

# ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PROCESO DE SECADO DE CHILE POBLANO

Saldaña Sánchez, Miguel Ángel (1), Alfaro Ayala, Jorge Arturo (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [ma.saldanasanchez@ugto.mx]

2 [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 este trabajo de investigación se realizó un estudio numérico utilizando dinámica de fluidos computacional para estudiar la transferencia de calor y masa para el proceso de secado de un chile poblano en un colector solar. El software utilizado para el desarrollo de este trabajo fue ANSYS®. Este estudio incluye modelado y simulación numérica. El modelo incluyó ecuaciones que rigen la transferencia de masa y calor, así como modelos de radiación solar y turbulencia, todos estos modelos se solucionaron para un proceso de secado solar que opera durante 8 horas. El chile poblano contenía inicialmente una humedad de 85% con una temperatura inicial de 16 °C y una fracción masa de 0.0097. Los resultados muestran una transferencia de masa de agua de chile poblano exitosa donde el contenido de humedad relativa de agua final en el chile poblano es del 27%.

## Abstract

In this research work, a numerical study was made using CFD to study the mass and heat transfer for the drying process of poblano pepper in a solar collector. The software used for the development of this work was ANSYS®. The study includes modelling and numerical simulations. The model included the equations that govern the mass and heat transfer, as well as, the models for the solar radiation and turbulence, all these models were solved for a solar dryer process that operates for 8 hours. The poblano peeper initially contained 85% of humidity with an initial temperature of 16 °C and a mass fraction of 0.0097. The results showed a successful mass transfer of water from poblano pepper to the air flow inside the collector, where the final relative humidity contained in the poblano pepper was 27% at the end of the process.

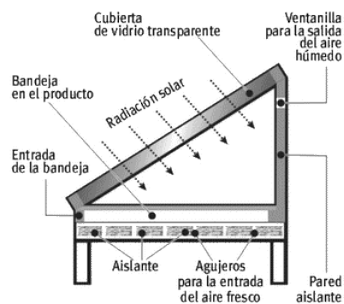
## Palabras Clave

Secado solar; Radiación; Simulación CFD; Geometría; Humedad

## INTRODUCCIÓN

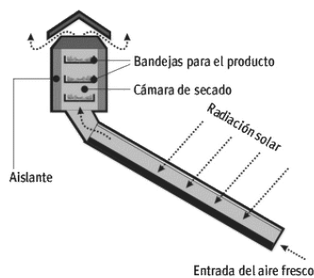
El secado solar, se presentado como una forma alternativa para el secado de alimentos. La aplicación de técnicas de deshidratación por secado solar está actualmente muy difundida, ya que permite conservar alimentos después de cosechas productivas o por los excedentes del consumo fresco de alimentos y plantas útiles que se producen solamente en determinadas estaciones del año. Generalmente, se da el nombre genérico de secado solar a los procedimientos que posibilitan extraer agua contenida en los alimentos auxiliándose de utensilios o equipos como bandejas, gabinetes o túneles de secado solar. Existen dos formas básicas del calentamiento solar del aire, la primera es cuando el calentamiento es indirecto y la segunda es cuando el calentamiento es de forma directa.

Los secadores tipo caja (Imagen 1) son un ejemplo de secador solar directo el cual consiste en una caja cuadrilátera, bandejas de producto y una cubierta transparente en la parte superior. La radiación solar es transmitida a través de la cubierta transparente y absorbida en una superficie interior oscurecida. Por acumulación de energía, la temperatura dentro del secador se incrementa. [1]



**Imagen 1. Secador solar directo de tipo caja.**

Por otro lado, en el secado por calentamiento indirecto (Imagen 2), el colector y la cámara de secado se encuentran separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto debido a que este se ubica en la cámara de secado. [2]



**Imagen 2. Secador solar indirecto.**

A lo largo de los años, han sido realizados estudios de secado de alimentos en distintos tipos de secadores solares de manera experimental, el uso de la dinámica de fluidos computacional ha sido más reciente, algunos estudios realizados se listan en la Tabla 1 a continuación:

**Tabla 1. Investigaciones realizadas en el campo del secado, experimentales y empleando CFD.**

Autor(es)	País	Investigación
D.K. Rabha, Muthukumar P. & Somayaji C.	India	Investigación experimental de la cinética de secado del chile fantasma ( <i>Capsicum Chinense</i> Jacq.) en un secador solar de convección forzada. [3]
Castillo-Téllez M., Pilatowsky-Figueroa I., López-Vidaña E. C., Sarracino-Martínez, O. & Hernández-Galvez G.	México	Deshidratación del chile rojo ( <i>Capsicum annum</i> L., costeño) utilizando un secador solar de convección forzada de tipo indirecto [4]
BOHOJLO-WISNIEWSKA, A.	Polonia	Modelado numérico de un flujo de aire húmedo alrededor de un cuerpo poroso mediante el uso de dinámica de fluidos computacional [5]
Kaekiew J, Nanbean S. & Janjai S.	Tailandia	Investigación experimental de un secador solar a gran escala para el secado de chile en Tailandia [6]
Tunde-Akintunde T. Y.	Nigeria	Modelado matemático del secado solar de chile [7]
Romero V. M, Cerezo, E, García, M. I, & Sánchez, M. H.	México	Simulación y validación del proceso de secado de vainilla en un prototipo de secador solar indirecto utilizando el programa CFD Fluent [8]
Mustafa Aktas, Seyfi Sevik, Ali Amini & Ataollah Khanlari	Turquía	Análisis del secado de melón en un secador infrarrojo solar [9]
Melekjani N & Jafari S. M.	Irán	Simulación de procesos de secado de alimentos por dinámica de fluidos computacional [10]
Mendoza E, Saavedra R, Marcelo D & La Madrid, R.	Perú	Caracterización numérica de colectores solares de un paso y tres pasos para el secado solar de semillas de cocoa [11]

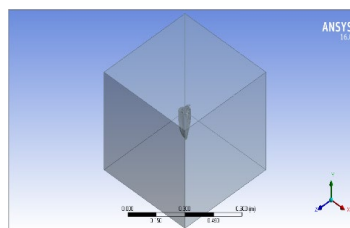
## JUSTIFICACIÓN

El interés en el estudio de secadores solares ha ido en aumento debido a la reducción gradual del precio de los colectores solares, al continuo aumento de las emisiones de contaminantes atmosféricos causadas por la combustión de combustibles fósiles y el costo de estos combustibles. Sin embargo, la aplicación de la tecnología solar difiere de región a región debido a las diferencias en las condiciones climáticas y la disponibilidad de radiación solar. El proceso de secado solar es más rápido, uniforme, higiénico y más eficaz que el secado directo al sol, y los productos secos tienen un color y textura mucho mejores. Además, este proceso tiene costos de operación más bajos que los secadores convencionales (flama directa).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este proyecto, se ha trabajado en un computador Dell Precision. Procesador Intel core i7 – 7700HQ @ 2.80 GHz con 16 GB de ram.

El diseño geométrico inicial consideró la importación de una geometría de chile poblano. El estudio fue desarrollado en el programa de **ANSYS Workbench®**, comenzando con la realización de una caja cúbica de 0.6 m de lado. Las dimensiones del chile se hicieron lo más cercanas posible a la realidad siendo 18.92cm de punta a tallo y un promedio de 6.3 cm de lado a lado, posteriormente, se procedió con una operación conocida como “boleana” para separar los dominios de la caja, que sería el secador y el chile (Imagen 3).



**Imagen 3. Geometría propuesta del secador**

Para el mallado, se utilizó otro programa interno de ANSYS Workbench®, **ANSYS Meshing®**. Aquí se realizó el mallado de la geometría mediante el método “Cut-cell” para **FLUENT®** en ambos cuerpos, tanto el chile como el secador, resultando en un modelo que

consta de 412,131 celdas, 1,276,706 caras y 435,176 nodos (Imagen 4).

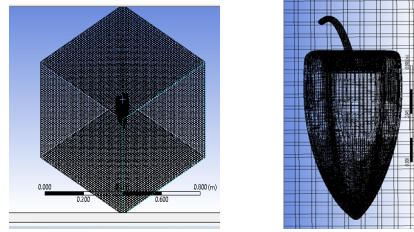


Imagen 4. Mallado estilo "Cutcell" del secador

Para la simulación, se trabajó en **ANSYS – FLUENT®** el cual opera mediante la solución iterativa de ecuaciones [12], las cuales se pueden expresar de la siguiente forma:

Ecuación de continuidad (1)

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

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido y  $\vec{v}$  es la velocidad del fluido.

Ecuación de cantidad de movimiento (2)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g}$$

Donde  $p$  es la presión,  $\rho \vec{g}$  son las fuerzas gravitacionales.

Ecuación de la energía (3)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v} (\rho E + p)] = 0$$

Donde  $E$  es la energía total (cinética y potencial) del fluido.

Ecuación de la radiación (4)

$$\frac{dl(r, s)}{dt} + (\alpha + \sigma_s) I(r, s) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s) \Phi(s, s') d\Omega'$$

Donde  $\vec{r}$  es el vector posición,  $\vec{s}$  es el vector de la dirección del sol,  $\vec{s}'$  es el vector dirección de la dispersión,  $\alpha$  es el coeficiente de absorción,  $\sigma_s$  es el coeficiente de dispersión,  $n$  es el índice refractivo,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $I$  es la intensidad de radiación,  $T$  es la temperatura local,  $\Phi$  es la función fase y  $\Omega'$  es el ángulo sólido.

La ecuación 4 puede resolverse con la ayuda de un modelo de radiación solar de **ANSYS – FLUENT®**, el cual calcula la radiación solar incidente a un modelo dependiendo de la localización del sol mediante datos de día, hora, fecha y coordenadas de posición del sitio de interés.

Ecuación del transporte de especies (5)

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

El modelo de especies es utilizado para la solución del cálculo de la transferencia de masa de agua del chile al aire.

Ecuación de la humedad específica (6)

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v}$$

Donde  $P_v$  es la presión de vapor del agua la cual puede ser sustituida por la presión de saturación del agua a esa temperatura. Esta última ecuación fue usada para especificar el contenido de humedad inicial del chile.

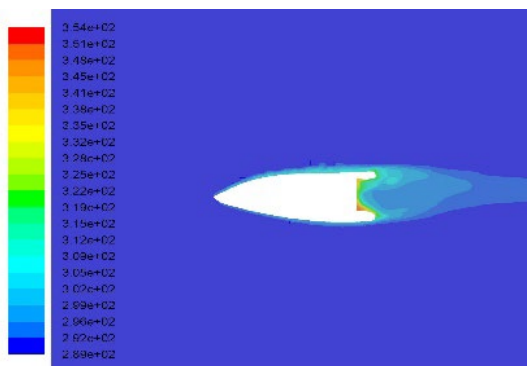
Para la simulación en **Fluent®**, se recabaron datos fisicoquímicos del material de estudio en cuestión, el chile poblano, mostrado en la Tabla 2:

**Tabla 2. Datos fisicoquímicos del chile poblano**

Propiedad	Valor
Densidad	863 kg/m <sup>3</sup>
Densidad aparente	519.36 kg/m <sup>3</sup>
Humedad	93.83 – 80.65 %
Calor específico	3871.94 J/kg K
Conductividad térmica	0.839 W/m K
Porosidad	0.493
Evapotranspiración (Perdida de humedad)	1.41x10 <sup>-5</sup> kg/m <sup>3</sup> s
Calor de absorción	41.39 W/m <sup>3</sup>
Coefficiente de transferencia de calor	1.91 W/m <sup>2</sup> K
Constante de secado	0.001489 / s

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación fue realizada para un día despejado de verano utilizando el modelo de radiación solar en un periodo de trabajo de 8 horas (8 a.m. – 4 p.m.) con un total de 597 “time steps” o pasos de tiempo. De acuerdo con los datos mostrados en la Tabla 2, se tomó un valor de humedad inicial en el chile de 85% (calculado con la ecuación 6). La temperatura inicial del flujo de aire, así como del chile, fue de 289K o 16°C (tomando en cuenta la temperatura a las 8 a.m.) La velocidad de entrada del aire se mantuvo constante a 1.5 m/s. La fracción masa es de 0.0097 kg materia húmeda/ kg materia seca.



**Imagen 5. Contornos de temperatura del chile**

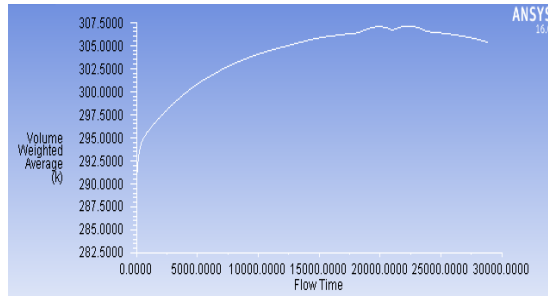


Imagen 6. Gráfico de Temperatura (K) vs paso del tiempo (s)

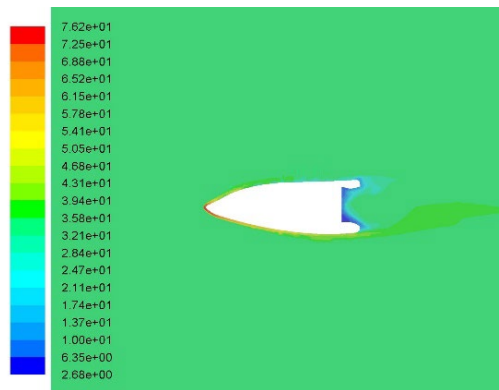


Imagen 7. Contornos de humedad relativa del chile

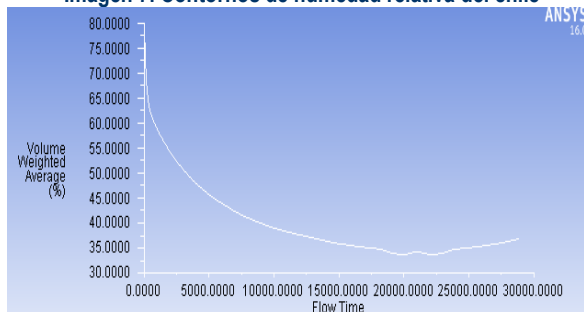


Imagen 8. Gráfico de porcentaje de humedad relativa vs paso del tiempo (s)

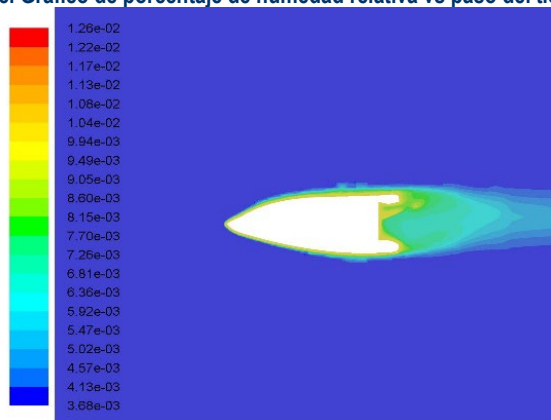
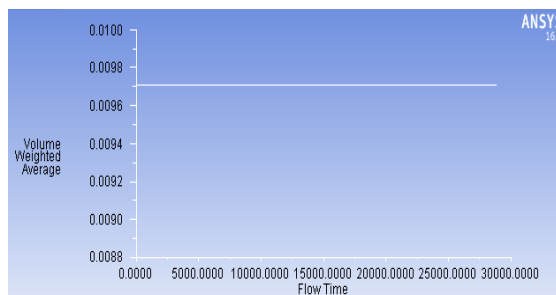


Imagen 9. Contornos de fracción másica del chile



**Imagen 10. Gráfico de fracción másica del chile vs paso del tiempo (s)**

Los resultados muestran el comportamiento fluido, másico y térmico del chile. De acuerdo con el paso del tiempo, se observa un aumento de temperatura en el cuerpo del chile (Imagen 5) conforme avanza el día por la posición del sol, mostrando un aumento gradual (Imagen 6) alcanzando una temperatura máxima de 81 °C en la salida del colector. La reducción de humedad en el chile fue de manera desigual en su superficie (Imagen 7), se interpreta que fue el contenido de humedad en el chile, la morfología indica una mayor cantidad de agua en el corazón (centro) y punta [13]. Del 85% de humedad relativa inicial en el chile, las pérdidas graduales fueron registradas en 3 distintas áreas: en la punta hubo una reducción hasta 76.2%, en la parte media se llegó hasta un 39.4% de humedad, en cuanto al área cercana al tallo la humedad se redujo hasta un 26.8%. Pasado un tiempo se muestra que el chile comienza a humedecerse de nuevo, posiblemente a la saturación del aire alrededor (Imagen 8). La transferencia de masa de agua del chile hacia el aire en el secador se muestra de manera correcta viéndose pérdidas en cuando a la superficie del chile donde se espera que se realice la transferencia de agua (Imagen 9). Se considera que la pérdida se dio como un valor constante (Imagen 10) resultando en una pérdida gradual de humedad en el chile.

## CONCLUSIONES

El comportamiento de secado realizado mediante el software Fluent®, resolviendo las ecuaciones pertinentes que rigen el comportamiento del proceso de secado del chile poblano fue el esperado, demostrando que es posible su simulación. Se puede concluir que, con una propuesta inicial es posible predecir un comportamiento preliminar de secado con condiciones simples (Simulación de un día despejado sin condiciones climáticas adversas y con una geometría del colector simple) y en periodos de tiempo que pueden variar desde unos minutos hasta jordanas completas de operación de 8 horas. Con análisis experimentales pertinentes a dicho proceso será posible realizar una comparación para generar datos óptimos de secado de chile poblano para así, proponer diseños de secadores solares donde es posible incluir variables más complejas como geometría, materiales, inclinación del secador, tiempos óptimos de secado y operación, donde también, sea posible simular con distintas geometrías de chile (Cada chile es distinto entre sí) u otros alimentos e incluso optimización de diseños de secadores.

## AGRADECIMIENTOS

Al I.Q. Fernando Guerrero, por brindarnos la geometría del chile poblano para la realización de este estudio.

Al M.I.Q. Óscar A. López, al ayudar con asesoría y configuración del modelo de radiación solar en Fluent®.

Al M.I.Q. Juan Nicolás Flores Balderas por asesorías para modelo de transferencia de masa.

## REFERENCIAS

- [1] Janjai, S. & Bala, B. K. (2011) Solar Drying Technology. *Food Eng Rev.* (2012), pp. 18-28 doi: 10.1007/s12393-011-9044-6
- [2] Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S. & Saidur, R. (2014) Performance study of different solar dryers: a review. *Renewable and sustainable energy reviews* (34), pp. 466
- [3] Rabha, D.K., Muthukumar, P. & Somavaii C. (2017) Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinese Jacq.*) dried on a forced convection solar dryer. *Renewable energy* (105)
- [4] Castillo-Téllez M., Pilatowsky-Figueroa I., López-Vidaña E. C., Sarracino-Martínez, O. & Hernández-Galvez G. (2016) Dehydration of red chilli (*capsicum annum L.*, costeño) using an indirect-type forced convection solar dryer. *Applied thermal engineering* (114)
- [5] BOHOJŁO-WIŚNIEWSKA, A. (2015) Numerical modelling of humid air flow around a porous body. *Acta mechanica et automatica* (9) doi: 10.1515/ama-2015-0027
- [6] Kaeekiew J, Nanbean S. & Janjai S. (2011) Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand. *Procedia Engineering* (32)
- [7] Tunde-Akintunde T. Y. (2011) Mathematical modelling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable Energy* (36)
- [8] Romero V. M, Cerezo, E, García, M. I, & Sánchez, M. H. (2014) Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program. *Energy procedia* (57).
- [9] Mustafa Aktas, Seyfi Sevik, Ali Amini & Ataollah Khanlari. (2016) Analysis of drying of melon in a solar-heat assisted infrared dryer. *Solar energy* (137)
- [10] Melekjani N & Jafari S. M. (2018) Simulation of food drying processes by computational fluid dynamics CFD; recent advances and approaches. *Trends in food science and technology* (78)
- [11] Mendoza E, Saavedra R, Marcelo D & La Madrid, R. (2017) Numerical characterisation of one-step and three-step solar air heating collectors used for cocoa bean solar drying
- [12] ANSYS. ANSYS Fluent Theory Guide 2013;15317:514. doi:10.1016/0140-3664(87)90311-2.
- [13] Mendoza, L. G. (2013) Propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del chile jalapeño (*Capsicum annum var. annum*) fresco y seco. (Tesis de maestría) Instituto de ciencias básicas. Universidad Veracruzana.