



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
EVALUACION DE ORIGINALIDAD



CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de la TESIS cuyo título es:

“Modelamiento y simulación de transferencia de calor y masa / usando computación dinámica de fluidos (CFD) durante el secado del aguaymanto (Phisalis-peruviana L)”

Presentado por:

QUISPE QUICHCA, SANDY NORA /

BACHILLER del nivel **PREGRADO** de la **ESCUELA DE INGENIERÍA ALIMENTOS**

Que. Se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos de la UNICA, El informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 09%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate.

Pisco, 09 de setiembre de 2025

.....
DR. JOSE FERNANDO FOC REAÑO
DIRECTOR DE UNIDAD DE INVESTIGACION
FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y DE
ALIMENTOS

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA" VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y DE ALIMENTOS



"Modelamiento y simulación de transferencia de calor y masa usando computación dinámica de fluidos (CFD) durante el secado del aguaymanto (*Phisalis-peruviana L*)"

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

CIENCIAS NATURALES, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERIO DE ALIMENTOS

AUTOR:

BACH: QUISPE QUICHCA SANDY NORA

PISCO – ICA 2025

DEDICATORIAS

Este logro dedico a mi madre por su gran esfuerzo constante, por haberme brindado todo su apoyo día a día en el transcurso de cada año de mi carrera profesional, sin ella no lo hubiera logrado.

A Dios, por siempre darme fuerzas en este largo camino que aun queda por recorrer, por su bendición incomparable, podre seguir adelante en mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener una super experiencia dentro de mi universidad, gracias a mi universidad por permitirme convertirme en ser un profesional en lo que tanto me apasiona, gracias a cada maestro que hizo parte de este proceso de formación, que deja como producto terminado este grupo de graduados, y como recuerdo y prueba viviente en la historia; esta tesis, que perdurara dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que están por llegar.

A mi asesor de Tesis M.Sc. Jean Lopez Del Mar. Por su conocimiento y asesoría en este proyecto, gracias a su apoyo y consejos constantes durante el proceso de este proyecto.

INDICE GENERAL

I. INTRODUCCION	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2. Antecedentes de la Investigación.....	2
1.3 Bases teóricas.....	5
1.3.1 Características del aguaymanto.....	5
1.3.2 Clasificación taxonómica.....	6
1.3.3 Descripción botánica.....	6
1.3.4 Usos y consumos.....	6
1.3.5 Composición nutricional del aguaymanto.....	7
1.3.6 Producción de aguaymanto en el Perú.....	7
1.4 Formulación del problema.....	7
1.5 Justificación e importancia de la investigación.....	8
1.6 Objetivos.....	8
1.7 Hipótesis y variables de la investigación.....	8
II ESTRATEGIA METODOLOGICA	
2.1 Materiales.....	9
2.2 Métodos.....	9
III. RESULTADOS	15
IV.CONCLUSIONES	23
V. RECOMENDACIONES	24
VI BIBLIOGRAFIA	25
VII. ANEXOS	28

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. El aguaymanto.....	5
Figura 2.1. Geometría del aguaymanto.....	10
Figura 3.1. Geometría del volumen del secador y la dirección del flujo aire caliente.....	16
Figura 3.2. Vista de corte del proceso de secado del aguaymanto.....	16
Figura 3.3. Evolución de las diferentes curvas a lo largo de las iteraciones.....	17
Figura 3.4. Tiempo de flujo frente al promedio de la presión.....	18
Figura 3.5. Tiempo de flujo frente al valor promedio de la temperatura.....	19
Figura 3.6. Tiempo de flujo frente a la fracción másica del agua.....	20
Figura 3.7. Grafico de contorno de la temperatura.....	21
Figura 3.8. Grafico de contorno de la fracción másica de agua.....	22
Figura 3.9. Histograma de la calidad ortogonal.....	23

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición nutricional del aguaymanto.....	7
---	---

RESUMEN

Se desarrolló un modelo de transferencia de calor y masa para conocer y aplicar, mediante simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), los gradientes de humedad y temperatura en el proceso de secado convectivo del aguaymanto. La simulación de secado se realizó para el régimen de flujo inestable, para el aguaymanto siguiendo el contenido de humedad y la temperatura de la capa límite y la pulpa. El aguaymanto se representó con una geometría estable, y su pulpa como un material vegetal homogéneo e isotrópico. La discretización del modelo secador-albaricoque fue híbrida. El modelo de transferencia de calor y masa se vinculó con la simulación CFD mediante UDF (Funciones Definidas por el Usuario), utilizando funciones para las propiedades físicas del aguaymanto y el aire caliente, que varían con el tiempo. Durante la simulación los parámetros de aire caliente fueron los siguientes: velocidad del aire 1m/s temperatura del aire de 60°C y sus propiedades físico químicas que son reportados en el anexo 1. Los resultados finales de la humedad y temperatura obtenidos mediante la simulación se compararon con los datos reportados en la literatura con el fin de evaluar y validar la precisión del modelo del secado del aguaymanto.

Palabras Clave/Secado fruta, simulación CFD, gradiente humedad, temperatura.

ABSTRACTS

A heat and mass transfer model were developed to understand and apply, through CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation, the moisture and temperature gradients in the convective drying process of cape gooseberry. The drying simulation was performed for the unsteady flow regime, following the moisture content and temperature of the boundary layer and the pulp. The cape gooseberry was represented with a stable geometry, and its pulp as a homogeneous and isotropic plant material. The dryer-apricot model was discretized using a hybrid method. The heat and mass transfer model were linked to the CFD simulation through UDFs (User Defined Functions), using time-varying functions for the physical properties of the cape gooseberry and the hot air. During the simulation, the hot air parameters were as follows: air velocity of 1 m/s, air temperature of 60°C, and its physical and chemical properties, which are reported in Appendix 1. The final humidity and temperature results obtained through the simulation were compared with data reported in the literature to evaluate and validate the accuracy of the cape gooseberry drying model.

Keywords: Fruit drying, CFD simulation, humidity gradient and temperature.

I. INTRODUCCION

La creciente demanda de aguaymanto deshidratado y la necesidad de optimizar los procesos de secado para preservar sus propiedades nutricionales y sensoriales, han impulsado la aplicación de herramientas computacionales avanzadas. Dentro de este contexto, el Modelamiento y Simulación de Transferencia de Calor y Masa utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) emerge como una metodología robusta y predictiva para analizar y mejorar el proceso de secado del aguaymanto.

Este enfoque permite una comprensión profunda de los complejos fenómenos que ocurren a nivel micro y macroscópico durante la deshidratación. Mediante la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales de conservación de masa, momento y energía, el CFD posibilita la visualización y cuantificación de los perfiles de velocidad del aire, temperatura y concentración de humedad dentro del secador y alrededor de las partículas individuales de aguaymanto. Esto es crucial para identificar zonas con flujo deficiente, gradientes térmicos no deseados o acumulación de humedad, factores que inciden directamente en la eficiencia del secado y la calidad del producto final.

La simulación CFD no solo facilita la optimización del diseño de los secadores y las condiciones operativas (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire), sino que también permite predecir el comportamiento de secado del aguaymanto bajo diversas configuraciones, minimizando la necesidad de experimentación física costosa y prolongada. De esta manera, se logra un control más preciso sobre la cinética de secado, promoviendo una remoción homogénea de agua y contribuyendo significativamente a la producción de aguaymanto deshidratado de alta calidad

1.1. Planteamiento del problema

El secado es una de las operaciones unitarias más complejas, que comprende la transferencia de materia y energía en forma simultánea. Durante ella el material que se seca sufre una serie de transformaciones físicas y químicas. Dichas transformaciones afectan tanto la calidad del producto como a los mecanismos de transferencia de materia y energía.

Los productos de origen agrícola como son las frutas, verduras y tubérculos, constituyen una fuente importante e indispensable de vitaminas y minerales para el ser humano, su cultivo y su posterior preservación constituyen todo un desafío de índole tecnológico, lo cual aunado a su consumo va en aumento, lo que implica que se requieren de mejores

procesos de conservación, para lograr prolongar su tiempo de conservación según la referencia [10].

Consecuentemente las exigencias de los países importadores de productos deshidratados en cuanto a calidad, presentación e inocuidad, son factores importantes en la preservación. Para ello es necesario investigar y estudiar distintos procesos de deshidratación simples o combinados, aplicando nuevas tecnologías, para su modelización matemática y su posterior optimización del proceso de deshidratación.

1.2. Antecedentes de la Investigación.

En años recientes, la computación de dinámica de fluidos (CFD), ha sido utilizado cada vez más, para mejorar la capacidad en el diseño de procesos y en varias aplicaciones industriales, incluyendo en el proceso de secado industrial de productos alimenticios, en esta área han sido publicados trabajos relacionados con la utilización (CFD), indican que es una técnica emergente, ampliamente aceptable para las simulaciones numéricas de tales sistemas, ha demostrado ser una herramienta computacional efectiva para predecir el comportamiento del flujo y los fenómenos de transferencia de masa que ocurren en sistemas multicomponentes con una o más fases. En la revisión extensa que realizan **Jamaleddine and Mathumita [1]**, de los trabajos de investigación publicados en las dos últimas décadas, relacionados con la simulación y uso de la computación de la dinámica de fluidos (CFD) en el proceso de secado de productos de varios materiales alimenticios en diferentes condiciones, afirman que, dicho proceso de secado, consume grandes cantidades de energía y cualquier mejora o innovación en el diseño del secador existente y la reducción de costos son altamente beneficios para la industria, así mismo proporcionan una breve introducción al (CFD), donde analizan diferentes métodos numéricos, como el elemento finito, la diferencia finita y el volumen finito, también discuten las formulaciones Euleriana-Euleriana y Euleriana- Larangriana, junto a sus ventajas y desventajas.

En este estudio, **Petru et al, [2]**, han desarrollado un modelo de transferencia de calor y masa para simular con (CFD), donde los gradientes de humedad y temperatura en el secado por convección del albaricoque, la simulación del secado, se realizó para el régimen de flujo no estacionario para los albaricoques crudos y blanqueados, teniendo en cuenta su contenido de humedad y la temperatura de la capa límite y pulpa, los albaricoques han sido representados con una geometría que no cambian con el tiempo y su pulpa como material vegetal homogéneo e isotrópico.

La discretización del modelo secador- albaricoque fue tomada como híbrida. El modelo de la transferencia de calor y masa se vinculó a la simulación por medio de la función definida por el usuario (UDF), usando funciones, se han tenido en cuenta la propiedad física del albaricoque y el aire caliente que varían con el tiempo, en la parte experimental la velocidad

del aire fue 25.1 m/seg y la temperatura del aire de 353⁰K y el tiempo de secado 2.5 horas. Los datos obtenidos por la simulación y la parte experimental fueron comparados con el propósito de evaluar la precisión del modelo de secado para el blanqueado y no blanqueado del albaricoque.

En este trabajo, **Haileeyescu *et al*, [3]**, señalan que la falta de indicadores apropiados de calidad, para la predicción por medio de la dinámica de fluidos computacional (CFD) de secado por aspersión de la leche de camello impidió la simulación del proceso. En cambio, indican que esta investigación es diseñada para correlacionar el perfil de temperatura de las partículas de polvo con la solubilidad de las proteínas de leche del camello con el objetivo final de identificar los mejores indicadores de calidad adecuados para la simulación con (CFD), realizaron la parte experimental del secado por aspersión variando la temperatura de secado de 140-200⁰C, manteniendo el caudal de aire de secado en (7,5 m³/min), caudal de emulsión en (0.0003 kg/s) y la presión de atomización (0.52Mpa) en forma constante, los resultados mostraron que la simulación con (CFD) predijo la temperatura de salida con 0.43% y 0.73% de errores a temperaturas de entrada de 140 °C y 170⁰C respectivamente y con 8.69% de error a 200⁰C. Además, los investigadores verificaron que la obtención de la leche de camella en polvo deshidrata se correlacionaron bien con los perfiles de temperatura predichos por (CFD) de las partículas.

En este artículo, **Le page *et al*, [4]**, informa sobre el desarrollo de un procedimiento de modelado CFD empírico aproximado que combina correlaciones experimentales para la determinación del coeficiente de transferencia de calor y masa y sus funciones definidas por el usuario (UDF), implementadas en el código CFD comercial Fluent, para simular las interrelaciones entre el flujo de aire y transferencias de productos alimenticios sin envolver que se contactan con flujo en el aire, indican además que el modelado de transferencia requería un cálculo específico para tener en cuenta la evaporación del agua de la superficie del producto. Detallan que los coeficientes de transferencia medios en la interfaz aire-producto se determinaron empíricamente a partir de correlaciones experimentales validadas, donde se incorporaron la velocidad media del aire CFD, que han sido calculados en un pequeño volumen definido por el usuario que rodea al producto, se tuvo en cuenta la difusión interna del agua considerando el producto como un fluido inmóvil compuesto de materia seca y agua, así mismo detallan que el procedimiento desarrollado permite un único calculo CFD de malla única, calcular los campos de temperatura y concentración de agua y determinar la cinética de perdida de agua de los productos, así como los campos de temperatura y humedad relativa del aire que circula a su alrededor, según los autores señalan que el procedimiento establecido fue con el objetivo de evaluar los intercambios de calor y agua que se producen en grandes pilas de productos alimenticios, sometidos al flujo de aire, esto fue validado para modelar el secado unidimensional de la forma cilíndrica de carne.

En este trabajo, **Elgamal *et al* [5]**, formulan y describen, que el comportamiento de secado de granos de arroz, sometido al secado por convección se analizaron numéricamente resolviendo las ecuaciones de transferencia de calor y humedad, utilizando el CFD acoplado a un modelo de difusión. Los coeficientes de transferencia se calcularon simultáneamente con el campo de flujo externo y el campo de difusión interna del grano. El modelo fue validado, utilizando los resultados experimentales de secado proporcionados en la literatura, los efectos de la velocidad y la temperatura del aire de secado, en él se analizaron los granos de arroz, donde se encontró que la temperatura del aire fue la principal variable que afectó la tasa de secado del núcleo del arroz.

Defraeye *et al* [6], estudiaron el rendimiento de varios modelos promediados de turbulencia de Navier-Stokes para números de Reynolds estables, enfocaron y evaluaron el modelo de la capa límite para una sola esfera, donde hicieron la comparación con datos empíricos, para un rango de número de Reynolds de 10^{-3} a 10^4 , además señalaron, que la forma esférica sirve como modelo representativo para muchos productos alimenticios esféricos, señalaron además que el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante funciona muy bien cuando se combina con un modelo del número de Reynolds de valor bajo en la capa límite, indican también que el uso del tamaño de celdas en la superficie de la esfera de unos pocos milímetros, típicos en los estudios de CFD, en productos alimenticios, puede comprometer la precisión de los resultados en la fase de simulación.

Hu y Wen Sun, [7] estudiaron y llevaron a cabo una simulación numérica de la transferencia de calor y masa de una carne cocida de forma cilíndrica dentro de un enfriador de aire, para predecir su tasa de enfriamiento y la pérdida de peso durante el enfriamiento usando el código de la dinámica de fluidos computacional (CFD), dicha investigación se basa en un modelo de solución matemática analítica de calor no estacionario y transferencia de masa, con el supuesto que la transferencia de calor es tipo homogénea, los coeficientes tienen en cuenta los efectos de la convección forzada, la radiación y la evaporación de la humedad en la superficie, este método permite la predicción CFD simultáneamente, de la distribución de temperatura y la pérdida de peso en la carne, los factores que afectan la precisión de la simulación y los posibles errores de medición en los experimentos de validación son discutidos. La simulación se puede adaptar fácilmente a otras formas elementales y condiciones de funcionamiento y en diferentes alimentos.

Mathioulakis *et al*, [8] se aplicó en los años 1960 – 1970 en los Estados Unidos de América en el laboratorio nacional de Palo Alto.

Se construyeron un secador de aire de bandeja tipo batch, para el secado de varias frutas, el movimiento del aire dentro de la cámara de secado fue simulado por la dinámica de fluidos computacional (CFD). Los perfiles de presión y la velocidad del aire en la cámara de secado por encima del producto se determinaron mediante el CFD, se realizaron varias pruebas de

secado y su resultado determinaron que hay pérdida de peso y una variación de sequedad en varias bandejas y la falta de uniformidad también, observaron en ciertas áreas de la cámara, también indicaron que los datos obtenidos por el CFD y los datos obtenidos experimentalmente mostraron una fuerte correlación entre la velocidad de secado y la velocidad del aire.

1.3. Bases Teóricas

1.3.1. Características del aguaymanto

Es una especie originaria de Sudamérica que se la conoce desde Venezuela hasta Chile. Sus nombres son uchuva (Colombia); uvilla (Ecuador) y capulí en el Perú (el que lleva a confusión con (*Prunus serotina*); se usa también la denominación de aguaymanto en el sur del país. Las plantas son herbáceas pequeñas, hasta 1 m de altura. El fruto es una baya esférica de 1 cm de diámetro, liso, de color amarillo.

La uchuva (*Physalis peruviana L.*) pertenece a la familia de las Solanáceas y al género *Physalis*, cuenta con más de ochenta variedades que se encuentran en estado silvestre y que se caracterizan porque sus frutos están encerrados dentro de un cáliz o cápsula. Es originaria del Perú, es la especie más conocida de este género.



Fig. 1.1. El aguaymanto (*Physalis peruviana L.*)

<https://ecograins.wordpress.com/2014/05/02/caracteristicas-del-aguaymanto>

1.3.2. Clasificación taxonómica

TAXONOMIA

Reino: Plantae
División: Magnoliophyta
Clase: Magnoliopsida
Orden: Solanales
Familia: Solanoideae
Subfamilia: Solanoideae
Tribu: Physaleae
Género: Physalis
Especie: *Physalis peruviana* L.

1.3.3. Descripción botánica

Es un [arbusto](#) que alcanza un tamaño de hasta 1 a 1,6 m de alto con ramas extendidas, aunque si se estaca, poda y se le da un buen cuidado esta planta puede llegar a los 2 m de altura. Las hojas son ovales y puntiagudas de color verde en forma de corazón. Las flores hermafroditas tienen forma de campana y caídas, de 15 a 20 mm de ancho, amarillas con manchas de color marrón púrpura en el interior, fácilmente polinizadas por [insectos](#) y el viento. El [fruto](#) es una [baya](#) globulosa de color naranja amarillento de 1,26 y 2 [cm](#) de diámetro, está envuelta por una vesícula costillada de color verde la cual es procedente del [cáliz](#).

1.3.4. Usos y consumos

Esta fruta puede consumirse sin procesar, como fruta deshidratada, también se incorpora en jugos, mermeladas, helados, dulces y jaleas. Estas cualidades la han convertido a la uchuva en un producto muy apetecido en los mercados de Japón y Europa. Según el National Research Council, el jugo de la uchuva madura tiene altos contenidos de pectinasa, lo que disminuye los costos en la elaboración de mermeladas y otros preparativos similares.

1.3.5. Composición nutricional del aguaymanto

Componentes	Valor nutricional por 100 gr. de aguaymanto
Vitaminas: alto contenido de vitamina A	1460 mg/100 g. y vitamina C (ácido ascórbico)
Minerales:	Aporta calcio, hierro y fósforo
Proteínas:	1900 mg/100 g
Lípidos	0.5 g/100 g
Fibra	4.9 g/100 g
Carbohidratos	14.9 g /100 g.
Compuestos fenólicos	Posee capacidad antioxidante

Tabla.1.1: Composición nutricional del aguaymanto

Fuente: <https://fdc.nal.usda.gov/food-details/173043/nutrients>

1.3.6. Producción del aguaymanto en el Perú

En Perú, las principales regiones productoras de aguaymanto son Huánuco, Junín, y Lambayeque, entre otras. Huánuco destaca con la mayor participación en la producción nacional, superando el 80% en 2020. Otras regiones importantes incluyen Amazonas, Apurímac, Ancash, Arequipa, Ayacucho, Cajamarca, Cusco, Huancavelica, Pasco y Moquegua.

1.4. Formulación del problema

¿Cómo y de qué modo será la predicción del comportamiento del proceso de secado convectivo del aguaymanto, mediante el modelamiento matemático y simulación, de la solución de las ecuaciones de transferencia de calor y humedad, usando la Dinámica de fluidos computacional?

¿la aplicación del CFD en la transferencia de masa y calor en el proceso de secado convectivo, junto con sus variables como son, la velocidad y temperatura del aire y el tiempo de secado, que nivel de confiabilidad numérica se logran en este proceso de modelamiento y simulación en la predicción de estos parámetros?

1.5 Justificación e importancia de la investigación

En los países en vías de desarrollo se estima que cerca de un 30 – 40 % de las frutas, vegetales y tubérculos cultivados se llegan a perder debido a la falta de un adecuado manejo de transporte y preservación (2).

En ese sentido, el agua que contienen y que representa más del 80 % de su peso, es un factor determinante en la pronta descomposición de los mismos.

La necesidad de disminuir las pérdidas de pos- cosecha, además del valor agregado que puede adquirir un producto, son parámetros importantes a tomar en consideración en los países en vías de desarrollo, especialmente ahora, cuando las necesidades de mayor producción de alimentos se han incrementado y los ingresos de clases sociales dedicados al cultivo de productos agrícolas son bajos.

Para el caso de la deshidratación actualmente existen una gran variedad de métodos o procesos, en donde los parámetros de eficiencia energética, tiempo de secado y calidad del producto final se utilizan para seleccionar la mejor opción, dependiendo de los requerimientos del mercado, en este ámbito el estudio de la transferencia de masa y calor, se inician desde un punto de vista de los fenómenos de transporte, seguido de los procesos de separación macroscópica, para poder desarrollar esta área, se requieren un conocimiento en el análisis matemático y en herramientas computacionales para el diseño y optimización de los procesos y es donde la aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD), cobra una mayor importancia y es a su vez, es una herramienta computacional poderosa y versátil en el modelamiento y simulación de diversos procesos unitarios en la Ingeniería de alimentos.

1.6 Objetivos

Objetivo General

El objetivo principal de este proyecto de tesis, es determinar el gradiente interno de la temperatura y humedad del aguaymanto, tomando en cuenta el régimen de secado no estacionario por medio de la simulación CFD, usando un modelo multifásico.

Objetivo Especifico

- Determinar, la predicción de gradientes de transferencia de calor su evolución con la variación de la velocidad de flujo de aire en el secador convectivo.
- Determinar, la predicción del gradiente de la humedad (transferencia de masa) en la interfase aire – agua en la superficie del fruto

1.7 Hipótesis y variables de la investigación

a) Hipótesis general

HI: La simulación con CFD en el secado conectivo proporcionan una predicción optima

Ho: La simulación con CFD en el secado conectivo no proporcionan una predicción óptima.

b) Hipótesis específico

Los gradientes de velocidad y la temperatura del flujo de aire influyen en el secado por convección.

La variación de los coeficientes de transferencia de calor y masa en el secado por convección que incidencia tiene en los gradientes de temperatura y velocidad del procesamiento térmico del secado

c) Variable Independiente (X)

El modelo de la simulación computacional y el método de mallado por volúmenes finitos más el modelo matemático de la transferencia de calor y masa.

d) Variable dependiente (Y)

Predicción de los perfiles de temperatura y humedad en el proceso de secado.

e) Variable Interviniente

Las propiedades físicas y térmicas del material alimenticio y su tipo de geometría van incidir en su comportamiento frente a los campos y gradientes de temperatura y humedad.

El tipo de investigación realizado es del tipo cuantitativo y aplicado.

II. ESTRATEGIA METODOLOGICA

2.1. Materiales

Materia prima: aguaymanto utilizado, corresponde a la especie *Physalis*

Equipos y materiales: Balanza analítica, Durómetro - medir firmeza

2.2 Método

El procedimiento empleado aquí, es la utilización de un modelo acoplado del CFD y de la transferencia

calor y masa en el proceso de secado del aguaymanto, desarrollado por, **Carlescu, et al [2]**, es un modelo

donde, la complejidad del fenómeno requiere ser formulado bajo las siguientes suposiciones:

- a) La geometría del producto es una esfera dividido en dos capas el núcleo y la pulpa.

- b) La conducción del calor y el proceso difusión son considerados en estado no estacionario, dinámico o transiente.
- c) La contracción o el encogimiento del volumen del aguaymanto se consideran constante.
- d) No existe generación interna de calor dentro del producto, no hay calor de respiración.
- e) El flujo de aire es laminar.

El modelo dinámico considera la siguiente geometría del aguaymanto, como se muestra en la figura 2.1.

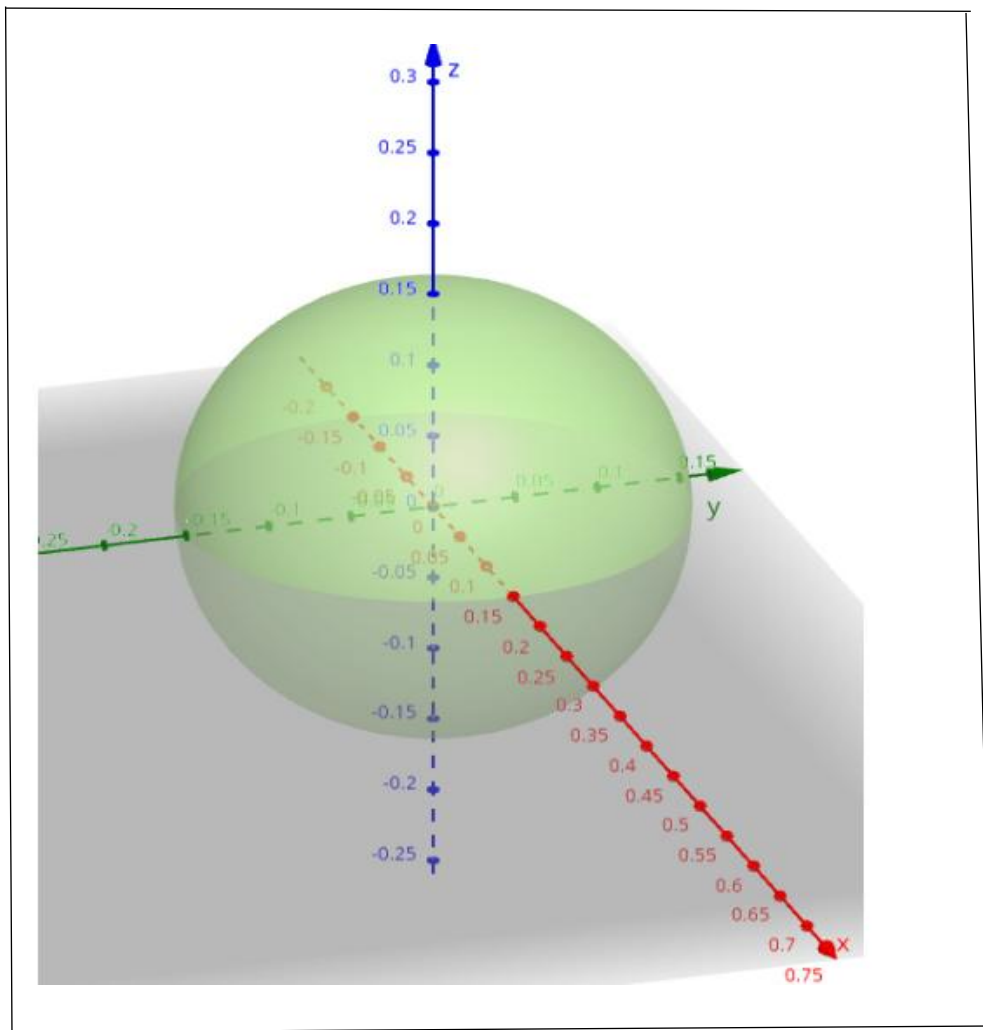


Figura 2.1 geometría del aguaymanto, medidas en metros.

Fuente: Elaboración propia

En la simulación del proceso de secado del aguaymanto, se utiliza un acoplamiento del CFD, con un modelo externo para la transferencia de calor y masa del producto, implementando en el software Ansys-Fluent.

El modelamiento matemático del secado es estimado a través de la ecuación de conservación de masa o ecuación de continuidad para un flujo laminar, y es escrito de la siguiente manera, (Fluent. Inc. 2006):

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla(\rho_a \cdot u) = 0 \quad (1)$$

La ecuación de conservación de movimiento es expresada de la siguiente forma (Fluent. Inc. 2006):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a \cdot u) + \nabla(\rho_a \cdot u \cdot u) + \nabla_p = 0 \quad (2)$$

Donde:

ρ_a : densidad del aire

La Transferencia de masa humedad, es escrita mediante una ecuación diferencial parcial (Fluent. Inc. 2006):

$$\frac{\partial(\rho \cdot \Phi)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \mu \cdot \Phi) = \nabla(\Gamma \cdot \nabla \Phi) + S_\Phi \quad (3)$$

Donde:

ρ_a : Densidad del aire (kg/m³)

τ : Tiempo en (s)

∇ : Operador

u : Velocidad Darcian

P : Presión estática (pa)

Φ : Humedad del aire de la capa limite

Γ : Coeficiente efectivo de difusión

La Ecuación (3), se refiere a una región de muestra diferencialmente pequeña y ello implica que las propiedades han sido promediadas sobre un volumen finito, de lo contrario serian discontinuos en los límites del aguaymanto y el aire. Expresamos la ecuación (3) en términos de símbolos asociados con la transferencia de la humedad en el proceso de secado y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial(\rho_a \cdot X_a)}{\partial t} + \nabla(\rho_a \cdot \vec{\mu} \cdot X_a) = \nabla(D_{eff} \cdot \nabla X_a) + S_x \quad (4)$$

Donde:

X_a : contenido de humedad del aire (Kg agua/ Kg de aire seco)

El termino S_x (Kg/m³x s) aparece como resultado de la absorción y desorción de la humedad del aguaymanto y tiene la expresión siguiente:

$$S_x = +\rho_p \cdot k_x (X - X_e) \quad (5)$$

Donde:

K : constante de secado (1/s)

ρ_p : densidad del aguaymanto (Kg/m³)

X : Contenido de humedad del aguaymanto (Kg agua/Kg de producto seco)

X_e : contenido de humedad de equilibrio, (Kg agua/Kg de producto seco)

El coeficiente de difusión efectiva del vapor de agua D_{eff} (m²/s) para el aguaymanto fue estimado teniendo en consideración el secado a diferentes temperaturas T (K) entre 40 °C y 80 °C y con una velocidad de aire de 1 m/s. **Mondaca et al, [11]**

$$D_{eff} = 1.41 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-31.59/RT} \quad (6)$$

Donde:

R : constante de los gases

T; Temperatura absoluta en $^{\circ}\text{K}$

La densidad del aguaymanto, se estimó, mediante relaciones empíricas, modelos basados en la humedad o composición proximal, teniendo en consideración su composición correspondiente y una temperatura promedio de 318°K . Burgos y Rivera, (2018).

$$\rho_p = \sum(\rho_i X_{mi}) \quad (7)$$

Donde:

ρ_i : densidad de cada componente del aguaymanto

X_{mi} : Fracción másica de cada componente del aguaymanto.

Los modelos de secado para la mayoría de los materiales alimenticios son basados en la segunda Ley de Fiks y los parámetros cinéticos del secado del aguaymanto como son la difusividad efectiva de la humedad (D_{eff}), la energía de activación (E_a), y (k) constante de secado se obtienen a partir de los datos experimentales por ajuste de regresión lineal, en este caso los datos del secado cinético del aguaymanto, fueron tomados de la literatura Mendoza, J.A. (2017).

En la ecuación (5), es expresada una constante de secado (K), donde varia a diferentes temperaturas $T(K)$ y es reportada por **Velescu [15]**

$$K = 8928.138 \cdot \exp(-6095.901 \cdot T^{-1}) \quad (8)$$

El contenido de humedad de equilibrio del producto X (kg de agua/kg producto seco) es una función de la temperatura $T(K)$ y la humedad relativa (r) del aire en la capa límite del aguaymanto, escrito en forma inversa se tiene la siguiente ecuación.

$$X_e = -B^{-1} \cdot \log \{[(T-273.15) + C] \cdot A^{-1}\} \cdot \log r \quad (9)$$

En este trabajo se utilizaron relaciones modificadas con constantes empíricas A , B y C , asumiendo que los valores calculados 25401, 4.313 y 154.77 para el aguaymanto de acuerdo a **Kaymat *et al* [12]**.

La humedad relativa del aire (r) de la capa límite es calculado de acuerdo **Srikiaden y Roberts [13]**

$$r = \frac{(X_a \cdot P) \cdot (0.622 \cdot X_a)^{-1}}{6.10^{25} \cdot T^{-5} \cdot \exp(-6800 \cdot T^{-1})} \quad (10)$$

Donde:

r: humedad relativa del aire

P: presión del aire en Pa.

Xa: es el contenido de humedad del aire (kg agua/Kg de aire seco)

La transferencia de calor entre el aire caliente y el aguaymanto es basada en el balance de entalpia, usando la siguiente expresión.

$$(\rho_a \cdot C_p + \rho_p + C_{pw} \cdot X) \frac{\partial T}{\partial \tau} + C_{pa} \nabla(\rho_a \cdot \mu \cdot T) = K \nabla^2 T + S_h \quad (11)$$

Donde:

C_{pa}: calor específico del aire (J/Kg.°K)

C_p: calor específico del aguaymanto (J/Kg.°K)

C_{pw}: calor específico del agua líquida 4180 (J/Kg.°K)

$$C_p = \sum(C_{pi} X_{mi}) \quad (12)$$

Donde:

C_{pi} : calor específico de cada componente del aguaymanto

X_{mi}: Fracción másica de cada componente del aguaymanto

Conductividad térmica del aguaymanto

$$K_{eff} = \sum(K_i X_{mi}) \quad (13)$$

Donde:

K_i: conductividad térmica de cada componente del aguaymanto

X_{mi}: Fracción másica de cada componente del aguaymanto

El calor específico y la conductividad térmica del aguaymanto, se estimó, mediante relaciones empíricas, o composición proximal, **Burgos y Rivera [14]**.

El término de la fuente térmica Sh (w/m³) resulta de la liberación o extracción de calor del aguaymanto al absorber o desorber la humedad y es definido por la siguiente ecuación:

$$S_h = -h_p \cdot \rho_p \cdot \frac{\partial X}{\partial \tau} \quad (14)$$

Donde:

h_p : Calor de sorción del agua en el aguaymanto (J/Kg de agua), de acuerdo a **Velescu [15]**

La Estrategia de solución en este trabajo es la simulación del proceso de secado mediante el paquete de software ANSYS –FLUENT, tomando en cuenta el régimen de secado no estacionario.

La temperatura T(K) y la humedad del aire X_a (kg agua/kg de aire seco) en la entrada del proceso de secado varía en el tiempo τ (s), para el precalentamiento y etapas del secado, algunas ecuaciones fueron incluidos en el Fluent, como es definido por el usuario a través de las siguientes ecuaciones:

Cuando el $\tau > 0$ entonces

$$T = 299.95 + 2.898 \cdot 10^{-2} \cdot \tau \quad (15)$$

$$X_a = 8.85 \cdot 10^{-3} + 7.7 \cdot 10^{-6} \tau \quad (16)$$

La geometría del aguaymanto no cambia durante la operación de secado, mientras la pulpa del aguaymanto, siendo un material vegetal fue considerado de tipo homogéneo e isotrópico.

El software Ansys Fluent, puede resolver la transferencia de masa de la textura del aguaymanto como un medio sólido y definiendo formalmente esta textura como fase fluida, pero con propiedades físicas y térmicas de un medio sólido. Por este método el software precisamente simula la transferencia de humedad del aguaymanto, definiendo la densidad por la ecuación (7) y la conductividad térmica con ecuación (14)

El modelo de secado propuesto para predecir los perfiles de humedad y temperatura basado en la simulación CFD, se sigue las siguientes etapas: inicialización de variables (contenido de humedad para el aguaymanto, temperatura y humedad absoluta del agente secante), ajustar o actualizar los valores de las variables en el tiempo para el contenido de humedad del producto y la humedad en la capa límite de la superficie del aguaymanto y cálculo de los términos de la ecuación de conservación de masa y energía.

La fase de simulación se hace, en base al modelamiento matemático descrito y expresado mediante las ecuaciones descritas anteriormente utilizando el Software Ansys Fluent acoplando las ecuaciones correspondientes y usando macros UDF

III. RESULTADOS

Resultados del modelamiento y simulación de la transferencia de calor y masa usando la computación dinámica de fluidos (CFD), durante el secado del Aguaymanto y las gráficas de predicción correspondientes.

La figura 3.1. muestra la geometría en la dimensión 3D, la dirección y orientación del flujo del aire en el secador en forma esquemática en el proceso de la simulación en CFD.

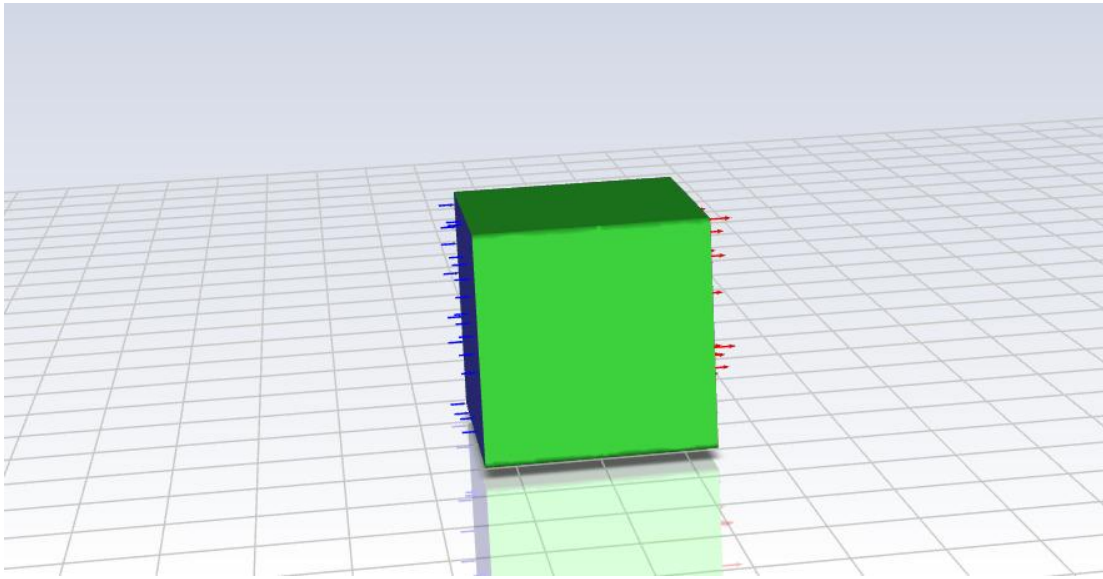


Figura 3.1: Geometría del volumen secador en 3D y la dirección del flujo del aire caliente.

Figura 3.2. Vista de corte de la geometría del secador y en el medio se sitúa el fruto del aguaymanto para el proceso del secado

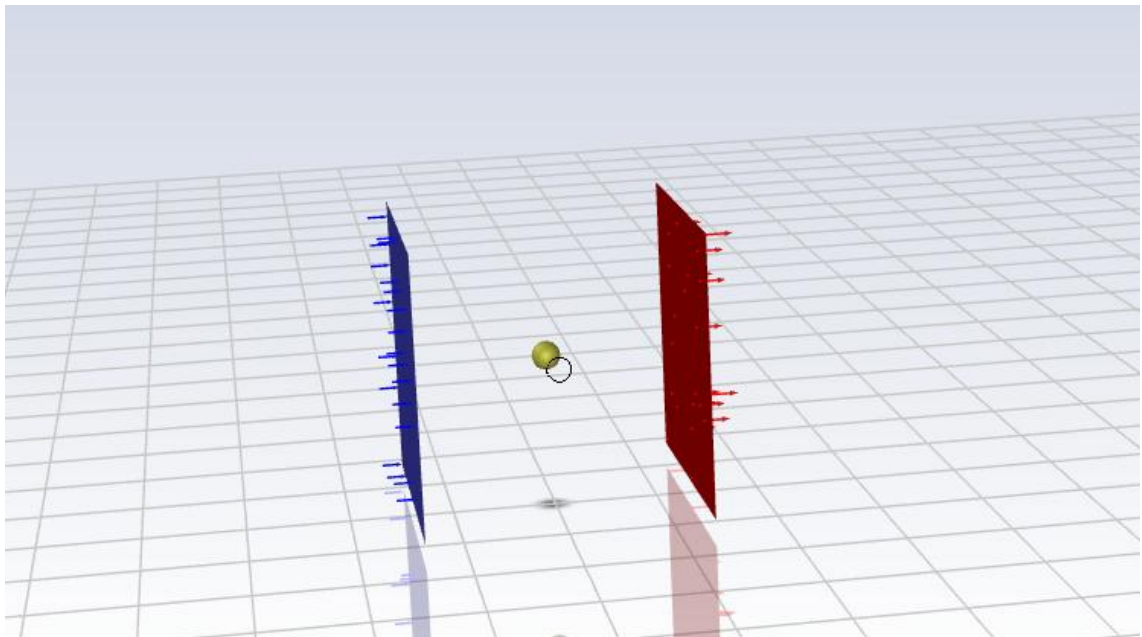


Figura 3.2: se presenta una vista de corte del proceso de secado del aguaymanto

La Figura 3.3. Muestra la convergencia de la simulación del secado de aguaymanto en Ansys Fluent. Cada línea representa la evolución del residuo de una variable específica a lo largo de las iteraciones.

- **Variables de Velocidad (x-velocidad, y-velocidad, z-velocidad) y Continuidad:** Estas curvas (generalmente las que empiezan más altas y descienden) muestran la reducción de los errores de discretización en las ecuaciones de movimiento y la conservación de la masa. En la gráfica, se observa que descienden rápidamente y luego se estabilizan, indicando que el flujo se está resolviendo de manera consistente.

- **Energía:** Esta curva de color rojo, representa la convergencia de la ecuación de energía. Su descenso y estabilización son cruciales en procesos de secado, ya que indican que el transporte de calor está siendo modelado correctamente.

- **k y epsilon (modelos de turbulencia):** Estas curvas son fundamentales si estás utilizando un modelo de turbulencia (k-epsilon). Muestran la convergencia de las ecuaciones para la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (epsilon). Su estabilización es vital para una predicción precisa de los fenómenos turbulentos.

- **H₂O y O₂ (fracciones de especies):** Estas curvas es muy importantes en la simulación de secado. representan la convergencia de las ecuaciones de transporte para el vapor de agua (H₂O) y el nitrógeno (O₂), que son los componentes clave en el secado por evaporación. Su descenso y estabilización indican que la distribución de humedad y la composición de la fase gaseosa se están resolviendo de manera consistente.

En general se observa que la mayoría de las curvas han descendido significativamente y se han estabilizado en valores bajos, lo que sugiere que la simulación ha alcanzado un buen grado de convergencia.

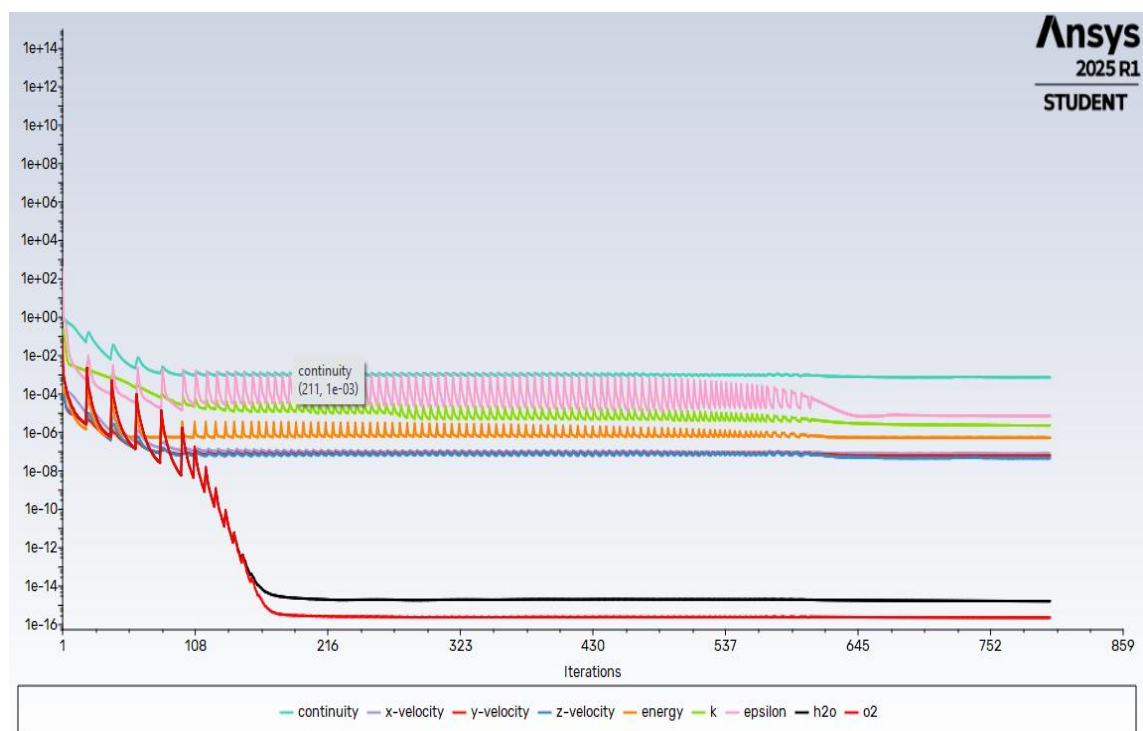


Figura 3.3. Evolución de las diferentes curvas a lo largo de las iteraciones

En la Figura 3.4. La gráfica muestra la evolución temporal del promedio ponderado por masa de la presión (Mass-Weighted Average of pressure) en la simulación del secado de aguaymanto en Ansys Fluent.

- Eje X (flow-time [s]): Representa el tiempo de la simulación en segundos.
- Eje Y (Mass-Weighted Average of pressure [Pa]): Muestra el valor del promedio de la presión, ponderado por el flujo másico, en Pascales.

Análisis de la curva:

1. Inicio (aproximadamente de 0 a 10 s): La presión comienza con un valor bajo, luego aumenta rápidamente. Esto podría representar el inicio del proceso de secado, donde las condiciones iniciales se están ajustando y el sistema comienza a desarrollarse. El pico inicial alrededor de 0.015 Pa podría ser una fluctuación inicial al arrancar la simulación.
2. Ascenso (aproximadamente de 10 a 30 s): Se observa un aumento significativo en la presión, alcanzando un pico alrededor de 0.0225 Pa. Este incremento se debe a la evaporación del agua del aguaymanto, lo que aumenta la cantidad de vapor de agua en la fase gaseosa y, consecuentemente, la presión del sistema.
3. Descenso y Estabilización (aproximadamente de 30 s en adelante): Después de alcanzar su punto máximo, la presión desciende ligeramente y luego se estabiliza en un valor constante de aproximadamente 0.0205 Pa. Esta estabilización indica que la simulación ha alcanzado un **estado estacionario** o un **régimen cuasi-estable** en términos de la presión promedio. En el contexto del secado, esto sugeriría que la tasa de evaporación y las condiciones del flujo de aire han alcanzado un equilibrio dinámico, y el proceso de secado está progresando de manera uniforme con respecto a la presión general del sistema.

En resumen, la gráfica indica que la simulación del secado ha convergido en el tiempo para la variable de presión, mostrando cómo el sistema reacciona a la evaporación inicial y luego se asienta en un estado de funcionamiento estable.

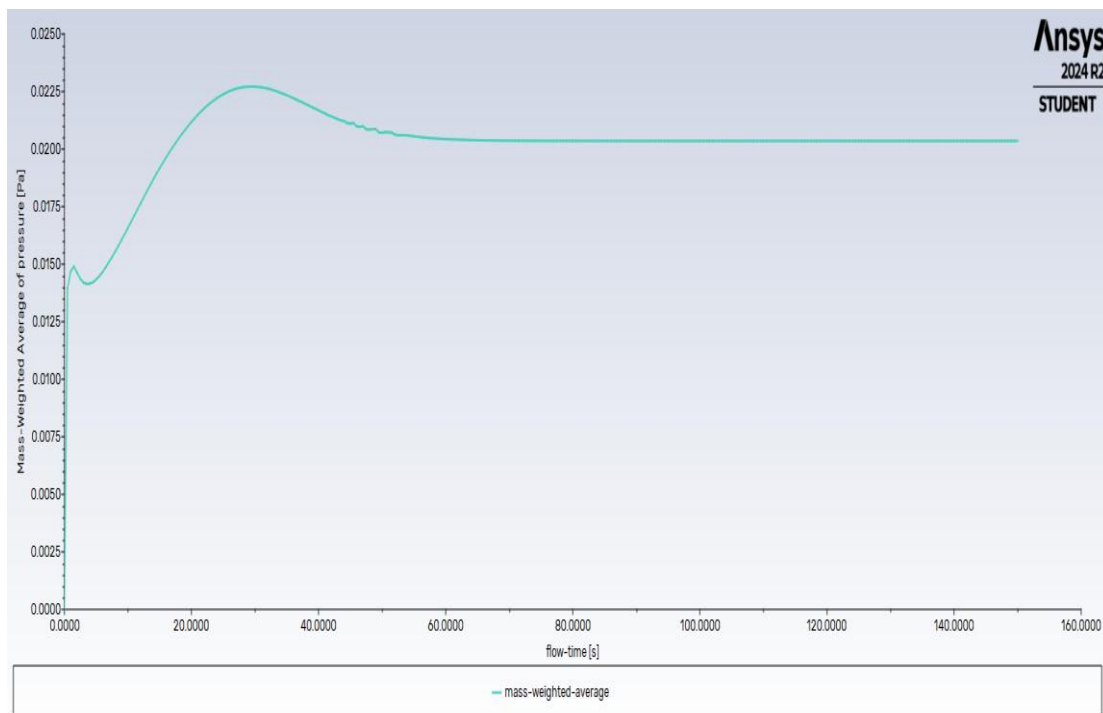


Figura 3.4: Muestra la relación entre el tiempo de flujo en (s), frente al promedio de la presión ponderada para el flujo masico en (Pa)

Figura 3.5. La gráfica muestra la evolución temporal del promedio ponderado por área de la temperatura (Area-Weighted Average of temperature) en dos regiones diferentes durante la simulación del secado de aguaymanto en Ansys Fluent.

- Eje X (flow-time [s]): Representa el tiempo de la simulación en segundos.
- Eje Y (Area-Weighted Average of temperature [C]): Muestra el valor promedio de la temperatura, ponderado por el área, en grados Celsius.

La gráfica muestra una **convergencia exitosa de la temperatura** en las superficies clave de la simulación de secado. Las temperaturas aumentan hasta alcanzar un valor constante, lo que es un indicio de que el proceso térmico ha llegado a un estado estable. La estrecha relación entre ambas curvas sugiere que las interfaces o regiones de contacto están transfiriendo calor eficientemente y alcanzan el equilibrio térmico casi simultáneamente.

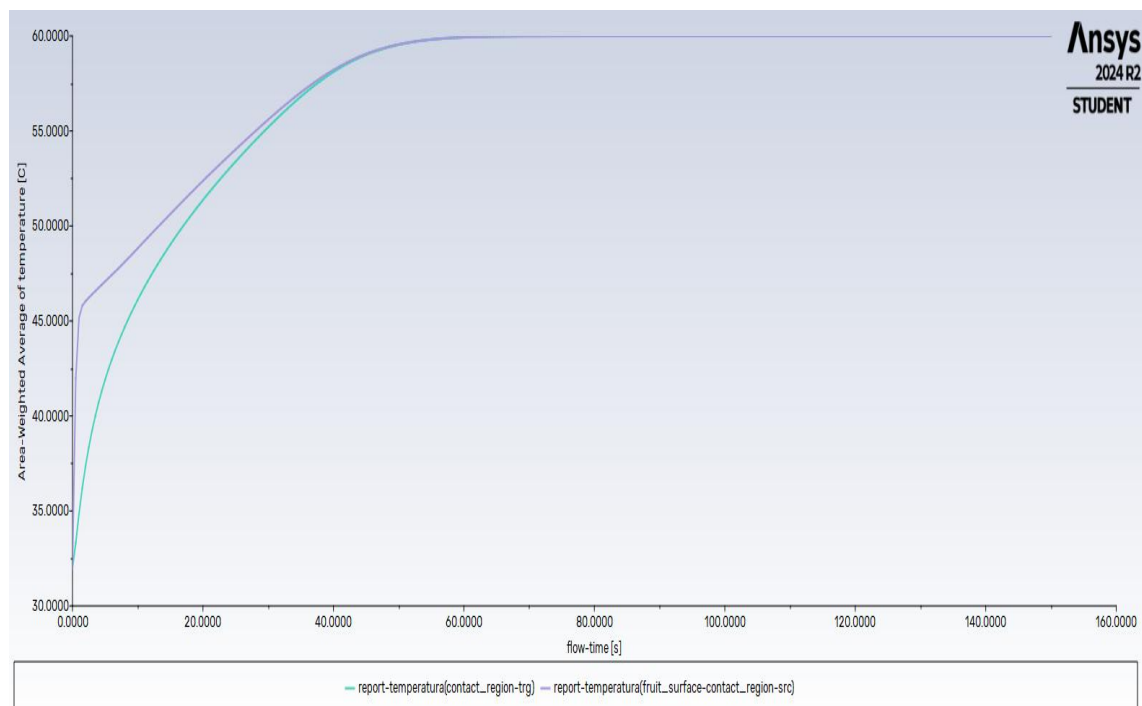


Figura 3.5. Tiempo de flujo en (s) frente valor promedio de la temperatura, ponderado por el área en ($^{\circ}$ C)

Figura 3.6. La imagen muestra la evolución del porcentaje de agua (H₂O) en el aguaymanto a lo largo del tiempo (flow-time en segundos), simulada con Ansys 2024 R1 Student. Se observan dos curvas:

1. report-humedad(contact_region-trg) (verde): Representa la humedad en una región de contacto "target". Inicia alrededor del 150% y disminuye rápidamente.

2. report-humedad(fruit_surface-contact_region-src) (morado/azul): Representa la humedad en la superficie del fruto (aguaymanto) una región de contacto "source". Inicia cerca del 105% y también disminuye.

El gráfico ilustra un proceso de deshidratación típico, caracterizado por una **rápida pérdida de agua inicial que se desacelera con el tiempo hasta alcanzar un nivel de humedad residual estable**. La diferencia inicial entre las curvas podría indicar variaciones en la humedad o en la cinética de deshidratación entre diferentes regiones del aguaymanto o en la interacción de contacto simulada.

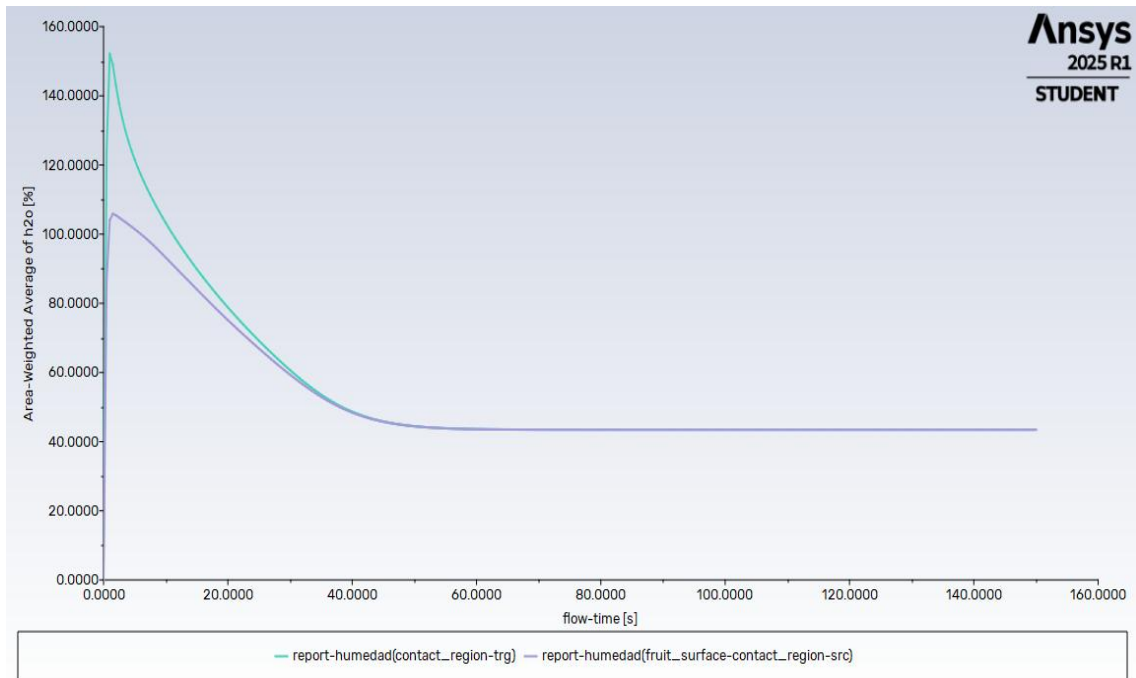


Figura 3.6. Tiempo de flujo en (s) frente valor promedio de la fracción másica del agua, ponderado por el área

Figura 3.7. La imagen muestra un gráfico de contorno de la temperatura estática (Static Temperature) en la simulación de Ansys Fluent, específicamente para el proceso de secado del aguaymanto.

La esfera del aguaymanto aparece completamente de color **rojo intenso**, lo que, de acuerdo con la leyenda, indica que su temperatura está en el rango más alto de la escala, es decir, **entre 53.1°C y 60.1°C**.

El gráfico de contorno de temperatura muestra que el aguaymanto ha sido calentado de manera uniforme y efectiva a una temperatura alta (aproximadamente 53-60°C), lo que es deseable para el proceso de secado y coherente con las tendencias de convergencia de temperatura observadas previamente.

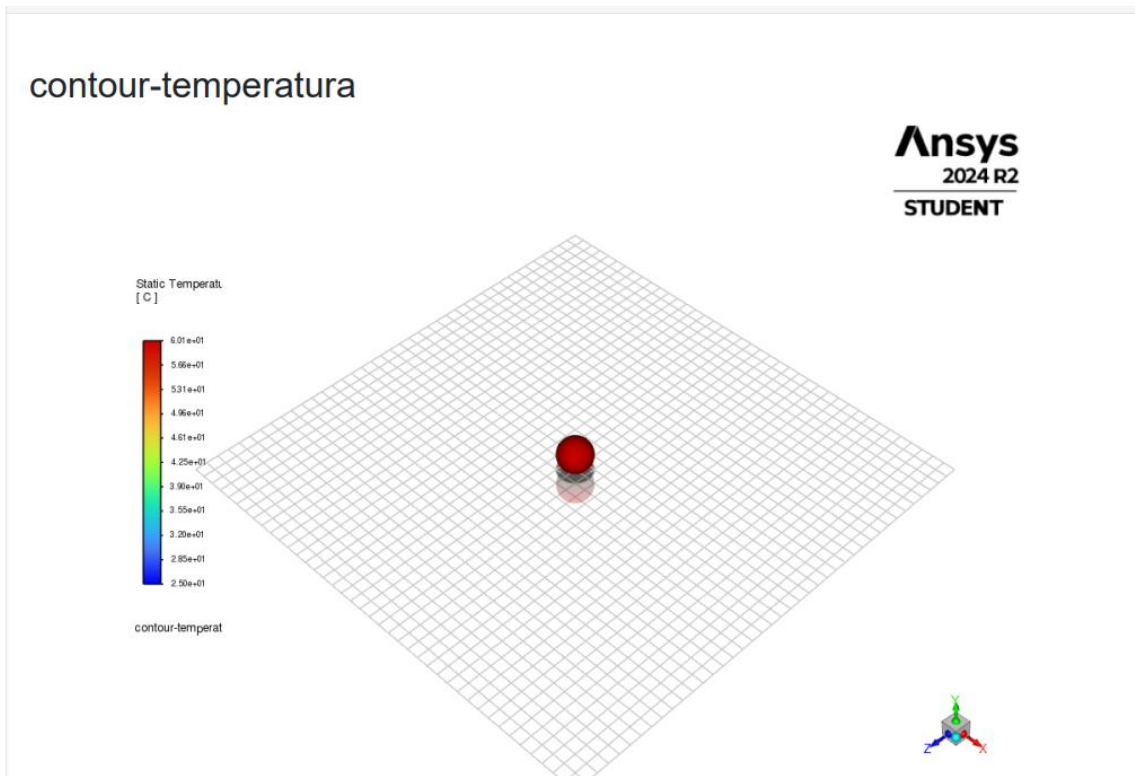


Figura 3.7. Muestra un gráfico de contorno de temperatura en la simulación del secado del aguaymanto

Figura 3.8. La imagen muestra un gráfico de contorno de la fracción másica de H₂O (Mass fraction of H₂O) en la simulación de Ansys Fluent, en el proceso de secado del aguaymanto. Este gráfico de contorno, combinado con la gráfica temporal de humedad que se observa en la figura 3.6, donde la humedad desciende y luego se estabilizaba en 40 %, refuerza la interpretación dada.

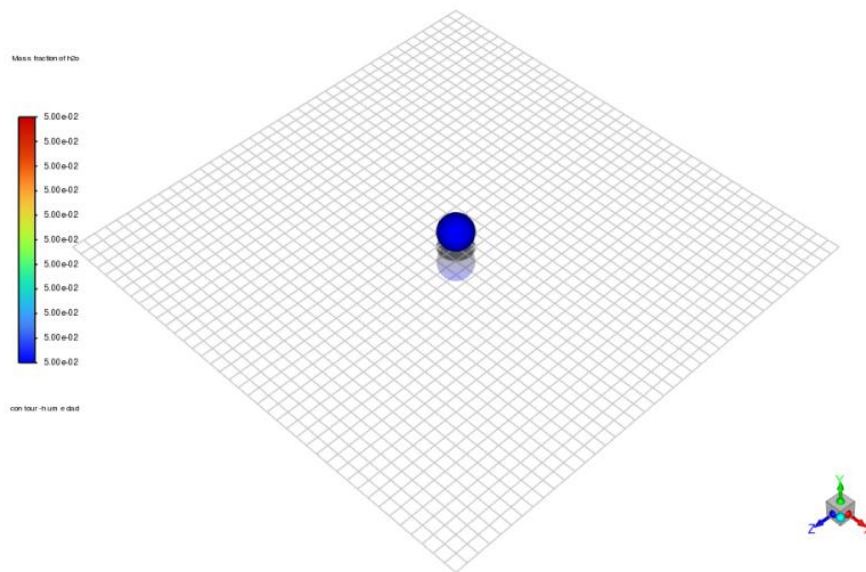


Figura 3.8. Gráfico del contorno de la fracción másica de agua en la simulación del secado del aguaymanto

Figura 3.9. La imagen muestra un Histograma de Calidad Ortogonal (Orthogonal Quality) de la malla utilizada en tu simulación de Ansys Fluent, en un tiempo específico (Time=1.500e+02 s, es decir, 150 segundos).

Observando las barras del histograma:

Eje X (Orthogonal Quality): Representa el valor de la calidad ortogonal de los elementos de la malla. Los valores varían de 0 a 1.

Eje Y (Porcentaje o Recuento de Celdas): Indica el porcentaje o la proporción de celdas de la malla que caen dentro de un rango específico de calidad ortogonal. Aunque el eje Y no está etiquetado con unidades, por la forma de un histograma, representa la frecuencia o densidad de celdas.

1. **Distribución Centralizada en Valores Altos:** La gran mayoría de las celdas de tu malla tienen una calidad ortogonal relativamente alta.
 - Hay una pequeña fracción de celdas con baja calidad (entre 0.2 y 0.5), que son casi insignificantes.
 - La mayoría de las celdas se encuentran en el rango de **0.70 a 0.90**, con el pico más alto (la barra más alta, cerca de 30 en el eje Y) cayendo en el rango de **0.80 a 0.85 (aproximadamente)**.
 - También hay una proporción significativa de celdas con una calidad ortogonal superior a 0.90, extendiéndose hasta 1.0.

Este histograma de calidad ortogonal es muy favorable. Demuestra que la malla tiene una **alta calidad**, lo que es un pilar fundamental para obtener resultados precisos y una convergencia robusta en la simulación de secado de aguaymanto en Ansys Fluent.

Orthogonal Quality

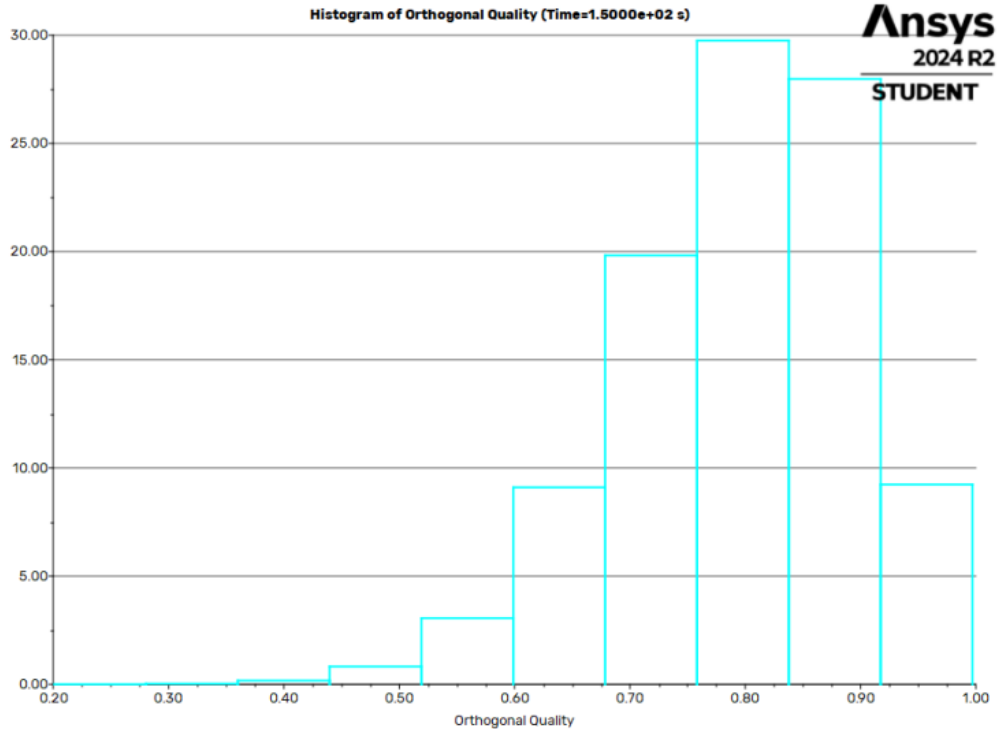


Figura 3.9. La imagen muestra un **Histograma de Calidad Ortogonal (Orthogonal Quality)** de la malla utilizada en tu simulación del secado del aguaymanto Ansys Fluent

IV. CONCLUSIONES

Del trabajo de simulación de la transferencia de calor y masa utilizando CFD en el proceso de secado del aguaymanto realizado, se deducen las siguientes conclusiones

- Se verifican que la predicción del gradiente de la humedad disminuye rápidamente frente al tiempo, lo que se comprueba y valida con datos experimentales reportados en la literatura **Lopez et al, [16]**
- El gradiente de la temperatura muestra que el aguaymanto ha sido calentado de manera uniforme y efectiva a una temperatura alta, coinciden con los datos experimentales **Petru et al, [2]**.

c). Por tanto, los perfiles de temperatura y humedad no difieren significativamente en la sección total del cuerpo del aguaymanto.

Los resultados predichos coincidieron con los resultados experimentales por la simulación de CFD del proceso de secado, encontrados en la literatura.

V RECOMENDACIONES

Se requieren nuevas estrategias de investigación para mejorar la precisión del modelo de transferencia de calor y masa.

La ausencia de datos precisos de las propiedades termo físicas del aguaymanto, como es la conductividad térmica, representa una brecha y un desafío significativo para las simulaciones más óptimas, es necesario contar con esos datos.

La integración y vinculación de los UDF, en la simulación CFD representa un desafío computacional, dada la complejidad de los modelos empleados para la transferencia de calor y masa en el secado de frutas, es necesario conocer diversos códigos de lenguaje de programación para su implementación eficiente.

VII REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Tarek,J. Jamalddine y Mathumita, B.Ray “Application of computational fluid dynamics for simulation of drying process. A review”, *Drying Technology.*, vol. 28, pp.120-154, 2010.
- [2] Petru- Marian Carlescu, Vlad Arsenoia, Radu. Rosca, Ioan Tenu, “CFD simulation of heat and mass transfer during appricots Drying”, *LWT- Food Science and Technology*, 2017.
- [3] Haileeyescu Habtegebriel, Dintwa Edward, Oboetswe Motsamai, Michael Wawire, Eyassu Seifu, and Sila Daniel, “The potencial of computational Fluid Dynamics simulation to investigate the rektion between quality parameters oulet temperatura during sparay drying of camel milk”, *Drying Technology*, 2019.
- [4] Jean Francois Le Page, Cyril Chevarin, Alain Kondjoyan, Jean-Domenique Dautin, Pierre-Sylayrin Mirade, “Develoment of an approximate empirical-CFD model estimating coupled heat and wáter transfer of stacked food products placed in airflow”, *ajournal Food Engineering.*, vol. 92, pp. 208-216, 2009.
- [5] Ramadan Elgamal, Frederick Rouse, Sherif Radwan, Jan G. Pieters, “Coupling CFD and diffusion models for analyzing the convective drying behavior of a single rice kernel, *Drying Technology.*, vol.32, pp.311-320, 2014.
- [6] Thijs Defraeye, Pieter Verboven, Bart Nicolai, “CFD modellig of flow and scalar Exchange of spherical food products turbulence and boundary-layer modelling”, *Journal Food Engineering.*, vol. 114, pp. 495-504, 2013.
- [7] Zhua Hu, Da- Wen Sun, “CFD simulation of heat and moisture transfer for predicticting cooling rate and weight loss of cooked ham during air- blast chilling process”, *Jounal Food Engineering.*, vol.46, pp.118-197, 2000.
- [8] E. Mathioulakis, V.T. Karatnos and V.G. Belessiotic, “Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: applications for the drying of fruits”, *Jounal Food Engineering.*, vol.36, pp.183-200, 1998.
- [9] Fluent Inc. *Fluent 6.3 Users Guide* (2006).
- [10] Casp, A.;Abril.J, *Procesos de conservación de alimentos*, 2ª. Ed: Limusa, Mexico, 1988.

- [11] Mondaca, Lemus. Betoret, N, Vega-Galvez, Lara Aravena,E. “Dehidration Characteristics of papaya: Determination of equilibrium moisture content and diffusion coefficient”, Journal Food Process Engineering., vol. 32, pp. 645-663, 2009.
- [12] Kaymat, Ertekin, F. and Gredik, A. “Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes”, Lebensm-Wiss.u.-Technol., vol.37, pp,429-438, 2004.
- [13] Srikiatden, J. Roberts,J. “Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air dr using isothermally measured effective diffusivity”, Journal Food Engineering., vol.84,(4), pp.516-525, 2008.
- [14] S.N.Burgos Robles y M.C. Rivera Shuan, “Propiedades reologicas y termofisicas de la pulpa de Sanky (*Corryocactus brevestylus*) y Aguaymanto (*Physalis Peruviana l*)” Trabajo de fin de grado, Universidad Peruana Unión, 2018.
- [15] Velescu, I.”Cercetari privind optimizarea procesului de lucru pentru uscarea legumelor si fructelor”, Doctoral Thesis, USAMV Iasi, 2014.
- [16] Jéssica López¹ , Antonio Vega-Gálvez¹ , María José Torres¹ , Roberto Lemus-Mondaca¹ ,
 ,
 Issis Quispe-Fuentes¹ , and Karina Di Scala² “Effect of dehydration temperature on physico-chemical properties and antioxidant capacity of goldenberry (*Physalis peruviana* L.)”, Research ChileanJar.

Referencias Electrónicas:

<https://fdc.nal.usda.gov/food-details/173043/nutrients>

VII. ANEXOS

ANEXO 7.1 REPORTER DE SIMUALCION EN ANSYS FLUENT



Ansys Fluent Simulation Report

Analyst	jean
Date	6/26/2025 10:40 PM

Table of Contents

- [1 System Information](#)
- [2 Geometry and Mesh](#)
 - [2.1 Mesh Size](#)
 - [2.2 Mesh Quality](#)
 - [2.3 Orthogonal Quality](#)
- [3 Simulation Setup](#)
 - [3.1 Physics](#)
 - [3.1.1 Models](#)
 - [3.1.2 Material Properties](#)
 - [3.1.3 Cell Zone Conditions](#)
 - [3.1.4 Boundary Conditions](#)
 - [3.1.5 Reference Values](#)
 - [3.2 Solver Settings](#)
- [4 Run Information](#)
- [5 Solution Status](#)
- [6 Report Definitions](#)
- [7 Plots](#)
- [8 Contours](#)
- [9 XY Plots](#)

System Information

Application	Fluent
Settings	3d, double precision, pressure-based, species, realizable k-epsilon, transient
Version	24.2.0-10192
Source Revision	149ed7492d
Build Time	May 13 2024 11:22:47 EST
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8750H
OS	Windows

Geometry and Mesh

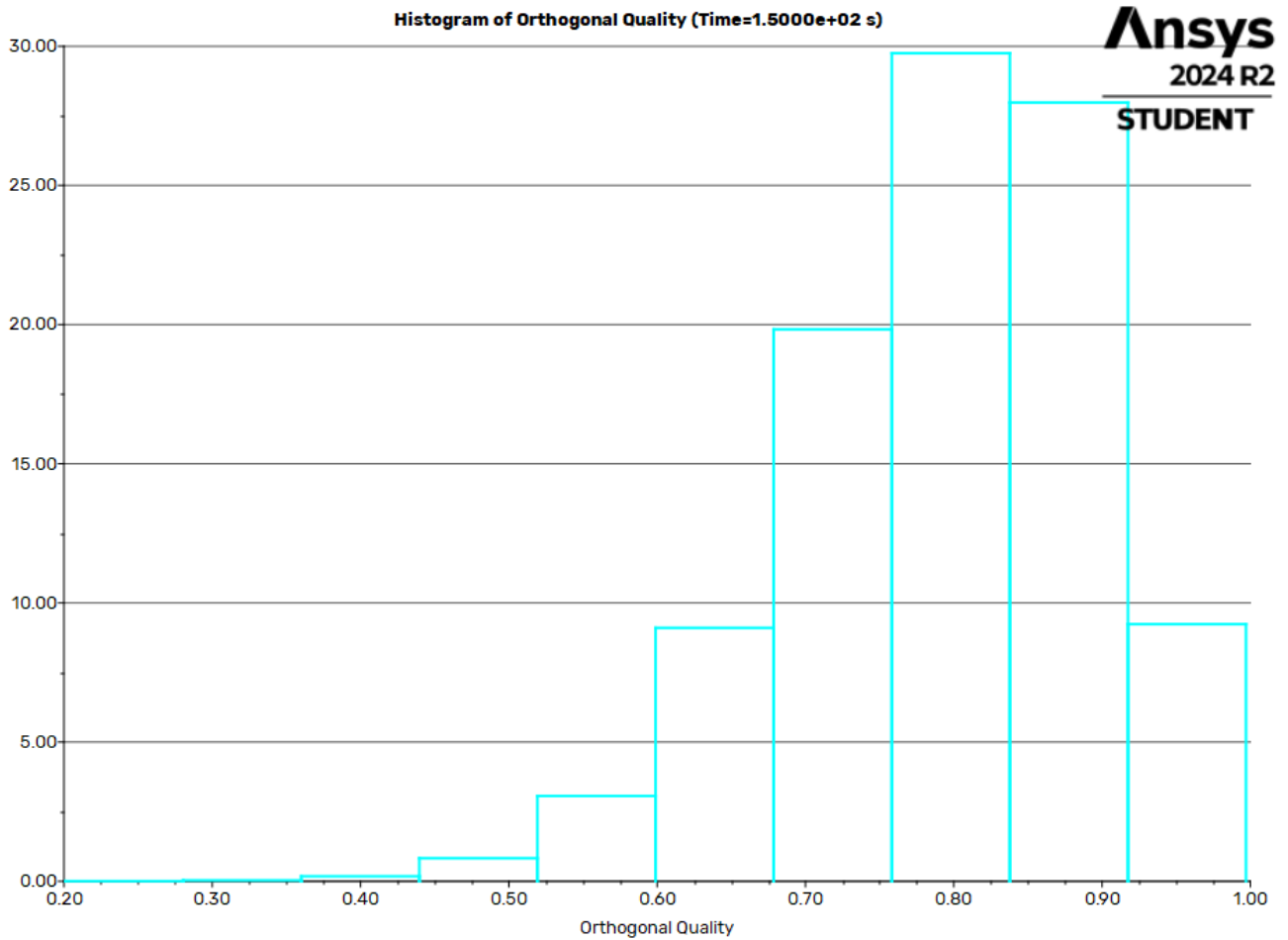
Mesh Size

Cells	Faces	Nodes
789363	1614989	145411

Mesh Quality

Name	Type	Min Orthogonal Quality	Max Aspect Ratio
cube_box	Mixed Cell	0.20078442	18.485502
fruit_volume	Tet Cell	0.36795015	8.1409033

Orthogonal Quality



Simulation Setup

Physics

Models

Model	Settings
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	Realizable k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Enabled
Species	Non-Reacting

Material Properties

— Fluid	
— nitrogen	
Density	1.138 kg/m ³
Cp (Specific Heat)	piecewise polynomial
Thermal Conductivity	0.0242 W/(m K)
Viscosity	1.663e-05 kg/(m s)
Molecular Weight	28.0134 kg/kmol
— air	
Density	1.225 kg/m ³
Cp (Specific Heat)	1006.43 J/(kg K)
Thermal Conductivity	0.0242 W/(m K)
Viscosity	1.7894e-05 kg/(m s)
Molecular Weight	28.966 kg/kmol
— Solid	
— fruit_solid	
Density	1000 kg/m ³
Cp (Specific Heat)	3000 J/(kg K)

Thermal Conductivity	0.5 W/(m K)
— aluminum	
Density	2719 kg/m ³
Cp (Specific Heat)	871 J/(kg K)
Thermal Conductivity	202.4 W/(m K)
— Mixture	
— air_vapor_mixture	
Mixture Species	names
Density	incompressible ideal gas
Cp (Specific Heat)	mixing law
Thermal Conductivity	0.0454 W/(m K)
Viscosity	1.72e-05 kg/(m s)
Mass Diffusivity	(2.88e-05) m ² /s
— mixture-template	
Mixture Species	names
Density	incompressible ideal gas
Cp (Specific Heat)	mixing law
Thermal Conductivity	0.0454 W/(m K)
Viscosity	1.72e-05 kg/(m s)
Mass Diffusivity	(2.88e-05) m ² /s

Cell Zone Conditions

— Fluid	
— cube_box	
Material Name	air_vapor_mixture
Specify source terms?	no
Specify fixed values?	no
Frame Motion?	no
Mesh Motion?	no
LES zone?	no
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
3D Fan Zone?	no
— fruit_volume	
Material Name	air_vapor_mixture

Specify source terms?	no
Specify fixed values?	no
Frame Motion?	no
Mesh Motion?	no
LES zone?	no

Laminar zone?	no
Porous zone?	yes
Direction Specification	Cartesian
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Z-Component of Direction-1 Vector	0
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance [m ⁻²]	10000
Direction-2 Viscous Resistance [m ⁻²]	10000
Direction-3 Viscous Resistance [m ⁻²]	10000
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance [m ⁻¹]	0.1
Direction-2 Inertial Resistance [m ⁻¹]	0.1
Direction-3 Inertial Resistance [m ⁻¹]	0.1
C0 C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	0.4
Relative Viscosity	1
Equilibrium Thermal Model (if no, Non-Equilibrium)?	yes
Solid Material Name	fruit_solid
3D Fan Zone?	no
Anisotropic Species Diffusion?	no

Boundary Conditions

— Inlet	
— inlet	
Velocity Specification Method	Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame	Absolute
Velocity Magnitude [m/s]	1
Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]	0
Temperature [C]	60
Turbulence Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent Intensity [%]	5
Turbulent Viscosity Ratio	10
Specify Species in Mole Fractions?	no

— Outlet	
— outlet	
Backflow Reference Frame	Absolute
Gauge Pressure [Pa]	0
Pressure Profile Multiplier	1
Backflow Total Temperature [C]	25
Backflow Direction Specification Method	Normal to Boundary
Turbulence Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Backflow Turbulent Intensity [%]	5
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10
Specify Species in Mole Fractions?	no
— Backflow	
constant	0.01
constant	0.99
Backflow Pressure Specification	Total Pressure
Build artificial walls to prevent reverse flow?	no
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Average Pressure Specification?	no
Specify targeted mass flow rate	no
— Wall	
— wall-13	
Wall Thickness [mm]	0
Heat Generation Rate [W/m^3]	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	Heat Flux
Heat Flux [W/m^2]	0
Wall Motion	Stationary Wall
Shear Boundary Condition	No Slip

Wall Roughness Height [mm]	0
Wall Roughness Constant	0.5
Species Boundary Conditions	Specified Flux (Mass)/Specified Flux (Mass)
Convective Augmentation Factor	1
— wall-12	
Wall Thickness [mm]	0
Heat Generation Rate [W/m ³]	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	Heat Flux
Heat Flux [W/m ²]	0
Wall Motion	Stationary Wall
Shear Boundary Condition	No Slip
Wall Roughness Height [mm]	0
Wall Roughness Constant	0.5
Species Boundary Conditions	Specified Flux (Mass)/Specified Flux (Mass)
Convective Augmentation Factor	1
— wall	
Wall Thickness [mm]	0
Heat Generation Rate [W/m ³]	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	Temperature
Temperature [C]	25
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	Stationary Wall
Shear Boundary Condition	No Slip
Wall Roughness Height [mm]	0
Wall Roughness Constant	0.5
Species Boundary Conditions	Specified Flux (Mass)/Specified Flux (Mass)
Convective Augmentation Factor	1

Reference Values

Area	1 m ²
Density	1.225 kg/m ³
Enthalpy	0 J/kg
Length	1 mm

Pressure	0 Pa
Temperature	288.16 C
Velocity	1 m/s
Viscosity	1.7894e-05 kg/(m s)
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300
Reference Zone	cube_box

Solver Settings

— Equations	
Flow	True
— Turbulence	
Turbulence	True
h2o	True
o2	True
Energy	True
— Numerics	
Absolute Velocity Formulation	True
— Unsteady Calculation Parameters	
Number of Time Steps	300
Time Step Size [s]	0.5
Max Iterations/Time Step	20
— Under-Relaxation Factors	
Density	1
Body Forces	1
Turbulent Kinetic Energy	0.8
Turbulent Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1
h2o	1
o2	1
Energy	1
Explicit Momentum	0.75
Explicit Pressure	0.75
— Pressure-Velocity Coupling	
Type	Coupled

Flow Courant Number	200
— Discretization Scheme	
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Run Information	First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
h2o	Second Order Upwind
o2	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind
— Solution Limits	
Minimum Absolute Pressure [Pa]	1
Maximum Absolute Pressure [Pa]	5e+10
Minimum Static Temperature [C]	-272.15
Maximum Static Temperature [C]	4726.85
Minimum Turb. Kinetic Energy [m ² /s ²]	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate [m ² /s ³]	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Solution Status

Flow Time: 150

Time Step: 300

Number of Machines	1
Number of Cores	4
Case Read	12.463 seconds
Data Read	2.96 seconds
Iteration	2738.63 seconds
AMG	1667.26 seconds
Virtual Current Memory	3.88504 GB
Virtual Peak Memory	4.03909 GB
Memory Per M Cell	4.12628

	Value	Absolute Criteria	Convergence Status
continuity	0.0007581284	0.001	Converged
x-velocity	7.825364e-08	0.001	Converged
y-velocity	6.124768e-08	0.001	Converged
z-velocity	4.649598e-08	0.001	Converged
energy	5.414252e-07	1e-06	Converged
k	2.300958e-06	0.001	Converged
epsilon	7.31516e-06	0.001	Converged
h2o	1.660031e-15	0.001	Converged
o2	2.324142e-16	0.001	Converged

— report-humedad	0.05	
contact_region-trg	0.05	
fruit_surface-contact_region-src	0.05	
— report-temperatura	60	C
contact_region-trg	60	C
fruit_surface-contact_region-src	60	C
mass-weighted-average	0.02035373	Pa
delta-time	0.5	s
iters-per-timestep	1	
flow-time	150	s

ANEXO 7.2: UDF CODIFICADO EN LENGUAJE C++

```

udf_secado_aguyamanto.cpp
1  #include "udf.h"
2
3  // --- Constantes ---
4  #define R 8.314           // Constante de gases [J/mol.K]
5  #define EA 40000.0       // Energía de activación [J/mol]
6  #define K0 1.0e-3        // Coeficiente de secado [1/s]
7  #define HFG 2.3e6        // Calor latente de evaporación del agua [J/kg]
8  #define X_EQ 0.05        // Humedad de equilibrio [kg agua/kg seco]
9
10 // --- Contenido de humedad del sólido ---
11 // Puedes reemplazar esta función por una variable dependiente si se simula X como especie
12 float get_local_moisture(cell_t c, Thread *t)
13 {
14     // Por simplicidad usamos un valor constante o lo puedes leer de un campo escalar
15     return 0.50; // 50% de humedad (valor típico al inicio del secado)
16 }
17
18 // --- Fuente de masa por evaporación ---
19 DEFINE_SOURCE(mass_evap_source, c, t, dS, eqn)
20 {
21     real T = C_T(c,t); // Temperatura en Kelvin
22     real X = get_local_moisture(c, t);
23     real evap_rate;
24
25     // Evaporación según Arrhenius con gradiente de humedad
26     evap_rate = -K0 * (X - X_EQ) * exp(-EA / (R * T));
27
28     dS[eqn] = 0.0; // derivada de la fuente (simplificado)
29
30     return evap_rate; // Fuente negativa -> pérdida de agua
31 }
32
33 // --- Fuente de energía por evaporación ---
34 DEFINE_SOURCE(energy_evap_source, c, t, dS, eqn)
35 {
36     real T = C_T(c,t);
37     real X = get_local_moisture(c, t);
38     real evap_rate;
39
40     // Reutilizamos la misma formulación de evaporación
41     evap_rate = -K0 * (X - X_EQ) * exp(-EA / (R * T));
42
43     dS[eqn] = 0.0;
44
45     // Fuente de energía es m_dot * h_fg (negativa)
46     return evap_rate * HFG;
47 }
48

```

ANEXO 7.3: RESUMEN DE LOS DATOS DE INGRESO EN LA SIMULACION DEL SECADO DEL AGUAYMANTO EN ANSYS FLUENT

La simulación en Ansys Fluent ,se desarrolla en cinco fases principales: geometría, mallado, configuración, solución y postprocesamiento. Cada fase es esencial para obtener resultados precisos y útiles en un análisis CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). Como es en la simulación del secado convectivo del aguaymanto (*Phisalis-peruviana*).

1. Geometría

Objetivo: Definir el dominio del fluido que se va a analizar.

Descripción: Se ha creado la geometría esférica del fruto del aguaymanto cuyas dimensiones son: diámetro son 3 cm (0.03 m) y su altura 1.5 cm (0.015 m) y cuyas dimensiones del secador es decir su volumen o espacio que ocupa es de 0.35 cm x 0.35 cm x 0.35 cm. Como se puede observar en la figura 2.1

Herramientas, ANSYS o SpaceClaim.

2. Mallado (Meshing)

Objetivo: Dividir la geometría en pequeñas celdas para aplicar las ecuaciones de transporte de energía y masa.

Descripción: Se genera una malla, estructurada cuyas células son prismas hexaédrica en este caso se han generado 789393, células 1614980 caras y 145411 nodos, como se puede observar en el anexo 1. La calidad del mallado afecta directamente la precisión y estabilidad de la simulación.

Parámetros clave: tamaño de celda, refinamiento local, calidad de elementos.

3. Configuración (Setup)

Objetivo: Definir las condiciones físicas y numéricas del problema.

Modelos:

Espacio en 3D

Tiempo no estacionario y su esquema numérico es se tipo implícito de 1er orden

Viscosidad es un modelo K-epsilon turbulento (modelos de turbulencia en CFD)

Especie no reaccionante

Propiedades de los materiales:

Aire:

Densidad: 1,225 kg/m³

Calor específico:1006.43 J/Kg 0K

Conductividad térmica: 0.0242 W/m 0K

Viscosidad:1.7894 e-05 Kg/(m seg)

Peso molecular: 28,966 Kg/mol

Solidos: Fruta

- Densidad: 1000 Kg/m³

- Calor específico:3000 J/(Kg 0K)

- Conductividad térmica:0.5 W/(m 0K)

Aluminio (material del secador): se encuentran en el anexo 1

Mezcla vapor aire: se encuentran en el anexo 1.

Condiciones de zona célula: se encuentran en el anexo 1.

Condiciones de contorno o frontera: tanto de ingreso y salida: se encuentran en el anexo 1.

4. Solución (Solution)

Objetivo: Resolver las ecuaciones de Navier-Stokes y las ecuaciones de transferencia de calor y masa que han sido acoplados y codificados en lenguaje C++ , configurados en el Ansys Fluent

Descripción: Se ejecuta el cálculo iterativo hasta alcanzar el tiempo de convergencia fue 150 segundos y el tiempo en cada etapa de 300 segundos. Se monitorean variables clave como

velocidad, presión, temperatura o residuales.

Importante: Se verifican la estabilidad y convergencia de la solución.

5. Resultados (Postprocesamiento)

Objetivo: Analizar e interpretar los resultados obtenidos.

Descripción: Se visualizan campos de velocidad, presión, líneas de corriente, perfiles de temperatura, perfiles de humedad, como se puede apreciar en los diferentes gráficos que se encuentran en el presente trabajo de tesis, toda la información concerniente al proceso de simulación en el paquete de Ansys Fluent, se encuentran en el anexo 1.

Herramientas: ANSYS Fluent Post o CFD-Post.