

Estudio del secado solar de alimento Mediante energía solar.

Argueta Reyes, Daniel Esteban (1), Saldaña Arredondo, Diana (2), Tapia Guevara, Melanie Elizabeth (3), Vázquez Calderón, Isaura Guadalupe (4), Alfaro Ayala, Jorge Arturo (5)

- 1 [Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala] | Dirección de correo electrónico: [d.arguetaa@gmail.com]
- 2 [Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [d.saldanaarredondo@ugto.mx]
- 3 [Licenciatura en Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero] | Dirección de correo electrónico: [melanietapi98@gmail.com]
- 4 [Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [ig.vazquezcalderon@ugto.mx]
- 5 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [ja.alfaroayala@ugto.mx]

Resumen

En el presente trabajo, se realizó la simulación con la dinámica de fluidos computacional (CFD) del secado solar indirecto de uvas, mediante el software ANSYS® FLUENT 16.0, utilizando los modelos de energía, radiación, flujo turbulento y especies con la finalidad de reducir el porcentaje de humedad en el alimento en un periodo de 9 horas. Se elaboró la geometría del secador y el alimento. Como inicio de la simulación, se ejecutó una prueba en la que se analizaron los datos para una sola uva, al verificar que estos resultados fueron adecuados, se efectuó una segunda simulación con 81 uvas (197.53 gramos). Los resultados muestran el comportamiento de la temperatura, velocidad, radiación y humedad en el secador y en el alimento. Se obtuvo una reducción de la humedad del 49% y un porcentaje de error máximo de la humedad final obtenida entre los resultados experimentales y la simulación de 8.84%, por lo que se demuestra que la geometría del secador solar indirecto es idónea para el secado eficiente de las uvas.

Abstract

In the present work, a simulation was performed with the computational fluid dynamics (CFD) of the indirect solar drying of grapes, using the ANSYS® FLUENT 16.0 software, using the models of energy, radiation, turbulent flow and species in order to reduce the percentage of moisture in the food in a period of 9 hours. The geometry of the dryer and the food was elaborated. At the beginning of the simulation, the data for a single grape was analyzed, when these results were validated it was concluded that these results were adequate for a second simulation, it was carried out with 81 grapes (197.53 g). The results show the behavior of temperature, velocity, radiation and humidity in the dryer and in the food. A humidity reduction of 49% was reached and a percentage of maximum humidity error was obtained between the experimental results and the simulation of 8.84%, thus demonstrating that the geometry of the indirect solar dryer is suitable for efficient drying of grapes.

Nomenclatura

T	Temperatura, K.
P	Presión, kPa.
v	Velocidad, m s ⁻¹ .
t	Tiempo, s.
A	Área, m ² .
Q	Flujo de calor.
E	Energía específica total, m ² s ⁻² .
d	Diámetro, m.
μ	Viscosidad, kg m ⁻¹ s ⁻¹ .
μ_t	Viscosidad turbulenta.
d_h	Diámetro hidráulico, m.
\square	Porosidad.
ϕ	Función fase.
λ	Conductividad térmica, W m ⁻¹ K ⁻¹ .
α	Absortividad.
ω	Humedad específica.
Pr	Número de Prandtl en función de k.
w	Contenido de humedad en el aire, kg de agua kg de aire seco ⁻¹ .
ν	Viscosidad en función de épsilon.
P_v	Presión de vapor, kPa.
P_s	Presión de saturación, kPa.
ρ	Densidad, kg m ⁻³ .
K	Conductividad térmica, W m ⁻¹ K ⁻¹ .
C_p	Calor específico, J kg ⁻¹ K ⁻¹ .
G	Gravedad, m s ⁻² .
S	Vector de dirección del sol.
s'	Vector dirección de la dispersión.
K_d	Coefficiente de dispersión.
G	Generación de energía cinética.
n	Índice refractivo.
σ	Constante de Stefan-Boltzmann.
I	Intensidad de radiación.
β	Transmisividad.
D	Coefficiente difusivo, m ² s ⁻¹ .
θ	Ángulo sólido.
Pr_t	Número de Prandtl en función de μ_t .
μ_{exp}	Constantes determinadas experimentalmente.

INTRODUCCIÓN

El secado de alimentos en la actualidad resulta de gran utilidad ya que ha sido una práctica realizada a lo largo de los años y que, debido a la alta demanda de la población por el consumo de dichos alimentos, es necesario su estudio para reducir costos de operación, producción y sobre todo del consumo energético. Existen dos tipos de secadores solares, directos e indirectos. El secador directo consiste en que la radiación solar incide directamente en una cubierta transparente y es absorbida en una superficie interior oscurecida, lo que provoca que al

acumularse energía en su interior la temperatura se incrementa y a su vez el alimento se seque (Janjai, S. & Bala, B. K., 2011). El secador solar indirecto consta de un colector, cámara de secado y una salida de aire. El aire es calentado en el colector y éste se transporta a la cámara de secado donde se encuentra el alimento por lo que la radiación no incide directamente en él (Mustayen, A. G. M. B., et al., 2014).

La importancia del uso de secadores solares es utilizar energías alternas en lugar del uso de combustibles fósiles, que con el paso de los años se han ido agotando y contribuyen a la contaminación y deterioro ambiental.

Recientemente, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se está utilizando en innumerables esfuerzos de diseños de secadores de alimentos, demostrando ser una herramienta prometedora de diseño y modelado como sustituto de los costosos ensayos experimentales (Amanlou & Zomorodian, 2010, Darabi et al., 2015, Norton et al., 2013, Tegenaw et al., 2017). Anteriormente se han realizado estudios del secado solar de alimentos de manera experimental y empleando CFD, los más relacionados a este proyecto de investigación se enlistan a continuación:

1. Investigación experimental de un secador solar por convección natural de tipo indirecto (El-Sebaei et al., 2002). El sistema estudiado es capaz de secar 10 kg de uvas o guisantes tratados químicamente durante 20 h de sol.

2. Simulación del secado solar de uvas utilizando un modelo integrado de transferencia de calor y masa (Ines et al., 2015). Las simulaciones obtenidas con el modelo desarrollado pueden ser valiosas para predecir tiempos de secado precisos y, en consecuencia, para diseñar, controlar y optimizar la producción de alimentos secos.

3. Simulación CFD de transferencia de calor y masa durante el secado de albaricoque (Petru-Marian et al., 2017). La simulación de secado se realizó para el régimen de flujo inestable, para albaricoques no blanqueados y blanqueados, siguiendo el contenido de humedad y la temperatura de la capa límite y la pulpa. El blanqueo de los albaricoques se realizó por inmersión en agua a una temperatura de 363 K, durante 120 s.

4. Análisis teórico y experimental del secado de uvas bajo un secador solar indirecto y en sol abierto (Hajar, E., Mohamed, B., Rachid, T., 2018). Los resultados de secado indicaron que los tiempos requeridos para secar las uvas a partir del contenido de humedad inicial del 79.8% (pb) hasta el contenido de humedad final del 20.2% (pb) fueron 120 h y 201 h en secado indirecto al sol y al sol abierto, respectivamente. Los datos de secado se ajustaron a 10 modelos de secado de capa delgada para describir y comparar las características de secado de las uvas.

5. Diseño, desarrollo y modelado CFD de secadora solar indirecta de alimentos (Petros et al., 2019). Los dos modelos predicen un aumento de 40 ° C en la temperatura de estado estable dentro de la cámara de secado. Antes de alcanzar esta temperatura, hay una desviación de RMS de aproximadamente 8 ° C entre la predicción de temperatura transitoria de los dos modelos.

En el presente proyecto de investigación se realizó un estudio del secado solar indirecto de uvas, considerando la transferencia de calor y masa empleando dinámica de fluidos computacional (CFD).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del proyecto se utilizó una computadora portátil HP Pavilion Gaming Notebook. Procesador Intel® Core™ i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz con 16 GB de memoria (RAM). Fue empleado el programa ANSYS FLUENT®16.0 utilizando la herramienta de Workbench (Fluid Flow Fluent). Se inició con el diseño de la geometría del secador y el alimento en la sección ANSYS Geometry® (Figura 1). Las dimensiones del secador se dividen en sus partes principales: colector de 3x1x0.1 m, largo x ancho x alto respectivamente; cámara de secado de 1x1x1.72 m, largo x ancho x alto respectivamente y chimenea cilíndrica con radio de 0.05 m y altura de 0.5 m. El valor utilizado para el diámetro de la uva fue un promedio de 0.015 m. La cantidad de uvas que se tomaron para el estudio fueron 81 para tener 197.5266 gramos, Figura 2 (las dimensiones del secador solar fueron las mismas que las de Petros et al., 2019).

Posteriormente se utilizó la herramienta ANSYS Meshing® para realizar el mallado en la superficie de la geometría del secador (Figura 3) y de la uva (Figura 4). El refinamiento utilizado para el secador

fue de 1; y para la uva no fue necesario utilizar refinamiento debido a que la malla posee calidad suficiente debido a que se realizó un análisis de independencia de malla. El final consta de 366109 nodos y 2137562 elementos.

Para la simulación del proceso se trabajó con la herramienta ANSYS Fluent® el cual opera mediante la solución iterativa de ecuaciones que se acoplan al fenómeno de estudio y se describen a continuación:

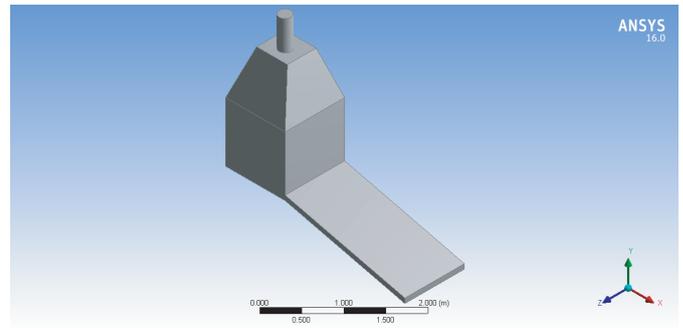


Figura 1. Geometría de Secador.

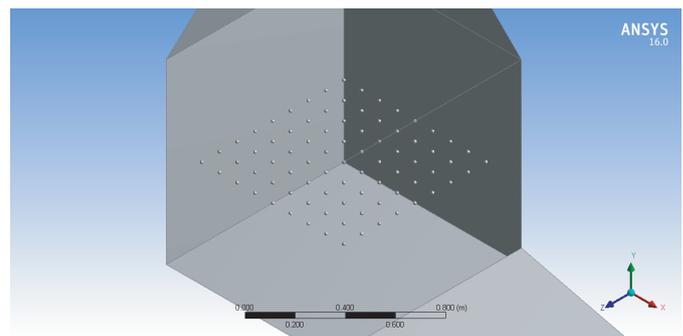


Figura 2. Geometría del secador con uvas.

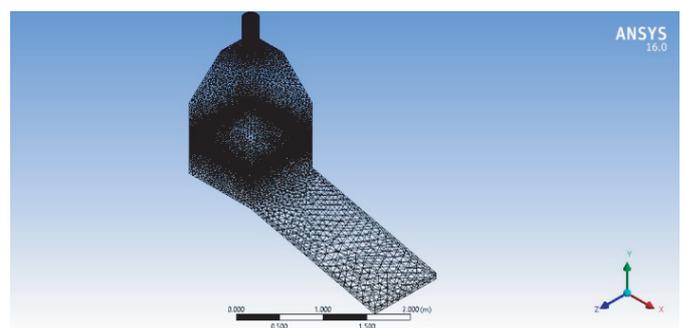
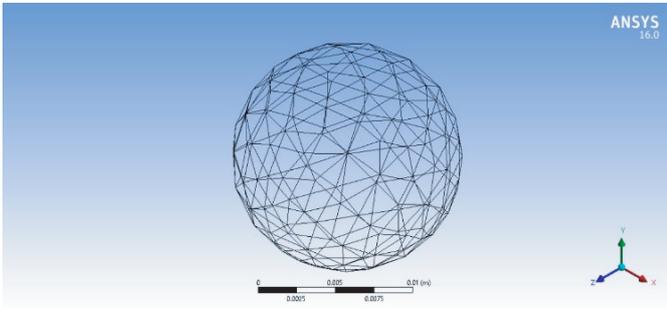


Figura 3. Mallado de secador.



Para la simulación del proceso se trabajó con la herramienta ANSYS Fluent® el cual opera mediante la solución iterativa de ecuaciones que se acoplan al fenómeno de estudio y se describen a continuación:

Ecuación de Continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

Ecuación de cantidad de movimiento.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \rho g \quad \text{Ecuación 2}$$

Modelo de turbulencia k-ε.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla (\rho k v) = \nabla \cdot \left\{ \left(\mu + \frac{\mu^T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right\} + G - \rho \epsilon \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \nabla (\rho \epsilon v) = \nabla \cdot \left\{ \left(\mu + \frac{\mu^T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right\} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \quad \text{Ecuación 4}$$

Ecuación de energía.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [v (\rho E + p)] = \lambda \nabla^2 T \quad \text{Ecuación 5}$$

Ecuación de radiación.

$$\frac{dl(r,s)}{dt} + (a + \sigma_s)l(r,s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{\pi} \int_0^{4\pi} l(r,s) \phi(s,s') d\Omega' \quad \text{Ecuación 6}$$

Ecuación del transporte de especies.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = \nabla (D_{eff} \cdot \nabla Y_i) \quad \text{Ecuación 7}$$

Ecuación de la humedad específico.

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad \text{Ecuación 8}$$

Para calcular P_v de la ecuación 6 se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_v = \%Humedad(P_s) \quad \text{Ecuación 9}$$

Debido a que los valores de temperatura, radiación y humedad varían respecto al tiempo y a la ubicación del estudio, fue necesario determinar el comportamiento de estas variables estableciendo funciones definidas por el usuario (UDF's) en programación C. Se crearon polinomios matemáticos:

UDF de Temperatura

$$T = 1.59512e^{-25}t^6 - 1.508048e^{-20}t^5 + 5.564140e^{-16}t^4 - 1.047520e^{-11}t^3 + 9.726599e^{-8}t^2 + 5.895648e^{-5}t + 290.1433$$

Ecuación 10

UDF de Humedad

$$\omega = -4.152882e^{-24}t^5 + 3.301317e^{-19}t^4 - 9.544887e^{-15}t^3 + 1.099745e^{-10}t^2 - 9.323820e^{-8}t + 0.00601847592$$

Ecuación 11

UDF de Humedad (Uva)

$$\omega = -8.72e^{-28}t^6 + 8.244035e^{-23}t^5 - 2.769847e^{-18}t^4 + 3.966517e^{-14}t^3 - 3.027479e^{-10}t^2 + 2.683268e^{-6}t + 0.0097468706$$

Ecuación 12

Para las Ecuaciones 10 y 11, se recopilieron datos de temperatura y humedad del día 25 de junio del 2019, en un rango de 9:00 a 18:00 horas (9 horas en total). La velocidad promedio del viento del día respectivo fue de 1.11 m/s (The Weather Channel, 2019). La Ecuación 12 se estableció tomando valores experimentales de humedad de la uva en un periodo de 36 horas (El-Sebaili et al., 2002).

Las condiciones de frontera establecidas fueron las siguientes:

Tabla 1. Condiciones de frontera

Partes de la geometría	Condición de frontera	Especificaciones
Colector	Velocity inlet	$Re = 13,161$ (régimen turbulento) $D_h = 0.1818 \text{ m}$ $V = 1.11 \text{ m/s}$
	Wall	<ul style="list-style-type: none"> Wall glass (vidrio) Wall radiation (cobre con recubrimiento de pintura color negro)
Cámara de secado	Wall	Wall (madera)
Chimenea	Pressure outlet	$P_{man} = 0$
	Wall	Wall cylinder (acero)
Uva	Wall	Wall grape: $\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$ $k = 0.3766 \frac{W}{m^\circ C}$ $Cp = 3057 \frac{J}{kg^\circ K}$ Humedad inicial = 79.3%

La siguiente tabla muestra las propiedades de los materiales sólidos utilizados:

Tabla 2. Propiedades de materiales solidos

Materiales	Propiedades
Madera	$\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ $Cp = 2310 \text{ J/kgK}$ $K = 0.173 \text{ W/mK}$
Acero	$\rho = 8030 \text{ kg/m}^3$ $Cp = 502.48 \text{ J/kgK}$ $K = 16.27 \text{ W/mK}$
Cobre	$\rho = 89.78 \text{ kg/m}^3$ $Cp = 381 \text{ J/kgK}$ $K = 387.6 \text{ W/mK}$
Vidrio de borosilicato	$\rho = 2230 \text{ kg/m}^3$ $Cp = 800 \text{ J/kgK}$ $K = 1.2 \text{ W/mK}$
Uva	$\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$ $Cp = 3057 \text{ J/kgK}$ $K = 0.3766 \text{ W/mK}$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó la simulación en un día habitual de verano utilizando el modelo de radiación de ANSYS Fluent® tomando en cuenta un factor solar de 0.6 anual correspondiente al centro de México. Se establecieron 9 pasos de tiempo de 1 hora, debido a que el rango de secado del alimento elegido fue de 9 horas con intervalos de 3600 segundos.

Temperatura de secado de uva en función del tiempo.

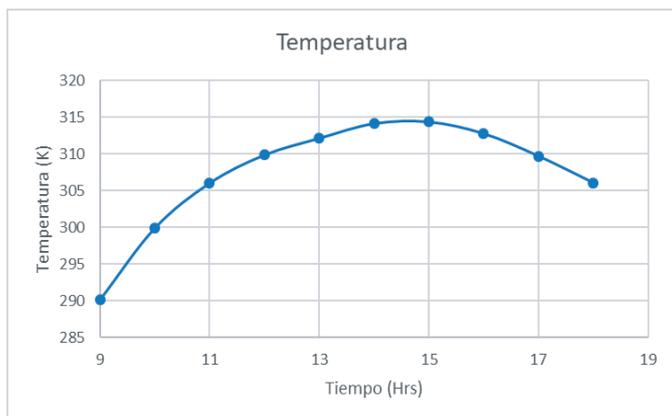


Figura 5. Temperatura de uva.

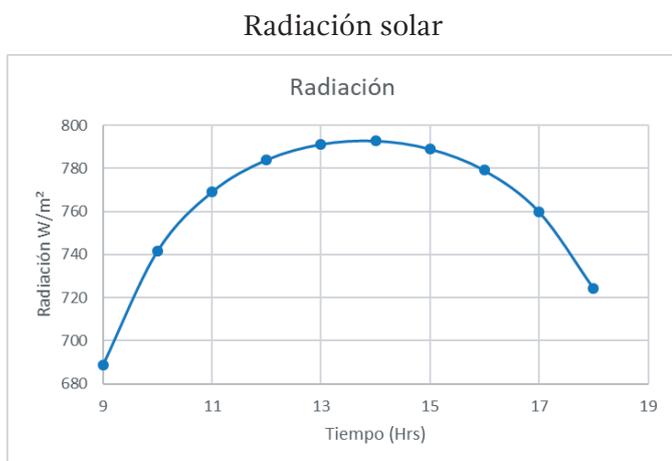


Figura 6. Radiación solar.

Tabla 3. Porcentaje de error entre humedad experimental y ANSYS

Tiempo (Hrs)	Humedad experimental (%)	Humedad Ansys (%)	Error (%)
9	79.3	79.3	0
10	75	76.2526986	1.67026481
11	70	76.1929676	8.84709657
12	66	71.4053792	8.18996854
13	62	65.5446574	5.71718943
14	54	55.4894873	2.75830984
15	44	46.1465649	4.87855668

16	38	38.7601632	2.00042942
17	36	36.402184	1.11717788
18	34	33.7482964	-0.74030469

Humedad relativa de la uva

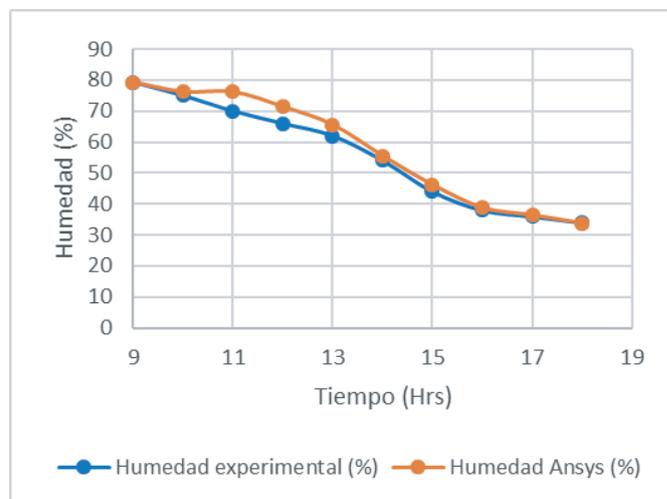


Figura 7. Resultados de humedad experimental (A.A El-Sebaai et al., 2002) y Ansys-Fluent.

Como se observa en la Figura 5, el comportamiento de la temperatura en la uva aumenta gradualmente de 290.15 K (17 °C) en el tiempo inicial hasta llegar a una temperatura máxima de 314.36 K (41.21 °C) en el tiempo de 21600 segundos, es decir, un incremento de 24.21 K; seguido a esto, el comportamiento de la temperatura es descendente ya que la cantidad de radiación solar disminuye. La máxima cantidad de radiación incidente en el secador es de 792.966 W/m² a los 18000 segundos (Figura 6). Existe una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la humedad; conforme la temperatura aumenta, la cantidad de humedad disminuye, debido a que al aumentar la temperatura, el líquido contenido en la uva se evapora y es retirado por la acción del aire (Figuras 5 y 7). El porcentaje de error máximo alcanzado de la humedad fue de 8.84% correspondiente a las 11 horas y el porcentaje mínimo fue de 0.74% a las 18 horas, correspondientes a la comparación entre la humedad experimental y la humedad obtenida en la simulación de ANSYS Fluent® (Tabla 3).

Los siguientes resultados fueron divididos en dos secciones, la primera sección fue obtenida a partir de una primera simulación, donde se utilizó como prueba el secado para una sola uva.

La Figura 8 muestra el perfil de temperatura a través del secador, donde se observa que el colector tiene valores de temperatura más elevados como resultado de la radiación que es transmitida a través del vidrio, y es absorbida por la placa de cobre con recubrimiento que se encuentra en la parte inferior del colector, permitiendo que el fluido que pasa entre ambas placas reciba una transferencia de calor por convección natural, conducción y radiación. Como consecuencia al fenómeno antes mencionado, la uva recibe calor que se ve reflejado en un aumento gradual de temperatura como se observa en la Figura 9.

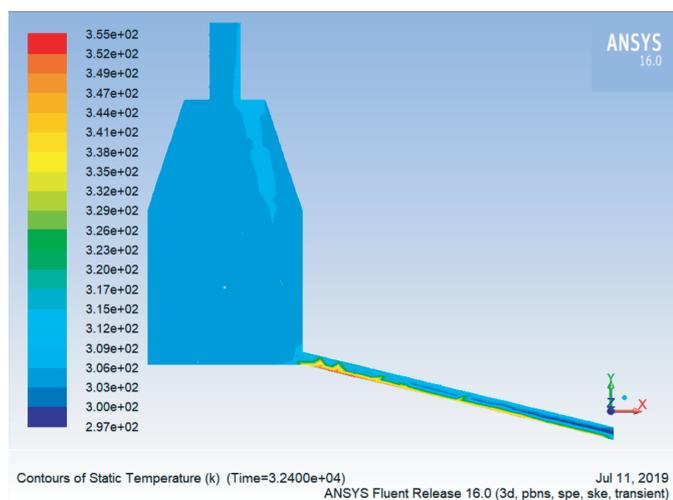


Figura 8. Temperatura de secador.

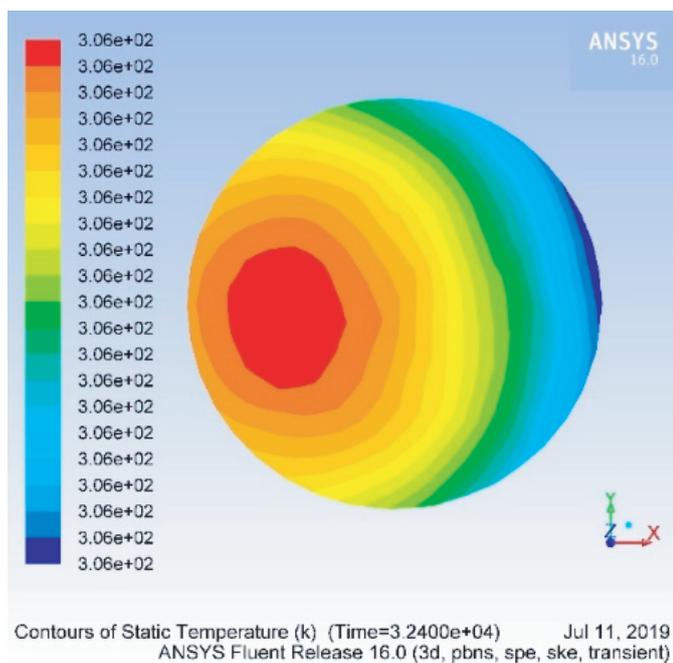


Figura 9 Temperatura de uva.

La Figura 10 muestra el cambio de la humedad en la uva, donde efectivamente se observa la relación inversamente proporcional con la temperatura. Éste fenómeno ocurre porque existe una transferencia de masa por difusión y convección entre el alimento y el fluido (aire). Los valores para la humedad inicial y final de la uva son 79.3% (tabla 1) y 33.7%.

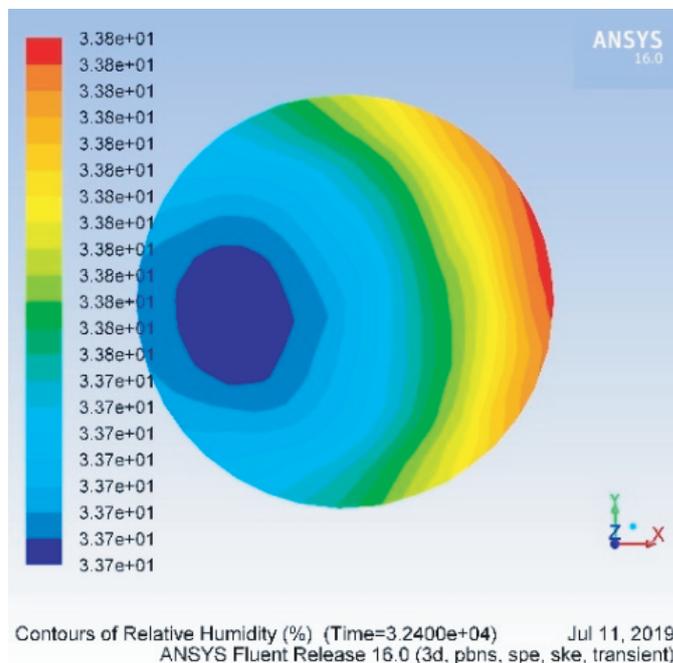


Figura 10. Humedad de uva.

En esta segunda sección se realizó una segunda simulación, donde se realizó un secado para 81 uvas en un plano horizontal XZ, porque un secador habitual no trabaja con un solo alimento, la intención de la segunda simulación fue acercar los resultados a un panorama más realista.

Se puede destacar el comportamiento de la temperatura en el secador, que es igual al de la primera simulación (Figura 11).

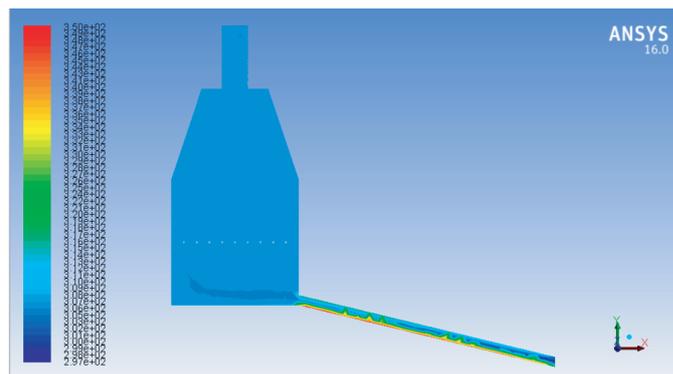


Figura 11. Temperatura de secador.

En la Figura 12 se observa la humedad del ambiente que ingresa al secador, que a lo largo del tiempo disminuye proporcionalmente como consecuencia de la geometría, las condiciones a las que se encuentra y de los fenómenos de transporte involucrados. El valor máximo y mínimo de humedad en el secador es de 50.2% y 26.4% respectivamente. La Figura 13 es un acercamiento de las uvas dentro del secador en donde la humedad alcanzada es de 33.7%.

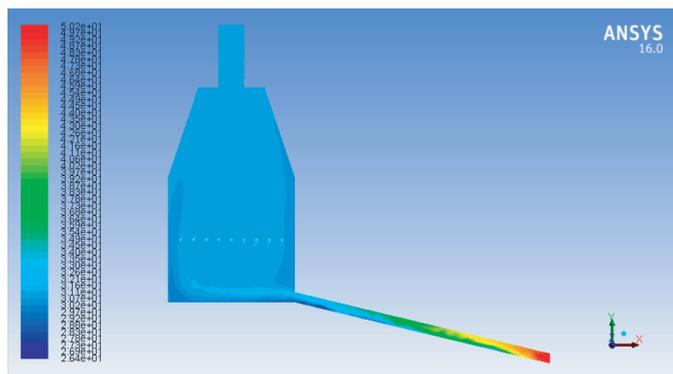


Figura 12. Humedad del secador.



Figura 13. Humedad de uvas en el secador.

CONCLUSIONES

La geometría del secador contribuyó a un eficiente secado del alimento, que se demostró al obtener un valor de humedad un 49% más bajo que el inicial (79.3%).

Los fenómenos de transporte (transferencia de calor por conducción, convección natural, radiación, transferencia de masa por difusión, convección y flujo de fluidos turbulento) se vieron involucrados en todo el proceso de secado.

Los datos obtenidos por medio de la herramienta ANSYS Fluent® son aproximaciones cercanas a la realidad, obteniendo un porcentaje de error máximo en la humedad final con

respecto a los resultados experimentales de 8.84%.

Una de las ventajas de utilizar secadores solares es la disminución de costo de producción, esto promueve el uso de energías renovables; además de obtener un producto con mayor valor agregado para su venta.

REFERENCIAS

A.A El-Sebaili, S Aboul-Enein, M.RI Ramadan, H.G El-Gohary (2002) Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Conversion and Management*, pp. 2251-2266

Amanlou & Zomorodian, 2010, Darabi et al., 2015, Norton et al., 2013, Tegenaw et al., 2017 Barreiro, J., Sandoval, A. (2006). Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Editorial Equinoccio. p. 153.

Çengel, Y.A., Ghajar, A.J., Afshin, J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. p. 875

Hajar, E., Mohamed, B., Rachid, T., M.N, Bargach. (2018). Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 58-64.

Inês N. Ramos, Teresa RS Brandão, Cristina LM Silva (2015) Simulation of solar drying of grapes using an integrated heat and mass transfer model. *Renewable Energy*, pp. 896-902

Janjai, S. & Bala, B. K. (2011) Solar Drying Technology. *Food Eng Rev.*, pp.18-28

Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S. & Saidur, R. (2014) Performance study of different solar dryers. *Renewable and sustainable energy reviews*, pp. 466.

Petros Demissie, Mesele Hayelom, Amanuel Kassaye, Asfafaw Hailesilassie, Mekonnen Gebrehiwot, Maarten Vanierschot (2019) Design, development and CFD modeling of indirect solar food dryer. *Energy Procedia*, pp. 1128-1134

The Weather Channel. (2019). Pronóstico del tiempo y condiciones meteorológicas para Guanajuato, México. 26 de junio de 2019, de TWC Product and Technology Sitio web: <https://weather.com/es-US/tiempo/hoy/1/MXGO0033:1:MX>

Petru-Marian, C., Blad, A., Radu, R., Ioan, T. (2017). CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying. *LWT – Food Science and Technology*, 85, 479-486.

Y.Amanlou, A.Zomorodian (2010) Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. Journal of Food Engineering, pp. 8-15.