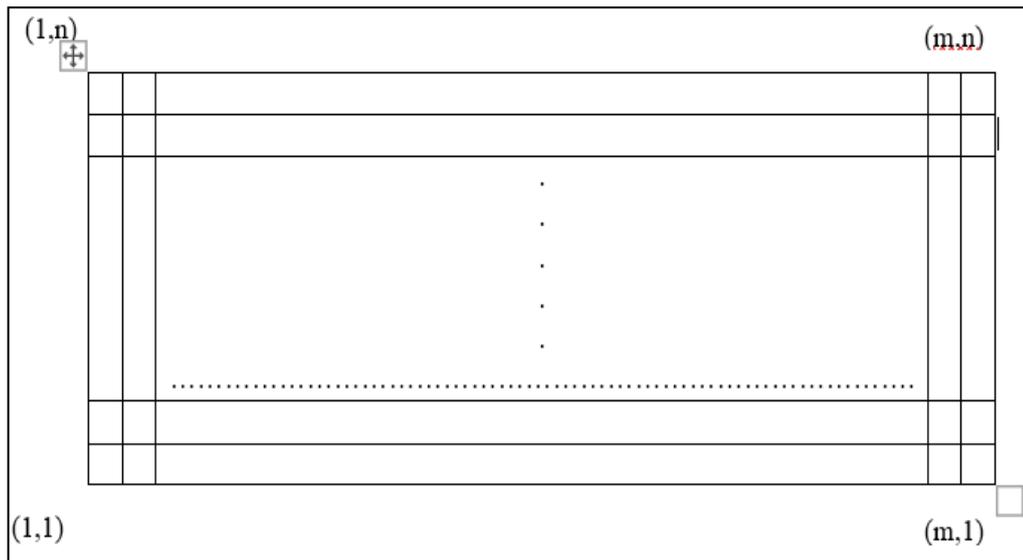


Figura 12: Diagrama de nodos.

Fuente: Elaboración propia.

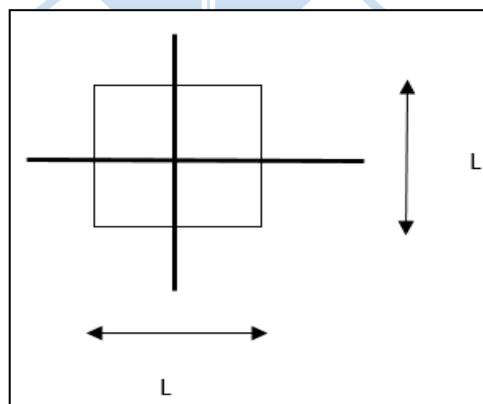


Figura 13: Diagrama de nodos.

Fuente: Elaboración propia.

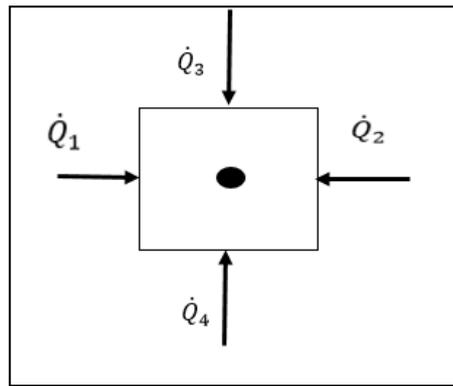


Figura 14: Diagrama de calor.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se realiza el balance de energía para todos los tipos de nodos existentes en el mallado antes presentado; los tipos de nodos se diferencian debido a sus nodos vecinos y las condiciones de ellos. Entre los tipos de nodos existen: Nodos frontera superior, que son los nodos exteriores de la parte superior de la rodaja; Nodos frontera lateral, que son los nodos exteriores laterales de la rodaja y; Nodos interiores, que son todos los nodos en el interior de la rodaja.

#### **Balance de energía para nodo (m+1, n+1)**

Considere una región cuadrada mostrada en la fig.4, en la que la transferencia de calor se da en las direcciones  $x$  e  $y$ , además se considera una profundidad unitaria de  $\Delta z = 1$ .

Luego, se divide el plano  $x$ - $y$  en una malla rectangular de puntos nodales espaciados con una separación de  $l$ ; considere un nodo cuyas coordenadas sean  $(m,n)$ , como  $x=m * l$  y  $y=n * l$ .

Dado que el elemento cubico  $(m, n)$ , con centro el nodo a analizar comprende transferencia de calor desde los 4 lados, y el volumen de dicho elemento es  $V_{cubo} = l^2$ ; por lo que la formulación en diferencias finitas para cada calor que se transfiere a los lados del cubo es:

$$k \times l \times \frac{T_{m+1,n}^i - T_{m+1,n+1}^i}{l} = \dot{Q}_1$$

$$k \times l \times \frac{T_{m+2,n+1}^i - T_{m+1,n+1}^i}{l} = \dot{Q}_2$$

$$k \times l \times \frac{T_{m+2,n+2}^i - T_{m+1,n+1}^i}{l} = \dot{Q}_3$$

$$k \times l \times \frac{T_{m,n+1}^i - T_{m+1,n+1}^i}{l} = \dot{Q}_4$$

Aplicando el balance de energía al nodo, se expresa en la ecuación (2).

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 = m \times C_p \times \frac{T_{m+1,n+1}^{i+1} - T_{m+1,n+1}^i}{\Delta t} \quad (2)$$

Reemplazando los calores transferidos en la ecuación anterior:

$$k \times (T_{m+1,n}^i - T_{m+1,n+1}^i) + k \times (T_{m+2,n+1}^i - T_{m+1,n+1}^i) + k \times (T_{m,n+1}^i - T_{m+1,n+1}^i) \\ + k \times (T_{m+1,n+2}^i - T_{m+1,n+1}^i) = m \times C_p \times \frac{T_{m+1,n+1}^{i+1} + T_{m+1,n+1}^i}{\Delta t}$$

Se multiplica por  $(\frac{1}{k})$  y se toman en cuenta las ecuaciones (3) y (4).

$$\left( \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \right) \quad (3)$$

$$\left( \tau = \frac{\alpha \Delta t}{l^2} \right) \quad (4)$$

$$(T_{m+1,n}^i - T_{m+1,n+1}^i) + (T_{m+2,n+1}^i - T_{m+1,n+1}^i) + (T_{m,n+1}^i - T_{m+1,n+1}^i) \\ + (T_{m+1,n+2}^i - T_{m+1,n+1}^i) = \frac{T_{m+1,n+1}^{i+1} + T_{m+1,n+1}^i}{\tau}$$

Finalmente, se obtiene la expresión que se utilizara para encontrar la distribución de temperaturas en cualquier nodo de la rodaja, en cualquier instante de tiempo:

$$T_{m+1,n+1}^{i+1} = T_{m+1,n+1}^i \times (1 - 4\tau) + \tau \times (T_{m+1,n}^i + T_{m+1,n+2}^i + T_{m,n+1}^i + T_{m+2,n+1}^i)$$

Para nodo (m+1, n+1)

$$T_{m+1,n+1}^{i+1} = \left(1 - 4\tau - 4\tau \frac{ha}{k}\right) \times T_{m+1,n+1}^i + 2\tau \left(T_{m,n+1}^i + T_{m+1,n}^i + \frac{2ha}{k} T_{\infty}\right)$$

Para nodo (i, n+1)

$$T_{m,n+1}^{i+1} = \left(1 - 4\tau - \frac{2ha\tau}{k}\right) \times T_{m,n+1}^i + (T_{m,n+1}^i + T_{m+2,n+1}^i + 2T_{m+1,n}^i + \frac{2ha}{k} T_{\infty})$$

Para nodo (1, n+1)

$$T_{1,n+1}^{i+1} = \left(1 - 4\tau - 2\tau \frac{ha}{k}\right) \times T_{1,n+1}^{i+1} + 2\tau(T_{2,n+1} + T_{1,n} + \frac{ha}{k}T_{\infty})$$

Para nodos (m+1, j)

$$T_{m+1,n+1}^{i+1} = \left(1 - 4\tau - \frac{2hl\tau}{k}\right) \times T_{m+1,n+1}^i + \tau(T_{m+1,n+2}^i + T_{m+1,n}^i + 2T_{m,n+1}^i + \frac{2hl}{k}T_{\infty})$$

Para nodos centrales (i, j)

$$T_{m+1,n+1}^{i+1} = (1 - 4\tau) \times T_{m+1,n+1}^i + \tau(T_{m+1,n+2}^i + T_{m,n+1}^i + T_{m+2,n+1}^i + T_{m+1,n}^i)$$

Para nodos (1, n+1)

$$T_{m+1,n+1}^{i+1} = (1 - 4\tau) \times T_{m+1,n+1}^i + \tau(T_{m+1,n+2}^i + 2T_{m+2,n+1}^i + 2T_{m+1,n}^i)$$

Para nodos (m+1,1)

$$T_{m+1,n+1}^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{hl}{k}\right) \times T_{m+1,n+1}^i + 2\tau \left(T_{m+1,n+2}^i + T_{m,n+1}^i + \frac{hl}{k}T_{\infty}\right)$$

Para nodos (i,1)

$$T_{m+1,n+1}^{i+1} = (1 - 4\tau) \times T_{m+1,n+1}^i + \tau(T_{m+2,n+1}^i + T_{m,n+1}^i + 2T_{m+1,n+2}^i)$$

Para nodo (1,1)

$$T_{1,1}^{i+1} = T_{1,1}^i \times (1 - 4\tau) + 2\tau(T_{1,2}^i + T_{2,1}^i)$$

- Ecuación de Fick de Difusión de masa:

- Por conducción: En la ecuación (5) se presenta la ley de Fick que describe el flujo másico de una sustancia dentro de un volumen de control a causa de un diferencial de concentración.

$$\dot{m}_a = D_{AB} * Area * \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (5)$$

- Por convección: En la ecuación (6) se presenta la ley de Fick que describe el flujo másico de una sustancia por las fronteras de un volumen de control a causa de un diferencial de concentración.

$$\dot{m}_a = h_m * Area * \Delta c \quad (6)$$

Donde:

$$\dot{m}_a = \text{flujo masico de agua} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$D_{AB} = \text{Difusividad efectiva del agua en la fruta} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

$$\Delta c = \text{Variacion de concentracion de agua} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$h_m = \text{Coeficiente convectivo de transferencia de masa} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Se incluyen estas ecuaciones de conducción y convección en el método de diferencias finitas y se hallan las ecuaciones de transferencia de calor en cada nodo.

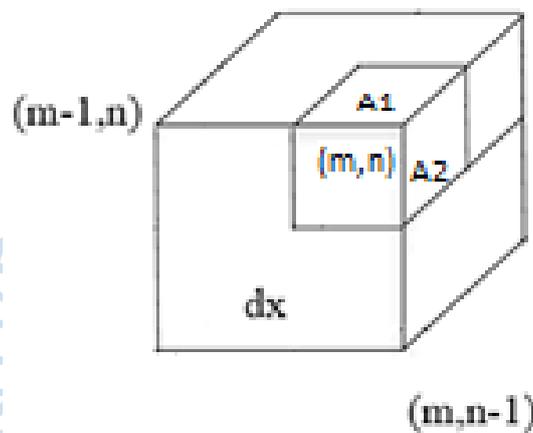


Figura 15: Diagrama de nodos 3D.  
Fuente: Elaboración propia.

Para nodo (m, n) :

$$A_{s1} = \text{Área total de frontera del nodo (m, n)} [m^2]$$

$$\delta_c = \text{Variacion de concentracion} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{m,n} = \text{densidad en el nodo (m, n)} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{inf} = \text{densidad en el aire} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$A1 = A2 = A3 = A4$$

$$\dot{m}_a = h_m * A_{s1} * \delta_{c1} + D_{ab} * A_{s2} * \frac{\delta_{c2}}{\delta_x} + D_{ab} * A_{s3} * \frac{\delta_{c3}}{\delta_x} \delta_{c1} = \rho_{aguadefruta} - \rho_{aguaenaire}$$

$$\delta_{c1} = \rho_{m,n} - \rho_{inf}$$

$$\delta_{C_2} = \rho_{m,n} - \rho_{inf}$$

$$\delta_{C_3} = \rho_{m-1,n} - \rho_{m,n}$$

$$\delta_{C_3} = \rho_{m,n-1} - \rho_{m,n}$$

$$A_{S_1} = A_1 + A_2$$

$$A_{S_2} = A_3$$

$$A_{S_3} = A_4$$

Sabiendo que:

$$\dot{m}_a = \frac{m_a^{t+1} - m_a^t}{\delta_t} \quad (7)$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se tiene:

$$m_{a,m,n}^{t+1} = m_{a,m,n}^t + \left[ \left( D_{ab} * \frac{\delta_x}{2} \right) * (\rho_{m,n-1} + \rho_{m-1,n} - 2 * \rho_{m,n}) - h_m * \delta_x^2 * (\rho_{m,n} - \rho_{inf}) \right] * \delta_t$$

Se repite el mismo procedimiento para los otros nodos y se obtienen las siguientes ecuaciones:

- Par el nodo (1,1):

$$m_{a,1,1}^{t+1} = m_{a,1,1}^t + \left[ \left( D_{ab} * \frac{\delta_x}{2} \right) * (\rho_{2,1} + \rho_{1,2} - 2 * \rho_{1,1}) \right] * \delta_t$$

- Para los nodos frontera superior (i,n):

$$m_{a,i,n}^{t+1} = m_{a,i,n}^t + \left[ \left( D_{ab} * \frac{\delta_x}{2} \right) * (\rho_{i-1,n} + 2 * \rho_{i,n-1} + \rho_{i+1,n} - 4 * \rho_{i,n}) - h_m * \delta_x^2 * (\rho_{i,n} - \rho_{inf}) \right] * \delta_t$$

- Para los nodos frontera central de radio (1,n):

$$m_{a,1,n}^{t+1} = m_{a,1,n}^t + \left[ \left( D_{ab} * \frac{\delta_x}{2} \right) * (\rho_{2,n} + \rho_{1,n-1} - 2 * \rho_{1,n}) - h_m * \frac{\delta_x^2}{2} * (\rho_{1,n} - \rho_{inf}) \right] * \delta_t$$

- Para nodos de frontera lateral (m,j):

$$m_{a,m,j}^{t+1} = m_{a,m,j}^t + \left[ \left( D_{ab} * \frac{\delta_x}{2} \right) * (\rho_{m,j+1} + 2 * \rho_{m-1,j} + \rho_{m,j-1} - 4 * \rho_{m,j}) - h_m * \delta_x^2 * (\rho_{m,j} - \rho_{inf}) \right] * \delta_t$$

- Para nodos centrales (i,j):

$$m_{a_{i,j}}^{t+1} = m_{a_{i,j}}^t + [(D_{ab} * \delta_x) * (\rho_{i,j+1} + \rho_{i,j-1} + \rho_{i+1,j} + \rho_{i-1,j} - 4 * \rho_{i,j})] * \delta_t$$

- Para nodo central lateral (m,1):

$$m_{a_{m,1}}^{t+1} = m_{a_{m,1}}^t + [(D_{ab} * \frac{\delta_x}{2}) * (\rho_{m-1,1} + \rho_{m,2} - 2 * \rho_{m,1}) - h_m * \frac{\delta_x^2}{2} * (\rho_{m,1} - \rho_{inf})] * \delta_t$$

- Para nodos centrales (i,1):

$$m_{a_{i,1}}^{t+1} = m_{a_{i,1}}^t + [(D_{ab} * \frac{\delta_x}{2}) * (\rho_{i+1,1} + 2 * \rho_{i,2} + \rho_{i-1,1} - 4 * \rho_{i,1})] * \delta_t$$

Como se puede apreciar estas ecuaciones trabajan con densidades ya que están en base métrica y en el código utilizado en la interfaz *MATLAB* para poder interpretar mejor los resultados obtenidos se utiliza la fórmula de la ecuación (8) para obtener la humedad en función de las densidades.

$$X = \frac{\rho_{agua,i}}{\rho_{agua,i} + \rho_{fs}} \quad (8)$$

Donde:

$X$  = Humedad de la fruta en determinado instante [adimensional]

$\rho_{agua,i}$  = densidad de agua en la fruta en determinado instante [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

$\rho_{fs}$  = densidad de la fruta seca [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

#### Propiedades de la manzana:

Conductividad térmica: En (Sweat V. E., Experimental values o thermal conductivity of selected fruits and vegetables, 1974) se obtuvo experimentalmente una expresión de la conductividad térmica en función del porcentaje de humedad en un determinado instante, esta expresión se aprecia en la ecuación (9).

$$k = 0.148 + 0.493 * X \left[ \frac{kW}{m * K} \right] \quad (9)$$

Calor específico: En (Sweat V. E., 1995) se realizó experimentos para obtener el calor específico en función del porcentaje de humedad de la fruta en ese instante.

$$C_p = 1000(1.4 + 3.22 * X) \left[ \frac{J}{kg * K} \right] \quad (10)$$

Difusividad de agua en la fruta: Esta difusividad se considerará variable, para nuestros primeros modelos se consideró la difusividad obtenida experimentalmente por (Simal, Deya, Frau, & Roselló, 1997), la cual se encuentra en función de la temperatura para cada instante del proceso de deshidratación.

$$D_{AB} = 2.29 * 10^{-3} * e^{\frac{39703.5}{8.3(273+T)}} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (11)$$

$$\%_{masa} = 0.85$$

Concentración de agua en el aire de secado: Previamente definimos las propiedades termodinámicas del aire para el secado, pero para la simulación de transferencia de masa, se requiere la concentración de agua en el aire, expresada como la densidad de agua en el aire: Utilizando la carta psicrométrica del aire a 1 atm, se deduce todas las propiedades del aire:

$$T_{bs} = 60^{\circ}C$$

$$T_{bh} = 30.5^{\circ}C$$

$$\phi = 15\%$$

$$H = 0.016 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

El parámetro de interés es la humedad absoluta, ya que este representa la densidad del agua en el aire, y también expresa de cierta forma la concentración de agua en el aire. Cabe recalcar que algunos datos se pueden obtener experimentalmente, pero al no poder hacer experimentos de ningún tipo tomaremos algunos datos de la literatura que se adapten más a nuestro modelo

### 3.1.1. Consideraciones de análisis

- Se tomará un coeficiente de convectivo de calor y masa promedio en el cilindro corto.
- El aire de la cámara de secado siempre está a 60°C.
- La transferencia de calor y masa se da en la totalidad del área superficial de la rodaja.
- La temperatura inicial de la rodaja es de 27°C.

- Las medidas de la rodaja son 3 cm de radio y de espesor 0.5 cm.
- El coeficiente de conducción de calor se considerará dependiente a la humedad.
- El calor específico se considerará dependiente de la humedad.
- La humedad del aire se asumirá constante durante todo el proceso.

### 3.2. Cálculos analíticos

- Coeficiente convectivo de calor (h):

Para el cálculo de este coeficiente, es necesario definir las propiedades termodinámicas del aire para el secado; estas propiedades se asumirán como:

$$Velocidad\ del\ aire = 0.7 \frac{m}{s}$$

$$T = 60\ ^\circ C$$

$$\phi(\text{humedad relativa}) = 15\ \%$$

Para el cálculo de este coeficiente convectivo, se tomarán las propiedades a una temperatura de película, que es el promedio de la temperatura inicial y la final:

$$T_f = \frac{27 + 60}{2} = 43.5\ ^\circ C$$

Se obtienen las propiedades del aire a esta temperatura de la tabla A-15 (Cengel & Ghajar, 2011):

$$\rho = 1.109 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad \mu = 1.941 * 10^{-5} \left[ \frac{kg}{ms} \right]$$

$$Pr = 0.7241 \text{ [adimensional]} \quad k = 0.02699 [W/mK]$$

Teniendo estas propiedades, procedemos a calcular el número de Reynolds con la ecuación (12):

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \tag{12}$$

$$Re = \frac{1.109 * 0.7 * 0.06}{1.941 * 10^{-5}} = 2399.69 \text{ (laminar)}$$

Para una mejor aproximación se tomarán 2 valores de (h), uno en la cara lateral del cilindro ( $h_l$ ), y el segundo tomando las tapas de la rodaja con placas ( $h_a$ ).

Para la cara lateral de la rodaja, primero se procede a hallar el número de Nusselt para cilindros con flujo externo de aire aplicando la ecuación (13):

$$Nu_l = 0.3 + \frac{0.62 * Re^{0.5} Pr^{0.333}}{\left(1 + (0.4/Pr)^{\frac{2}{3}}\right)^{0.25}} + \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (13)$$

$$Nu_l = 25.3$$

Con la relación del número del Nusselt de la ecuación (14), se encontró el  $h_l$ :

$$Nu_l = \frac{h_l * D}{k} \quad (14)$$

$$h_l = 11.38 [W/m^2K]$$

Para las tapas de la rodaja, se toma la relación del número de Nusselt de la ecuación (15) para placa plana con Re-laminar:

$$Nu_a = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (15)$$

$$Nu_a = 29.21$$

Utilizando la misma relación anterior:

$$Nu_a = \frac{h_a * D}{k}$$

$$h_a = 13.14 [W/m^2K]$$

- Coeficiente convectivo ( $h_{masa}$ )

Para el cálculo de este parámetro, se utilizará el número de Schmidt con propiedades a la temperatura de película aplicando la ecuación (16):

$$Sc = \frac{\text{Difusividad de cantidad de movimiento}}{\text{difusividad de masa}} \quad (16)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{ab}}$$

Teniendo como difusividad del agua en el aire  $D_{ab}$ :

$$D_{ab} = 1.87 * 10^{-10} * \frac{T[K]^{2.072}}{P[atm]} = 2.8633 * 10^{-5} [m^2/s]$$

$$Sc = \frac{1.750 * 10^{-5}}{2.8633 * 10^{-5}} = 0.6112$$

Utilizando la correlación para hallar el número de Sherwood expresado en la ecuación (17):

$$Sh = 0.683 * Re^{0.466} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

$$Sh = 20.02$$

Utilizando la relación que tiene el número de Sherwood, hallamos el coeficiente convectivo de masa con la ecuación (18):

$$Sh = \frac{h_{masa} * D}{D_{ab}} \quad (18)$$

$$h_{masa} = 0.01146 \left[ \frac{m}{s} \right]$$



## Capítulo 4

### Modelación y resultados

#### 4.1. Modelo considerando la difusividad de humedad dependiente de la temperatura

Para este modelo no se considera una reducción del volumen de la rodaja debido a la masa de agua que esta le transfiere al aire caliente, por lo tanto, se despreciara la contracción axial y radial. Esto significa que la difusividad será dependiente solamente de la temperatura y se utilizará la ley de Arrhenius expresada en la ecuación (19).

Las Fig. 17 y 18 muestran los resultados de temperatura y humedad respectivamente.

$$D_{AB} = D_0 * e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (19)$$

$$D_0 = \text{Difusividad base} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$E_a = \text{Energía de activación} \left[ \frac{J}{mol} \right]$$

$$R = \text{Constante de los gases ideales} \left[ \frac{J}{mol * K} \right]$$

$$T = \text{Temperatura} [^{\circ}C]$$

$$D_0 = 2.29 * 10^{-3} * e^{-\frac{39703.5}{8.3(273+T)}} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

#### 4.2. Modelo considerando la difusividad de humedad dependiente de la contracción

Se sabe que durante el proceso de secado hay pérdida de masa de agua, lo que genera una disminución de volumen que se ve representada en una reducción de radio y espesor para la rodaja, en este modelo la difusividad de agua se ha tomado dependiente de la contracción

y temperatura por lo que se podría afirmar que este modelo desarrollado de ajusta mejor a lo que realmente sucede durante el proceso de secado.

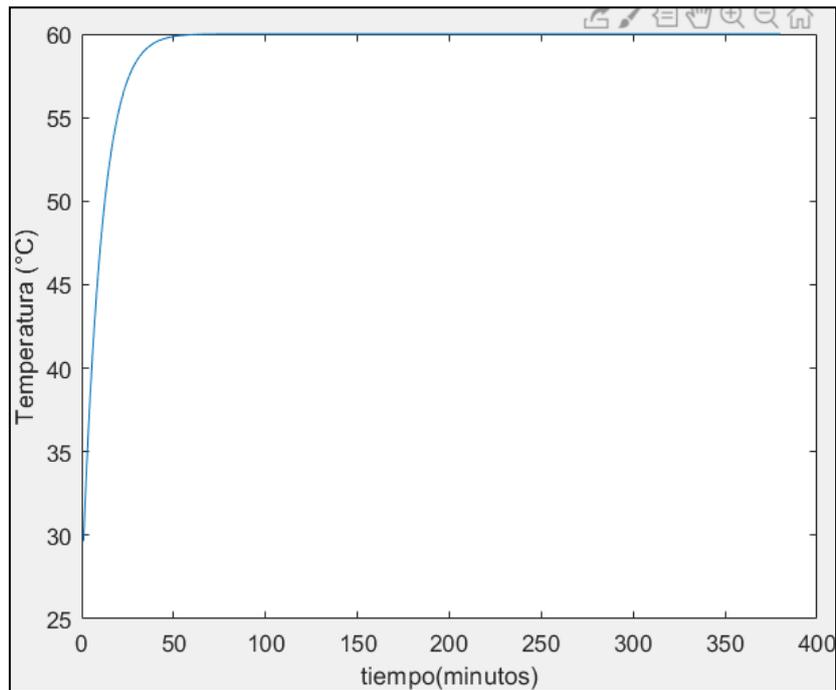


Figura 16: Gráfica temperatura vs tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

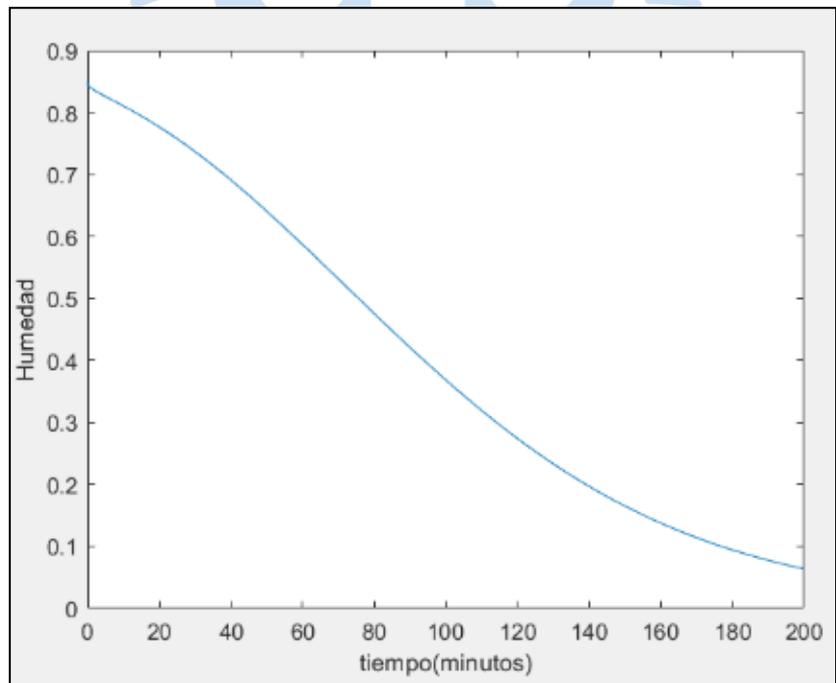


Figura 17: Gráfica humedad vs tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Este modelo fue utilizado por (Crank, 1975) para poder expresar la difusividad efectiva en función de la contracción, el modelo utiliza las ecuaciones (20) y (21).

Las Fig. 19 y 20 muestran los resultados de temperatura y humedad respectivamente.

$$\frac{D_{ref}}{D_{eff}} = \left(\frac{b_0}{b}\right)^2 \quad (20)$$

$$b = b_0 \left[ \frac{\rho_\omega + M_\omega \rho_s}{\rho_\omega + M_0 \rho_s} \right] \quad (21)$$

$D_{ref}$  = Difusividad de referencia  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$D_{eff}$  = Difusividad efectiva  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$b$  = espesor en función de la humedad [m]

$b_0$  = espesor inicial de la rodaja [m]

$\rho_\omega$  = densidad de agua en la fruta  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$\rho_s$  = densidad de fruta seca  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$M_\omega$  = Humedad de la fruta [adimensional]

$M_0$  = Humedad inicial [adimensional]

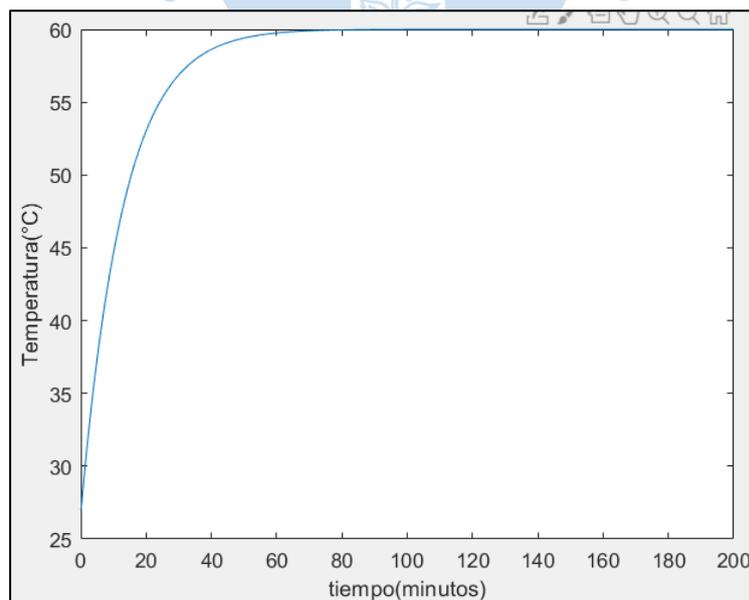


Figura 18: Gráfica temperatura vs tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

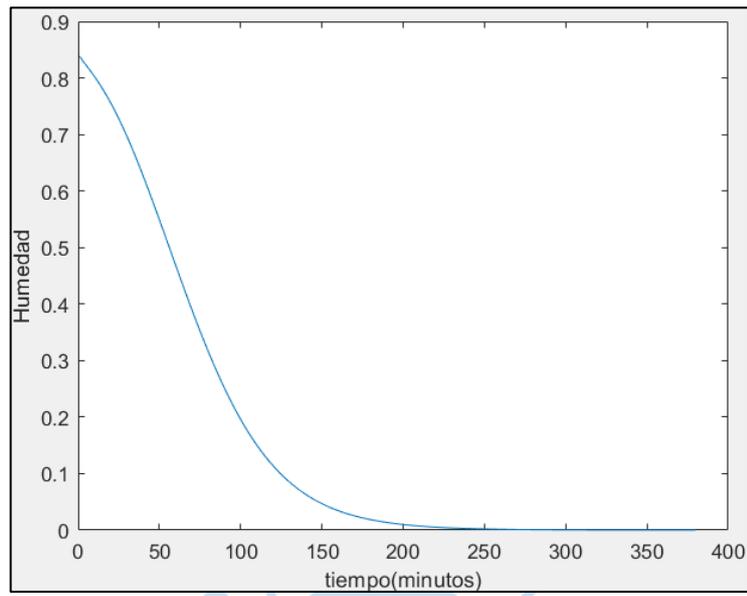
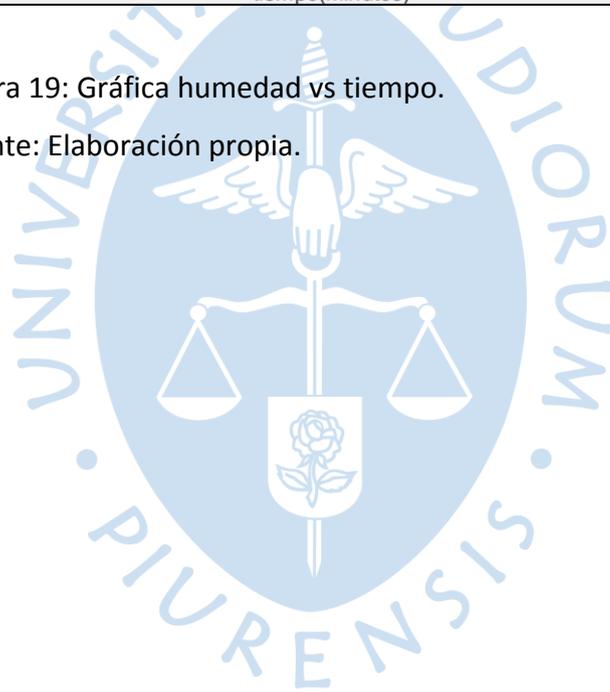


Figura 19: Gráfica humedad vs tiempo.

Fuente: Elaboración propia.



## Capítulo 5

### Discusión de Resultados

#### 5.1. Evaluación de parámetros definidos

##### 5.1.1. Temperatura

Para ambas simulaciones la rodaja alcanza la temperatura del fluido en aproximadamente una hora, se ve que al inicio presenta un aumento brusco de temperatura, este aumento va disminuyendo con el paso del tiempo debido a que las diferencias de temperatura serán más pequeñas y esto generara una menor transferencia de calor entre la rodaja y el aire caliente. Al llegar la temperatura al estado estacionario la diferencia de temperatura será nula por lo que no existirá calor transferido entre la rodaja y el fluido y la temperatura se mantendrá igual a la temperatura del fluido durante lo que reste del proceso de secado.

Se aprecia que en el modelo donde se considera la contracción la temperatura llega al estado estacionario en un tiempo mayor con una diferencia de aproximadamente 10 minutos, esto se debe que al considerar contracción la rodaja pierde volumen de agua por lo que la humedad en la rodaja disminuye con mayor rapidez lo que causa una disminución más significativa en el coeficiente de conducción; además la separación entre nodos disminuye por ende el área de transmisión de calor también disminuye aumentando la resistencia de calor a la conducción.

$$R_{conducción} = \frac{l}{k * A} \quad (22)$$

Otro factor que influye en esta diferencia de tiempos para alcanzar la temperatura estacionaria se debe al calor específico de la fruta que está definido en función de la humedad y como se verá en el análisis de la humedad esta disminuye con mayor rapidez en el modelo considerando el coeficiente de difusión dependiente de la

contracción. El aporte del calor específico se ve reflejado en la fórmula de transferencia de calor:

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (23)$$

Se puede apreciar que si el calor específico del material disminuye en mayor proporción habrá un menor flujo de transferencia de calor lo que haría que la rodaja de fruta demore mayor tiempo en alcanzar la temperatura estacionaria.

### 5.1.1. Humedad

Si se observa las gráficas de ambos modelos es evidente que el modelo considerando la contracción se necesita un menor tiempo para llegar a la humedad deseada. Esto se debe a varios fenómenos que ocurren dentro del material que causan un aumento en la difusividad del agua dentro de la rodaja; este aumento de difusividad se interpreta como un aumento de velocidad con la que el agua sale de la rodaja.

Al inicio del proceso de secado la disminución de humedad en las fronteras ocurre de manera brusca y estas partes de la rodaja se secan muy rápido, la graficas presentadas en la humedad es una humedad promedio en la rodaja por lo que esta disminución también hace ver una reducción significativa en la humedad, pero a medida que el proceso va avanzando en el tiempo el gradiente de humedad empieza a disminuir debido a que los nodos más cercanos a la frontera van igualando la concentración de agua en el aire caliente lo que genera un diferencial menor de concentración disminuyendo así el flujo másico de agua que sale de la rodaja.

- Por conducción

$$\dot{m}_a = D_{AB} * Area * \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (24)$$

- Por convección

$$\dot{m}_a = h_m * Area * \Delta c \quad (25)$$

En ambas ecuaciones se aprecia que la disminución de variación de concentración significara un menor flujo másico de agua entre rodaja y aire caliente; a continuación, se presenta una imagen con la distribución de densidades después de 1

minuto del secado donde se aprecia el cambio brusco de densidades en la frontera de la rodaja.

Evaluando los parámetros definidos se puede decir que el modelo de transferencia de calor y masa en la fruta considerando la difusividad de humedad dependiente de la contracción es un modelo que se ajusta más a la realidad y por lo tanto se tomara este modelo para hallar el flujo de calor necesario para que la rodaja alcance los 60°C.

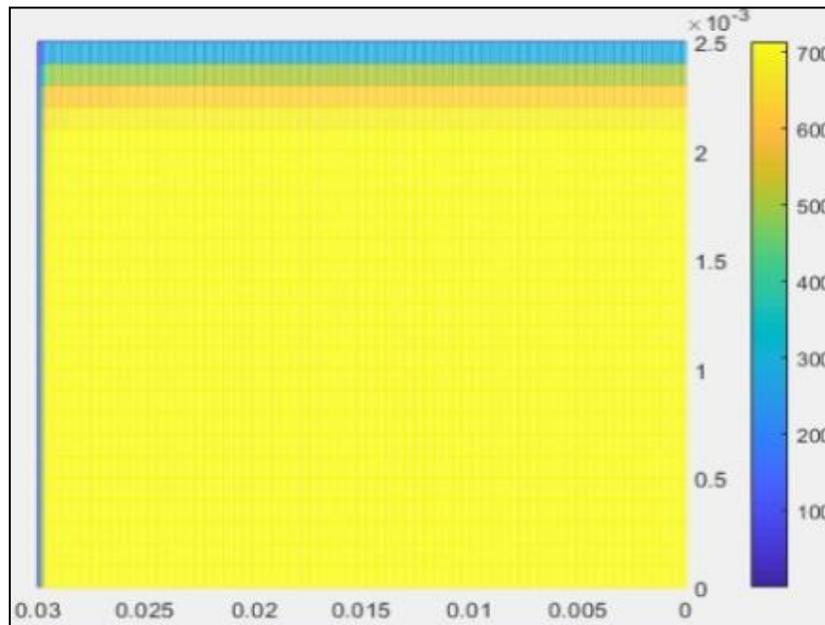


Figura 20: Diagrama de humedad y temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.2. Flujo de calor

Para hallar el flujo se debe tener en cuenta la masa de agua que abandonó la rodaja de fruta durante el proceso de secado hasta alcanzar la temperatura del aire caliente, siendo esta estacionaria; es por esto por lo que se considera solo el flujo hasta esta temperatura pues luego no existirá diferencia de temperatura por lo tanto no habrá calor transferido del fluido a la rodaja.

El flujo de calor absorbido por la rodaja se calcula con la fórmula (26):

$$\dot{Q} = \Delta m * c_p(X) * \frac{\Delta T}{\Delta t} [W] \quad (26)$$

Donde:

$$\Delta m = m_o - m_a \quad (27)$$

$m_o =$  masa inicial de la rodaja [kg]

$m_a$  = masa de agua extraída de la rodaja en determinado instante de tiempo [kg]

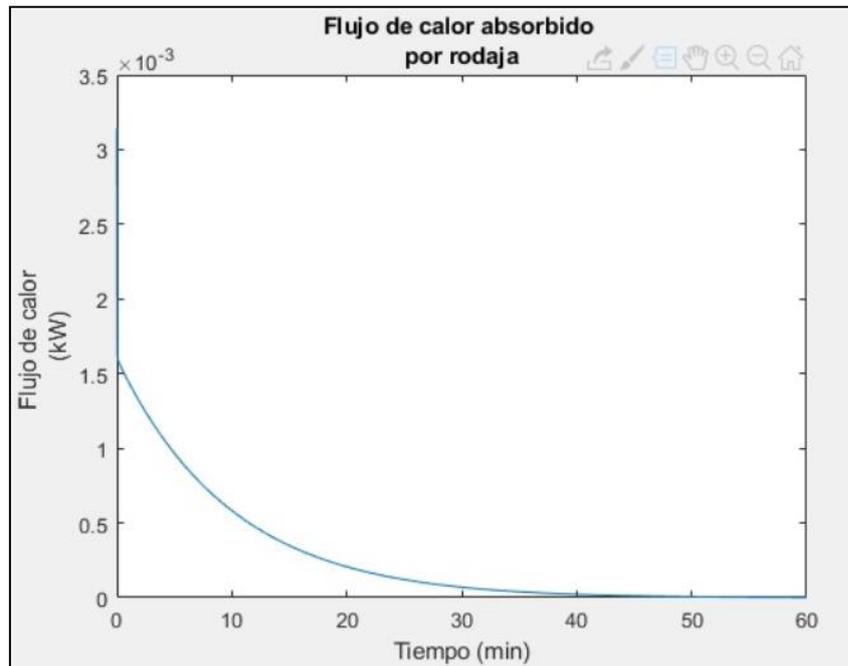


Figura 21: Gráfica flujo de calor vs tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular el calor total transferido se integra la curva de la Figura 22; la cual nos da un valor obtenido en *MATLAB* de 1.92 Joules por rodaja, este es el calor necesario que se le debe suministrar a cada rodaja para que, a la humedad necesaria, sin embargo, hay que tener en cuenta que se necesita una energía adicional para mantener el aire a 60°C para que el proceso continúe.

## 5.2. Justificación de resultados

Los resultados obtenidos se compararon con los resultados presentados por los autores (Golestani, Raisi, & Aroujalian, 2013). Los autores mencionados trabajan con una temperatura de 60°C, una velocidad de 0.6 m/s y con una rodaja con dimensiones de 60 mm de diámetro y 5 de espesor, todos estos parámetros son similares a los tomados en el presente trabajo por lo que se podrán comparar resultados para validar los modelos desarrollados.

El gráfico de la Figura 23 muestra la temperatura de la rodaja obtenida experimentalmente por los autores, en esta gráfica la temperatura llega a su estado estacionario alrededor de los 70 minutos un tiempo muy similar al obtenido en este

trabajo con el modelo considerando la contracción. La diferencia de tiempo se puede deber a varios factores como, por ejemplo:

- La velocidad del aire experimental es menor a la asumida en los cálculos y esta velocidad afecta a los coeficientes convectivos de transferencia de calor en la rodaja.
- Una concentración de agua en la rodaja menor a la asumida en los cálculos ya que esta es una concentración promedio para las manzanas, este valor se verá reflejado en el calor específico y la conductividad del material pues están en función de la humedad.

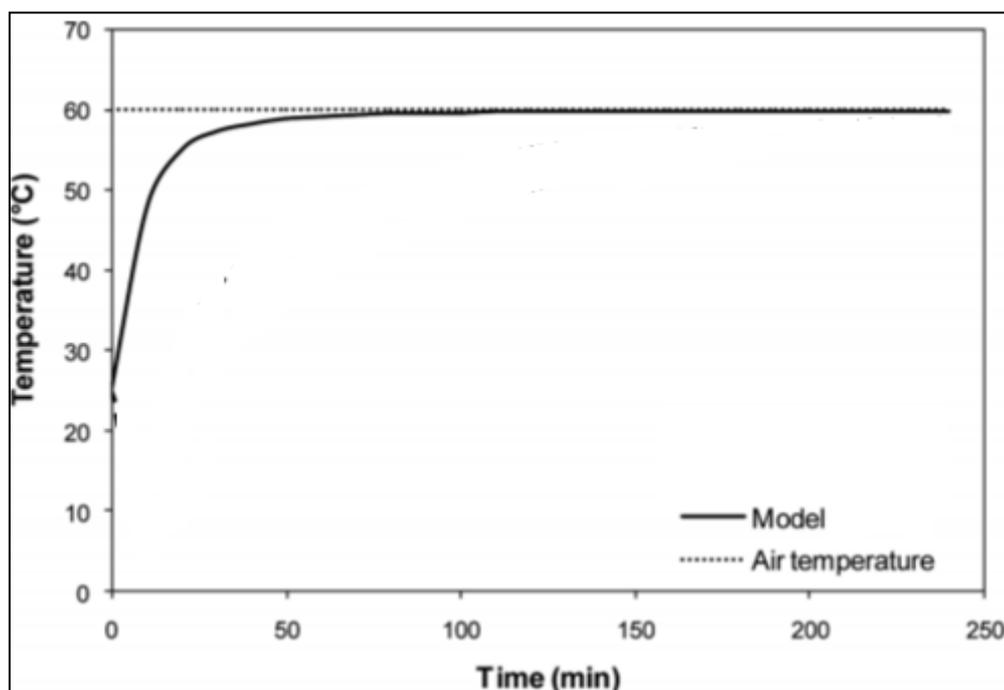


Figura 22: Gráfica temperatura vs tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de humedad los autores tomaron 3 modelos con 3 diferentes temperaturas, sin embargo, solo escogeremos 1 modelos para validar los resultados obtenidos pues este modelo trabaja con la misma temperatura asumida en este trabajo. Además, realizaron experimentos los cuales los comparan con sus resultados obtenidos para una mayor verificación del modelo.

- Modelo sin contracción

En la Fig. 24 se aprecia la gráfica de la masa de agua en función del tiempo tanto del modelo asumiendo la difusividad dependiente de la temperatura como del

experimento desarrollado por los autores (Golestani, Raisi, & Aroujalian, 2013). La curva experimental la cual está representada por triángulos le toma un tiempo aproximado de 250 minutos para secar completamente, en la Fig. 20 se aprecia la gráfica de humedad con respecto al tiempo desarrollado en la presente investigación con métodos numéricos y se aprecia que para secar completamente la rodaja se toma un tiempo de 240 minutos aproximadamente.

El modelo desarrollado sin contracción se asemeja al modelo desarrollado por los autores en (Golestani, Raisi, & Aroujalian, 2013), mientras que el modelo considerando contracción desarrollado en la presente investigación se asemeja al experimento realizado por los autores. Se dijo previamente que el modelo considerando la difusividad de humedad dependiente de la contracción se asemejaba más a un modelo real y esto comprueba revisando la gráfica obtenida experimentalmente por los autores.

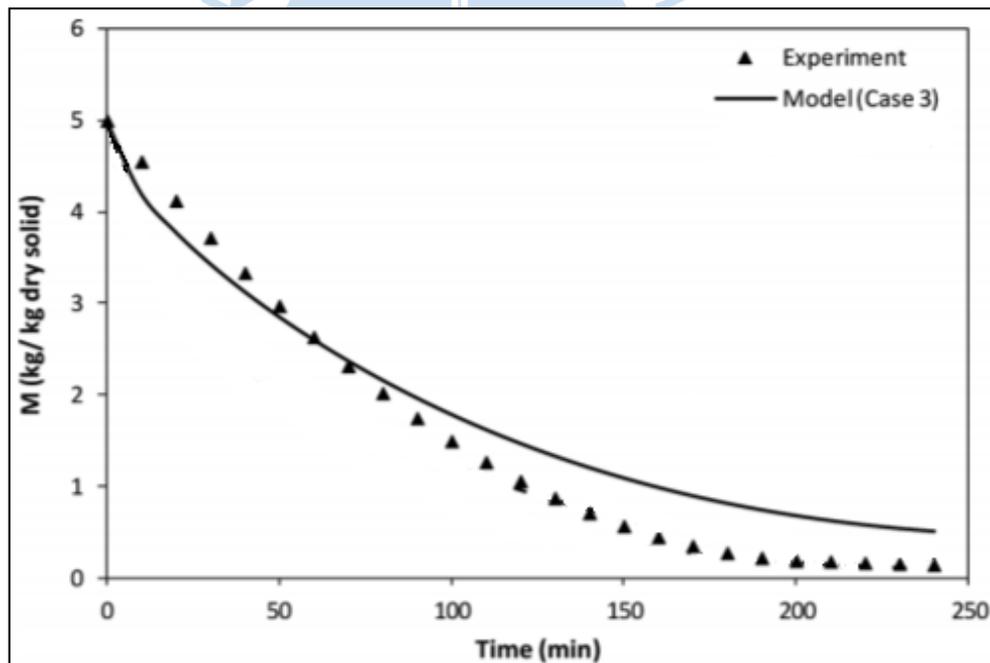


Figura 23: gráfica masa vs tiempo.

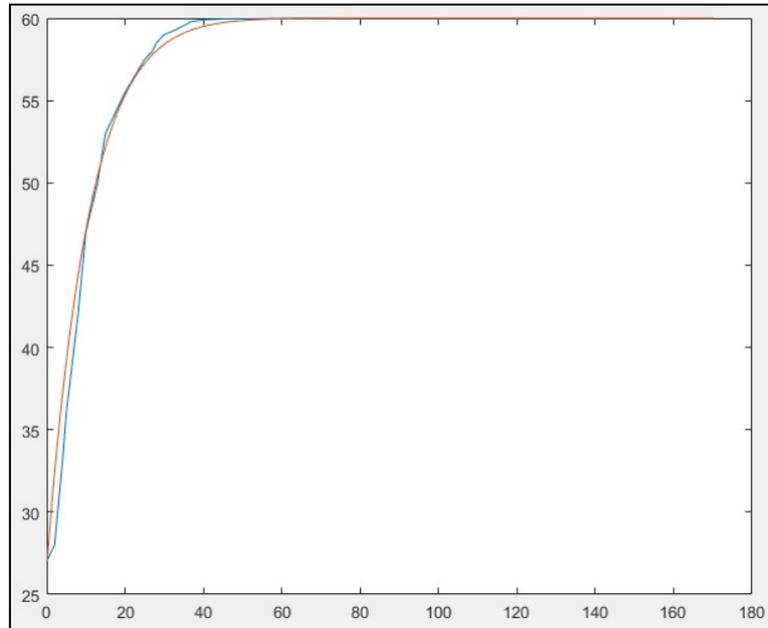
Fuente: Elaboración propia.

## 5.2. Validación de resultados

Para los resultados obtenidos del modelo seleccionado como el que mejor se ajusta a la realidad se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual es un indicador para predicciones que relaciona dos variables aleatorias y cuantifica la correlación que existe entre estas. Este indicador adquiere valores entre 0 y 1, mientras más cercano

sea a 1 la correlación entre variables aleatorias será mayor. En la Fig. 25 se puede apreciar que las curvas de temperatura con respecto al tiempo tienen un comportamiento similar.

Figura 24: Temperatura experimental y temperatura del modelo desarrollado.



Fuente: Elaboración propia.

Para cuantificar las correlaciones entre ambas curvas se exportaron los datos a MS Excel y se obtuvo el R2 presentado en la Fig. 26.

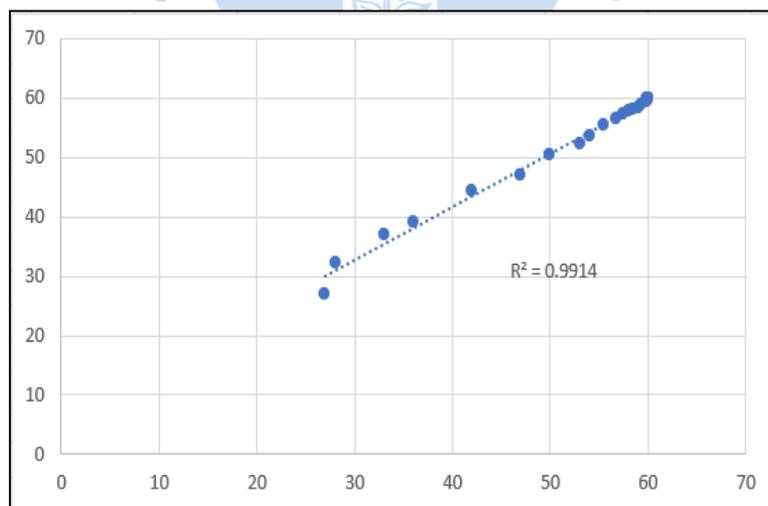


Figura 25: Temperatura experimental vs temperatura del modelo desarrollado.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 27 se muestra la comparación del comportamiento de las curvas de humedad del modelo con contracción y los resultados experimentales mostrados en (Golestani, Raisi, & Aroujalian, 2013).

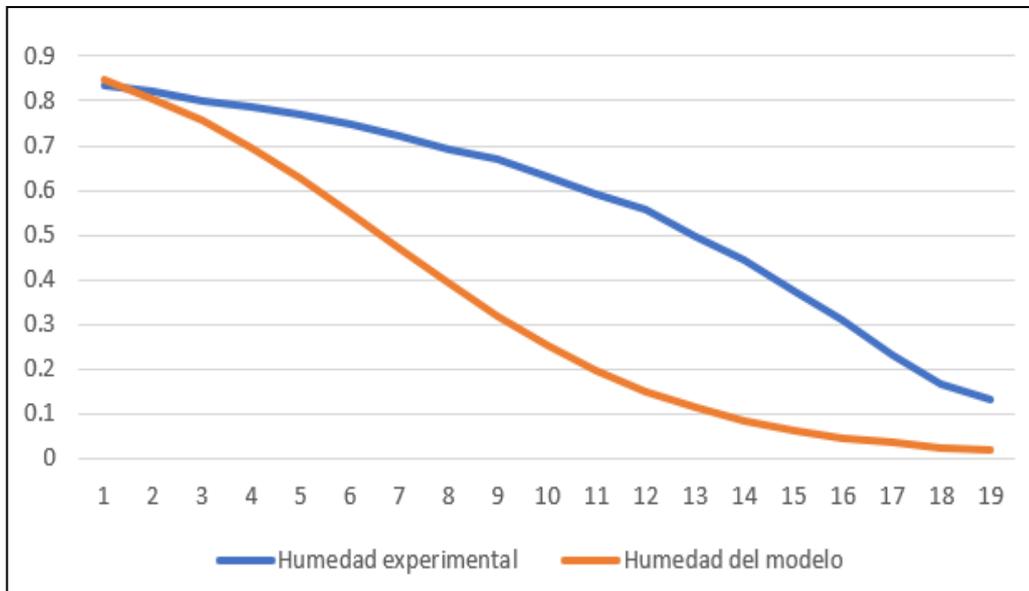


Figura 26: Temperatura experimental y temperatura del modelo desarrollado.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante Ms Excel se calculó el coeficiente de determinación  $R^2$  el cual se aprecia en la Fig. 28 y se asume como un valor aceptable para la validación del modelo.

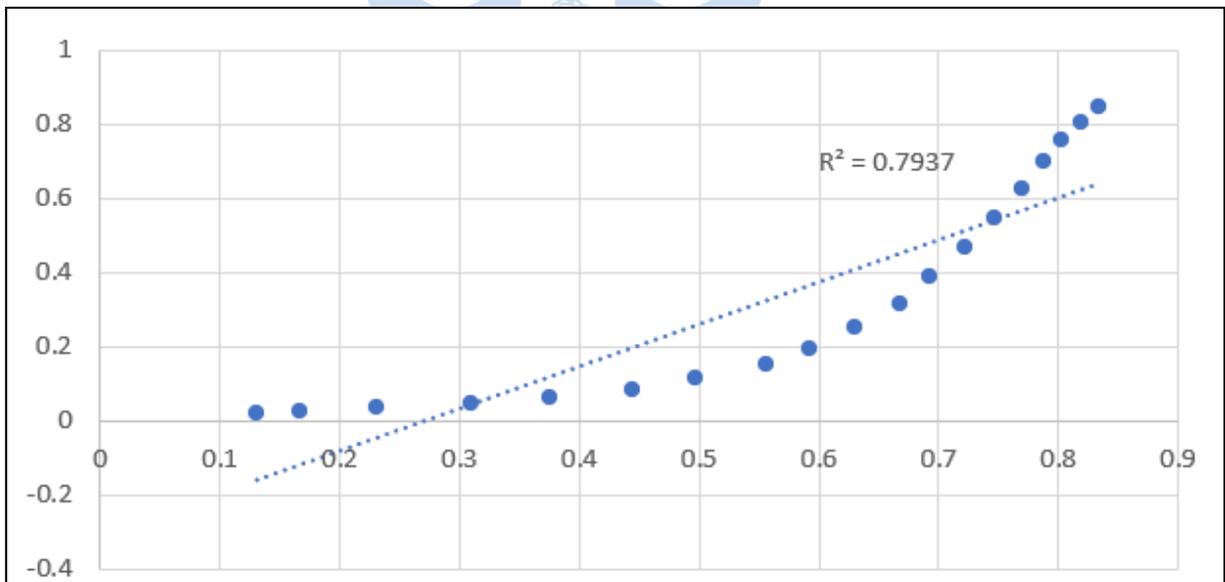


Figura 27: Temperatura experimental y temperatura del modelo desarrollado.

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

**Primera.** Se observó un mayor tiempo de transferencia de calor en estado transitorio para el modelo considerando la contracción, esto se debe a que la humedad en este modelo disminuye con mayor rapidez al modelo sin contracción, lo cual afecta el coeficiente de conducción de calor de la rodaja aumentando su resistencia a la transferencia de calor.

**Segunda.** Aunque las gráficas del modelo considerando la contracción desarrollado en la presente investigación tenga un mismo tiempo al experimento realizado por los autores (Golestani, Raisi, & Aroujalian, 2013), se puede apreciar que existe una diferencia entre las curvas al inicio del proceso; esto se debe a que en la realidad la temperatura y la humedad del fluido de trabajo no es constante durante la deshidratación pero este efecto no es apreciable a medida que el tiempo de secado va aumentando.

**Tercera.** Se encontró un tiempo menor de secado en la simulación de transferencia considerando la difusividad dependiente de la contracción, esto se debe a que la manzana al contraerse ofrecerá menos resistencia a la transferencia de masa, con lo cual su tiempo para secar será menor.

**Cuarta.** El Perú es un país con una gran variedad de alimentos y somos uno de los países que más exporta al extranjero, sin embargo, estos productos no tienen un valor agregado como lo sería que pasen por un proceso de secado lo que podría generar ganancias extras; con este trabajo se podría plantear sumar las tecnologías de secado por convección a la agricultura peruana.

**Quinta.** Algunos parámetros como la conductividad térmica y calor específico han sido tomados de la literatura, pero si se quisiera aproximar el más a la realidad se tendría que hacer experimentos para obtener estos parámetros pues depende también del clima local y la calidad de la fruta.

**Sexta.** Para futuros trabajos se recomienda realizar un prototipo de secador con el método de aire caliente para obtener graficas experimentales con una mayor confiabilidad para validar los modelos desarrollados en este trabajo y tener la posibilidad de estudiar las propiedades en el secado de otras frutas.



### Referencias bibliográficas

- Castro, E. (1986). Propiedades Térmicas Alimentos. Universidad de Chile.
- CDMX Electrónica. (s.f.). Sensor de humedad del suelo FC-28 Higrómetro. Obtenido de <http://www.cdmxelectronica.com/producto/sensor-de-humedad-del-suelo-higrometro/>
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones (Cuarta ed.). México: McGraw-Hill.
- Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion (Segunda ed.). Londres: Oxford University Press.
- D. D. E. L. A. S. Microondas. (2012). Horno de microondas. 1-52. Obtenido de [http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Horno\\_de\\_microondas&oldid=60409963](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Horno_de_microondas&oldid=60409963)
- Direct Industry. (2020). Secador por convección: Maquinaria y equipos industriales. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/beltron-gmbh/product-87755-1913869.html>
- Fellows, P. (2000). Food processing technology, principles and practice. Ed. Woodhead.
- Fito, P., & Grau, A. (2001). Introducción al Secado por Aire Caliente (1 ed., Vol. 1). Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- García, C., Sierra, M., & Miranda, L. (2016). Modelado de la cinética de secado en microondas de ñame. Información Tecnológica, 27(1).
- Golestani, R., Raisi, A., & Aroujalian, A. (2013). Mathematical modeling on air drying of apples considering shrinkage and variable diffusion coefficient. Drying Technology.
- Hamburg, G. (2020). CE 130 Secado por convección. Obtenido de <https://www.gunt.de/es/productos/ingenieria-de-procesos/ingenieria-de->

procesos-termicos/secado-y-evaporacion/secado-por-conveccion/083.13000/ce130/gIct-1:pa-150:ca-240:pr-12#:~:text=Los%20secaderos%20por%20convecci%C3%B3n%20se,por%20convecci%C3%B3n%20de%2

Hosain, D. (s.f.). Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices.

Mujumdar, A. (2006). Handbook of Industrial Drying (Tercera ed.). Taylor & Francis Group, LLC.

Ohaco, A. d. (2012). Deshidratacion y desecado de frutas, hortalizas y hongos. Buenos Aires: INTA.

Okuy Megues, H., & Can , E. (11 de Junio de 2005). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. Turquia.

Pérez Suelo, D. B. (2017). Simulación de la variación de temperatura interna por efecto de la temperatura de almacenamiento, variedad de papa y forma de almacenaje. Universidad Nacional del Centro del Perú Facultad.

Rubín, D. A. (2015). Acondicionamiento electrónico de la instrumentación para la automatización de un banco de ensayo de un compresor alternativo. Departamento de ingeniería energética y fluidomecánica.

Simal, S., Deya, E., Frau, M., & Roselló, C. (1997). Simple modelling of air-drying curves of fresh and osmotically pre-deshydrated apple cubes. Journal of Food Engineering.

Sitesgoogle. (2008). Mecanismos usados para conveccion de aire caliente. Obtenido de <https://sites.google.com/site/lasmanosdehacha/mecanismos-y-circuitos/3-1-objeto-tecnologico/3-2---mecanismos-y-circuitos-del-secador-de-pelo>

Sweat, V. E. (1974). Experimental values o thermal conductivity of selected fruits and vegetables. New York: Journal of Food Science.

Sweat, V. E. (1995). Thermal properties of foods. New York: Marcel Dekker Inc.

**Anexos**





### Anexo 1. Código desarrollado en Matlab

```

clc
clear all
%ingresamos las variables necesarias
dt=0.001;
t= input('tiempo de secado en seg = ');
%El tiempo debe tener como maximo 2 decimales
x= t/dt;
ha= input('coeficiente de conveccion de placa del aire [kW/m^2°C] = ');
hl= input('coeficiente de conveccion lateral del aire [kW/m^2°C] = ');
D0= input('coeficiente de difusion del agua en la fruta [m^2/s] = ');
hm= input('coeficiente de conveccion de masa [m/s] = ');
p= input ('densidad de la fruta [Kg/m^3] = ');
X0=input('ingrese porcentaje de humedad = ');
pi= p*X0;
pfs=126;
cp=1*(1.4+3.22*X0);
k=(0.148+0.493*X0)/1000;
l= input('espesor de la rodaja [m] = ');
L= l/2;
r= input('radio de la rodaja [m]= ');
T0= input('temperatura inicial [°C]= ');
Tinf= input('temperatura del aire [°C]= ');
C0= input('Concentracion inicial = ');
Cinf= input('Concentracion del aire = ');
dx= 0.0001;
m=r/dx;
n=L/dx;
R=8.3;
Ea=39703.5;

```

```

% Creamos la matriz de distribución de temperaturas
for i= 1:m+1
    for j= 1:n+1
        T(i,j)= T0;
    end
end
% Creamos la matriz de distribución de humedad
for i= 1:m+1
    for j= 1:n+1
        C(i,j)= C0;
    end
end
%Definimos volúmenes de todos los cubos, con sus masas
v1=dx^3/4;
v2=v1*2;
v3=v1*4;
M1=v1*pi;
M2=M1*2;
M3=M1*4;
y=k*dt/(p*cp*dx^2);
T1(1)=T0;
% Creamos la matriz de distribución de masa
for i= 1:m+1
    for j= 1:n+1
        if(i==m+1 && j==n+1)
            M(i,j)= M1;
        end
        if(i<m+1 && j==n+1)
            M(i,j)=M2;
        end
        if(i==1 && j==n+1)
            M(i,j)=M1;
        end
        if(i==m+1 && j<n+1)

```

```

M(i,j)= M2;
end
if(i<m+1 && j<n+1)
    M(i,j)=M3;
end
if(i==1 && j<n+1)
    M(i,j)=M2;
end
if(i==m+1 && j==1)
M(i,j)= M1;
end
if(i<m+1 && j==1)
    M(i,j)=M2;
end
if(i==1 && j==1)
    M(i,j)=M1;
end
end
end
end
%Calculo de temperatura y masa de cada nodo en el instante siguiente
for b=1:x
    for j= n+1:-1:1
        for i= m+1:-1:1
            if (j==n+1)
                if (i==m+1)
                    T(i,j)=(1-(4*y)-(4*y*ha*dx/k))*T(i,j)+2*y*(T(i-1,j)+T(i,j-
1)+(2*ha*dx/k)*Tinf);
                    Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
                    M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx/2)*(C(i,j-1)+C(i-1,j)-2*C(i,j))-
hm*dx^2*(C(i,j)-Cinf))*dt;
                    C(i,j)=M(i,j)/v1;
                end
            end
            if (i<m+1 && i>1)

```

```

T(i,j)=(1-(4*y)-(2*y*ha*dx/k))*T(i,j)+y*(T(i-1,j)+T(i+1,j)+2*T(i,j-
1)+(2*ha*dx/k)*Tinf);
Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx/2)*(C(i-1,j)+2*C(i,j-1)+C(i+1,j)-4*C(i,j))-
hm*dx^2*(C(i,j)-Cinf))*dt;
C(i,j)=M(i,j)/v2;
end
if (i==1)
T(i,j)=(1-(4*y)-(2*y*ha*dx/k))*T(i,j)+(2*y*(T(i+1,j)+T(i,j-
1)+(ha*dx/k)*Tinf));
Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx/2)*(C(i+1,j)+C(i,j-1)-2*C(i,j))-
(hm*dx^2/2)*(C(i,j)-Cinf))*dt;
C(i,j)=M(i,j)/v1;
end
end
if (j<n+1 && j>1)
if (i==m+1)
T(i,j)=(1-(4*y)-(2*y*hl*dx/k))*T(i,j)+y*(T(i,j+1)+T(i,j-1)+2*T(i-
1,j)+(2*hl*dx/k)*Tinf);
Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx/2)*(C(i,j+1)+C(i,j-1)+2*C(i-1,j)-4*C(i,j))-
(hm*dx^2)*(C(i,j)-Cinf))*dt;
C(i,j)=M(i,j)/(v2);
end
if (i<m+1 && i>1)
T(i,j)=((1-(4*y))*T(i,j))+y*(T(i,j+1)+T(i-1,j)+T(i+1,j)+T(i,j-1));
Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx)*(C(i+1,j)+C(i-1,j)+C(i,j+1)+C(i,j-1)-
4*C(i,j)))*dt;
C(i,j)=M(i,j)/(v3);
end

```

```

if (i==1)
    T(i,j)=(1-4*y)*T(i,j)+y*(T(i,j+1)+(2*T(i+1,j))+T(i,j-1));
    Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
    M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx/2)*(C(i,j-1)+C(i,j+1)+2*C(i+1,j)-
4*C(i,j)))*dt;
    C(i,j)=M(i,j)/v2;
end
end
if (j==1)
    if (i==m+1)
        T(i,j)=(1-(4*y)-(2*y*hl*dx/k))*T(i,j)+(2*y*(T(i,j+1)+T(i-
1,j)+(hl*dx/k)*Tinf));
        Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
        M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx/2)*(C(i-1,j)+C(i,j+1)-2*C(i,j))-
(hm*dx^2/2)*(C(i,j)-Cinf))*dt;
        C(i,j)=M(i,j)/(v1);
    end
    if (i<m+1 && i>1)
        T(i,j)=(1-4*y)*T(i,j)+y*(T(i+1,j)+T(i-1,j)+2*T(i,j+1));
        Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
        M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx/2)*(C(i+1,j)+C(i-1,j)+2*C(i,j+1)-4*C(i,j)))*dt;
        C(i,j)=M(i,j)/(v2);
    end
    if (i==1)
        T(i,j)=(1-4*y)*T(i,j)+2*y*(T(i,j+1)+T(i+1,j));
        Dab = D0*exp(-Ea/(R*(T(i,j)+273.15)));
        M(i,j)=M(i,j)+((Dab*dx/2)*(C(i+1,j)+C(i,j+1)-2*C(i,j)))*dt;
        C(i,j)=M(i,j)/(v1);
    end
end
end
end
end

```

```
%Postprocesado y toma de datos para las graficas
```

```
W=mean2(C);
```

```
X(b)=W/(W+pfs);
```

```
cp=1*(1.4+3.22*X(b));
```

```
k=(0.148+0.493*X(b))/1000;
```

```
z(b)=C(1,1);
```

```
Z(b)=T(1,1);
```

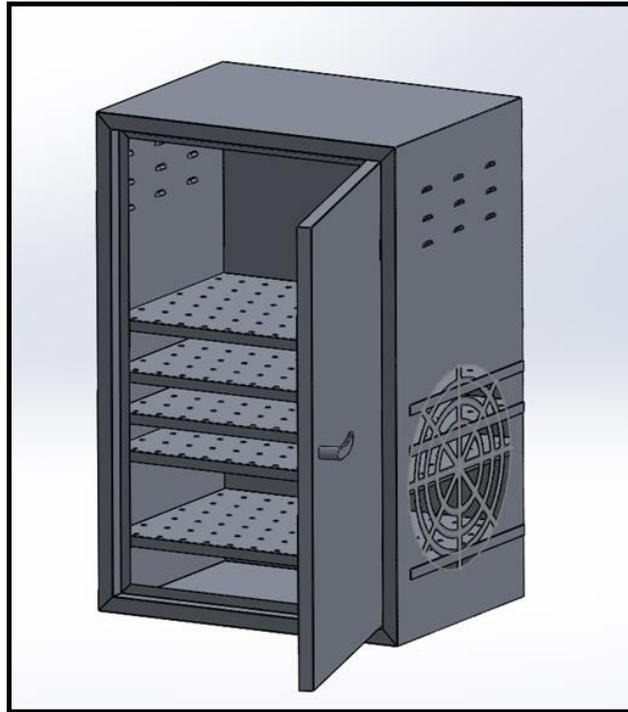
```
B(b)=mean2(C);
```

```
end
```

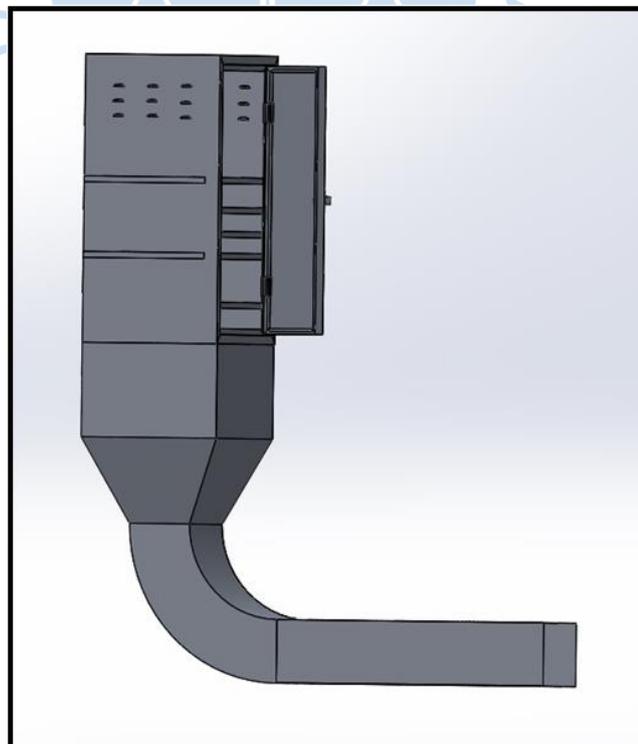
Fuente: Elaboración propia.



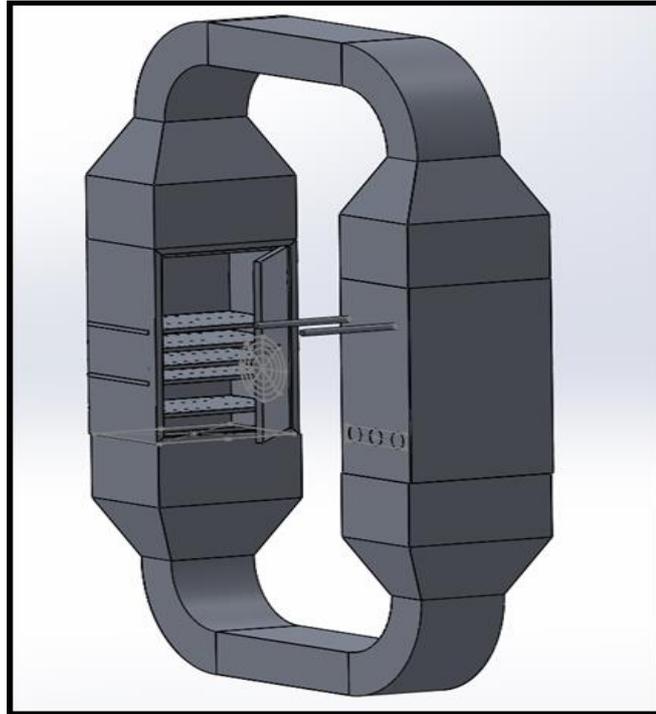
## Anexo 2. Diseño de secadores por convección en SolidWorks



*Figura 1: Representación de deshidratador de frutas.*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 2: Representación de deshidratador de frutas.*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 3: Representación de módulo secador por convección.*  
Fuente: Elaboración propia.

