



Ingeniería agrícola y biosistemas

ISSN: 2007-3925

ISSN: 2007-4026

Universidad Autónoma Chapingo

Garduño-García, Ángel; López-Cruz, Irineo L.; Ruiz-García, Agustín
Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural
and forced convection for agricultural products: state of the art
Ingeniería agrícola y biosistemas, vol. 9, núm. 1, 2017, Enero-Junio, pp. 19-36
Universidad Autónoma Chapingo

DOI: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.02.004>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688672140002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural and forced convection for agricultural products: state of the art

Modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección natural y forzada para productos agrícolas: estado del arte

Ángel Garduño-García; Irineo L. López-Cruz; Agustín Ruiz-García*

Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

*Corresponding author: aruiz@correo.chapingo.mx, tel. 01 595 952 1500 ext. 1551

Abstract

Keywords: theoretical models, empirical models, computational fluid dynamics, neuro-fuzzy models.

Sun-drying is the most widely used method of preserving agricultural products; however, under hostile climatic conditions it leads to serious losses in product quantity and quality. The use of solar drying technology in developing countries can reduce postharvest losses and significantly improve product quality compared to other methods. The development of mathematical models of solar dryers is necessary to be able to design, control and optimize this type of system. The aim of this study is to provide an overview of the different approaches to modeling and simulating greenhouse solar dryers, both of natural and forced convection. In addition, models that have not been extensively used in this area, such as empirical and numerical ones, are discussed.

Resumen

Palabras clave: modelos teóricos, modelos empíricos, dinámica de fluidos computacional, modelos neuro-difusos.

El secado al sol es el método más utilizado para preservar productos agrícolas; sin embargo, bajo condiciones climáticas hostiles conduce a pérdidas graves en la cantidad y calidad del producto. El uso de tecnología de secadores solares en países en desarrollo puede reducir las pérdidas postcosecha y mejorar significativamente la calidad del producto en comparación con otros métodos. El desarrollo de modelos matemáticos de secadores solares es necesario para poder diseñar, controlar y optimizar este tipo de sistemas. El objetivo del presente trabajo es mostrar un panorama sobre los diferentes enfoques de modelación y simulación de secadores solares tipo invernadero, tanto de convección natural como forzada. Además, se discuten los modelos que no han sido usados de manera significativa en esta área, tales como los empíricos y numéricos.



Introduction

Drying is defined as the process of removing moisture by the transfer of heat and mass simultaneously (Janjai & Bala 2012; El-Sebaii & Shalaby, 2012). This method is common in food preservation (Ertekin & Yaldiz, 2004). The drying process is divided into two stages. The first occurs on the surface of the material at a constant drying rate, and is similar to the evaporation of water in the environment. The second is carried out at a decreasing drying rate. The condition of the second stage is determined by the properties of the material being dried (Can, 2000; El-Sebaii & Shalaby, 2012).

Sun-drying is the oldest method used to preserve agricultural products such as grains, fruits and vegetables (Belessiotis & Delyannis, 2011). However, this type of drying under hostile climatic conditions leads to severe losses in the quantity and quality of the product (Pangavhane, Sawheny, & Sarsavadia, 2002). These losses are related to contamination by dirt and dust, and infestation by insects, rodents and other animals (Janjai & Bala 2012; Prakash, Laguri, Pandey, Kumar, & Kumar, 2016). For this reason, the introduction of solar drying technology in developing countries can reduce postharvest losses and significantly improve product quality compared to traditional methods such as shade-drying or direct sun-drying (Yaldiz, Ertekin, & Uzun, 2001).

One of the solar drying systems with the greatest potential is the greenhouse type (SSSTI), since it can be used on an industrial scale due to its processing capacity. Usually, its structure is made of galvanized iron bars, and the roof and walls are made of polycarbonate. The front wall has air inlets. A thin layer of products is placed on trays located on single-level raised platforms to facilitate loading and unloading. Solar radiation passing through the roof heats the air, the products and the concrete floor. Hot air passes through and over the product absorbing its moisture. Damp air is usually removed from the dryer by extractors. A special greenhouse solar dryer design is one that has a parabolic shape and is ventilated with extractors powered by a photovoltaic solar energy system (Janjai et al., 2009).

Bala (1997) was one of the pioneers in studying the fundamentals of the heat and mass transfer process of the greenhouse solar dryer. Other researchers have reported results related to heat and mass transfer in tunnel-type greenhouse solar dryers (Hossain, Woods, & Bala, 2005). Recently, mathematical models of improved versions of greenhouse solar dryers (Janjai et al., 2009) and dryers that use photovoltaic solar energy to efficiently control ventilation have been proposed (Barnwal & Tieari, 2008; Janjai et al., 2009).

Introducción

Secado se define como un proceso de eliminación de humedad debido a la transferencia de calor y masa en forma simultánea (Janjai & Bala 2012; El-Sebaii & Shalaby, 2012). Este método es común en la conservación de alimentos (Ertekin & Yaldiz, 2004). El proceso de secado se divide en dos etapas. La primera ocurre en la superficie del material a velocidad constante de secado, y es similar a la evaporación de agua en el ambiente. La segunda se lleva a cabo a velocidad decreciente de secado. La condición de la segunda etapa es determinada por las propiedades del material que se está secando (Can, 2000; El-Sebaii & Shalaby, 2012).

El secado al sol es el método más antiguo utilizado para preservar productos agrícolas como granos, frutas y hortalizas (Belessiotis & Delyannis, 2011). Sin embargo, este tipo de secado bajo condiciones climáticas hostiles conduce a pérdidas graves en la cantidad y calidad del producto (Pangavhane, Sawheny, & Sarsavadia, 2002). Dichas pérdidas están relacionadas con la contaminación por suciedad, polvo e infestación por insectos, roedores y otros animales (Janjai & Bala 2012; Prakash, Laguri, Pandey, Kumar, & Kumar, 2016). Por ello, la introducción de tecnología de secadores solares en países en desarrollo puede reducir las pérdidas postcosecha y mejorar significativamente la calidad del producto en comparación con métodos tradicionales, tales como el secado en sombra o directo al sol (Yaldiz, Ertekin, & Uzun, 2001).

Uno de los sistemas de secado solar con mayor potencial es el tipo invernadero (SSSTI), ya que puede ser usado a escala industrial debido a su capacidad de procesamiento. Generalmente, su estructura es de barras de hierro galvanizadas, y la cubierta y paredes son de policarbonato. La pared frontal tiene entradas de aire. Se coloca una capa fina de productos sobre bandejas localizadas en plataformas elevadas de un solo nivel para facilitar la carga y descarga. La radiación solar al pasar por la cubierta calienta el aire, los productos y el piso de concreto. El aire caliente pasa a través de y sobre el producto absorbiendo su humedad. El aire húmedo, normalmente, se remueve del secador mediante extractores. Un diseño especial de secador solar tipo invernadero es aquel que tiene forma parabólica y es ventilado con extractores alimentados por un sistema fotovoltaico de energía solar (Janjai et al., 2009).

Bala (1997) fue uno de los pioneros en estudiar los fundamentos del proceso de transferencia de calor y masa del secador solar tipo invernadero. Otros investigadores han reportado resultados relacionados con transferencia de calor y masa en secadores solares

Every drying system must be designed in an appropriate way to meet the requirements of a specific product and present its optimum performance in terms of drying times and final product quality. This means that the characteristics (dimensions, roof and structural materials, microclimate, among others) of the dryer depend on environmental and economic factors. However, large-scale experiments with different products, seasons of the year and system configurations can be very costly and impractical (Bala & Woods, 1994). Therefore, the development of mathematical models (static and dynamic) and computer simulations is a basic tool to predict the behavior of a solar drying system.

The development of mathematical models of solar dryers is necessary in order to know the physical processes associated with dehydration, and to control, design and optimize this system. In addition to contributing to the design of dryers, mathematical models are important in the operation of the system, the quality of the product to be dried and energy savings (Prakash et al., 2016). In a recent review article (Chauhan, Kumar, & Gupta, 2016) on SSSTI thermal models, the importance of using this type of mechanistic model in the design and control of these systems is emphasized.

A mathematical model is a simplified representation of a system. In general, three approaches have been applied to mathematically model the solar dryer: mechanistic models, empirical models and numerical or computational fluid dynamics (CFD) models. According to Bala and Janjai (2013), the future of research on solar dryers is aimed at the study of the optimization of product quality and design parameters through the use of techniques such as CFD.

The aim of this study is to provide an overview of the different approaches to modeling and simulating greenhouse solar dryers, both of natural and forced convection, and present the models used to design, optimize and control the environment of this system. The task is addressed by taking into account the most general classification of greenhouse solar dryers, which is the division between natural (passive) and forced (active) convection solar dryers.

Classification of solar dryers

One way to classify solar dryers in a general way is according to the mechanism by which the energy used to remove the moisture is transferred to the product (Prakash & Kumar, 2013; Prakash & Kumar, 2014c). In this way, three types can be identified: 1) direct solar dryer, 2) indirect solar dryer and 3) mixed-mode solar dryer. On the other hand, Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, and Sulaiman (2010) present a more precise classification, in which they take into account the

tipo invernadero en forma de túnel (Hossain, Woods, & Bala, 2005). Recientemente, se han propuesto modelos matemáticos de versiones mejoradas de secadores solares tipo invernadero (Janjai et al., 2009) y secadores que utilizan energía solar fotovoltaica para controlar eficientemente la ventilación (Barnwal & Tieari, 2008; Janjai et al., 2009).

Todo sistema de secado debe ser diseñado en forma apropiada para satisfacer los requerimientos de un producto específico y presentar su desempeño óptimo en cuanto a tiempos de secado y calidad final del producto. Lo anterior significa que las características (dimensiones, materiales de cubierta y estructurales, microclima, entre otros) del secador depende de factores ambientales y económicos. No obstante, los experimentos a gran escala con diferentes productos, estaciones del año y configuraciones del sistema pueden resultar muy costosos e imprácticos (Bala & Woods, 1994). Por ello, el desarrollo de modelos matemáticos (estáticos y dinámicos) y simulaciones por computadora son una herramienta básica para predecir el comportamiento de un sistema de secado solar.

El desarrollo de modelos matemáticos de secadores solares es necesario para poder conocer los procesos físicos asociados con la deshidratación, y para controlar, diseñar y optimizar este sistema. Además de contribuir en el diseño de secadores, los modelos matemáticos son importantes en la operación del sistema, la calidad del producto a secar y el ahorro de energía (Prakash et al., 2016). En un artículo de revisión reciente (Chauhan, Kumar, & Gupta, 2016) sobre modelos térmicos de SSSTI, se enfatiza la importancia del uso de este tipo de modelos mecanicistas en el diseño y control de estos sistemas.

Un modelo matemático es una representación simplificada de un sistema. En general, se han aplicado tres enfoques para modelar matemáticamente el secador solar: modelos mecanicistas, modelos empíricos y modelos numéricos o de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). De acuerdo con Bala y Janjai (2013), el futuro de las investigaciones referentes a secadores solares está encaminado al estudio de la optimización de la calidad del producto y de los parámetros de diseño mediante el uso de técnicas como la CFD.

El objetivo del presente trabajo es mostrar un panorama sobre los diferentes enfoques de modelación y simulación de secadores solares tipo invernadero, tanto de convección natural como forzada. Además, exponer los modelos usados para diseñar, optimizar y controlar el ambiente de este sistema. El problema se aborda tomando en cuenta la clasificación más general de los secadores solares tipo invernadero; la cual los

design of the system components and the way in which the solar energy is used (Figure 1).

Greenhouse solar dryers

Vijayavenkataraman, Iniyan, and Goic (2012) define a greenhouse solar dryer as a large solar collector in which the dehydration process of a product (agricultural, marine or livestock) takes place. According to Prakash and Kumar (2014c), this type of dryer is included in the direct or mixed category, given the fact that in both categories there is an enclosure with a transparent cover; that is, there is absorption of solar radiation on the product. In addition, Kumar, Tiwari, Kumar, and Pandey (2006) state that these dryers can be subclassified according to their structure: 1) spherical dome, designed to take maximum advantage of global solar radiation, and 2) flat roof, which promotes a suitable mixing of the air inside the dryer.

A more general classification of this type of dryer includes only two categories: 1) passive greenhouse solar dryer (natural convection) and 2) active greenhouse solar dryer (forced convection, Bala & Debnath, 2012; Prakash & Kumar, 2013, Prakash & Kumar, 2014c). In the first case, the airflow is established by the fluid buoyancy forces generated from the temperature difference at different points in the fluid. In the second, the airflow is provided by a fan powered by electricity or fossil fuel.

incluye dentro de la categoría de secadores solares de convección natural (pasivos) y forzada (activos).

Clasificación de los secadores solares

Una forma de clasificar de manera general los secadores solares es de acuerdo con el mecanismo por el cual la energía utilizada para eliminar la humedad se transfiere al producto (Prakash & Kumar, 2013; Prakash & Kumar, 2014c). De esta manera, se pueden identificar tres tipos: 1) secador solar directo, 2) secador solar indirecto y 3) secador solar de tipo mixto. Por otra parte, Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, y Sulaiman (2010) presentan una clasificación más precisa, en la cual toman en cuenta el diseño de los componentes del sistema y la forma en la que se utiliza la energía solar (Figura 1).

Secadores solares tipo invernadero

Vijayavenkataraman, Iniyan, y Goic (2012) definen al secador solar tipo invernadero como un colector solar grande en el cual tiene lugar el proceso de deshidratado de un producto (agrícola, marino o pecuario). De acuerdo con Prakash y Kumar (2014c), este tipo de secadores están incluidos en la categoría de directos o mixtos, dando por hecho que en ambas categorías existe un recinto con cubierta transparente; es decir, existe absorción de radiación solar sobre el

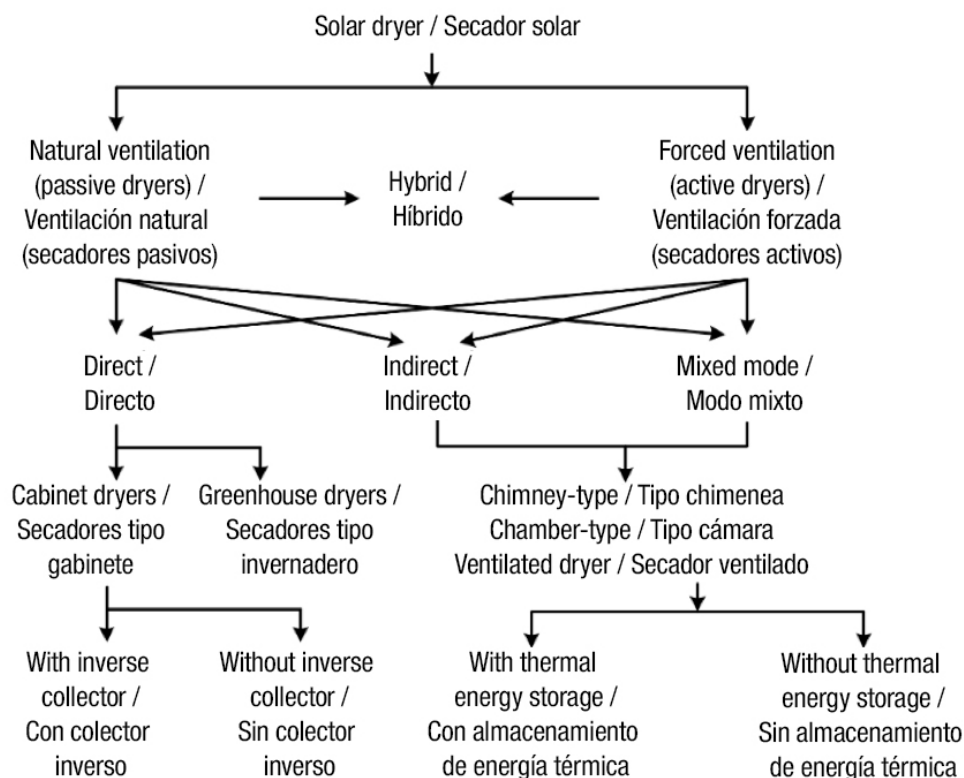


Figure 1. Classification of solar dryers for agricultural products (Adapted from Fudholi et al., 2010).

Figura 1. Clasificación de secadores solares para productos agrícolas (Adaptada de Fudholi et al., 2010).

Figure 2 illustrates the operating principle of a greenhouse solar dryer. It shows that the product to be dried is placed on a layer to receive the solar radiation that is transmitted through a transparent cover, whereas the moisture is removed from the system by natural or forced convection (Sahdev, 2014). During the process, a fraction of the incident solar radiation on the cover is transmitted to the interior of the dryer, while another is reflected. Subsequently, a fraction of the transmitted radiation is reflected in short wavelength form from the product surface to the atmosphere through the cover. The remaining radiation is absorbed by the product, thereby increasing its temperature and resulting in long wavelength radiation, which does not escape into the external environment due to the presence of the transparent cover. This increases the temperature inside the system.

The transparent cover also fulfills the objective of reducing heat loss by direct convection to the environment, thus preventing the temperature in the interior from decreasing. The loss of heat or energy by convection and evaporation occurs inside the dryer, from the product to its surroundings. Finally, the moisture produced by the evaporation of water from the product is removed from the dryer by a chimney (natural convection) or a fan-induced airflow (forced convection, Kumar, Tiwari, Kumar, & Pandey, 2006).

producto. Asimismo, Kumar, Tiwari, Kumar, y Pandey (2006) afirman que una subclasificación de éstos puede ser de acuerdo con su estructura: 1) forma de domo, cuyo objetivo es aprovechar al máximo la radiación solar global, y 2) de techo plano, el cual promueve una mezcla adecuada del aire dentro del secador.

Una clasificación más general de este tipo de secadores incluye sólo dos categorías: 1) secador solar tipo invernadero pasivo (convección natural) y 2) secador solar tipo invernadero activo (convección forzada, Bala & Debnath, 2012; Prakash & Kumar, 2013, Prakash & Kumar, 2014c). En el primer caso, el flujo de aire se establece mediante las fuerzas de flotación del fluido generadas a partir de la diferencia de temperatura en distintos puntos del fluido. En el segundo, el flujo de aire es proporcionado mediante un ventilador operado por electricidad o combustible fósil.

En la Figura 2 se ilustra el principio de funcionamiento de un secador solar tipo invernadero. Se observa que el producto a secar es colocado en una capa para recibir la radiación solar que se transmite a través de una cubierta transparente, mientras que la humedad se remueve del sistema mediante convección natural o forzada (Sahdev, 2014). Durante el proceso, una fracción de la radiación solar incidente sobre la cubierta se transmite al interior del secador, mientras que otra

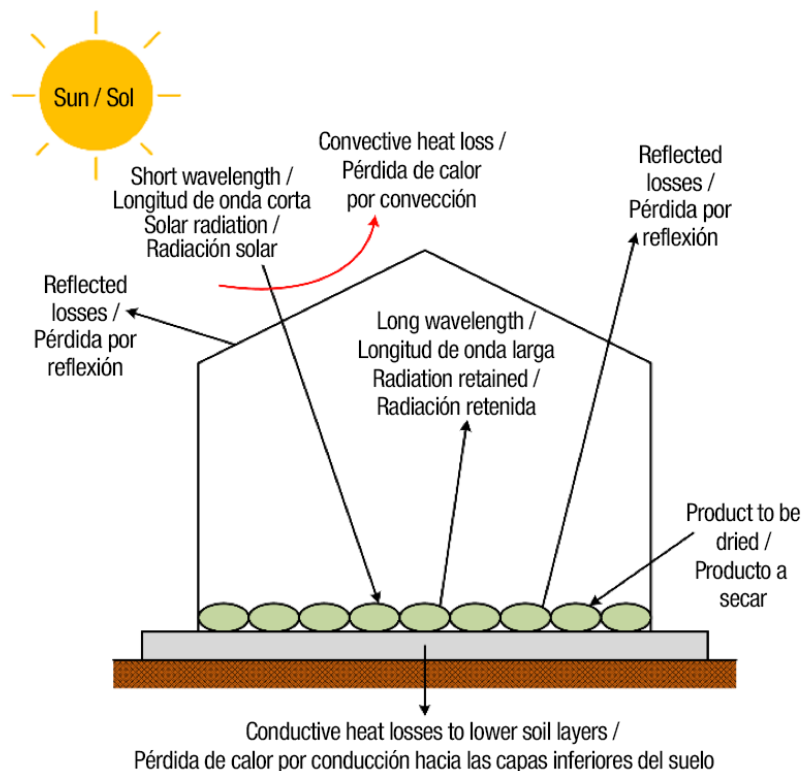


Figure 2. Physical processes of radiation, convection and conduction that occur in a greenhouse solar dryer (Adapted from Sahdev, 2014).

Figura 2. Procesos físicos de radiación, convección y conducción que ocurren en un secador solar tipo invernadero (Adaptada de Sahdev, 2014).

Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural convection

One of the main advantages of solar drying systems with natural convection over those with forced convection is that the former require relatively little economic investment due to their low operation and maintenance costs (Bala & Debnath, 2012). Therefore, in spite of having difficulties in terms of temperature control and a limited drying rate, these systems are a more viable option for domestic-scale use (Janjai & Bala, 2012). According to the literature, three types of models have been used to mathematically model greenhouse solar dryers with natural convection: mechanistic, empirical and numerical or CFD ones, the last-mentioned models in a very incipient way.

Mechanistic models, also called theoretical, are based on first principles, particularly in the mass and energy transfer processes that are carried out during drying and in the greenhouse-dryer environment. It is possible to obtain a dynamic model represented by a set of ordinary (usually non-linear) differential equations, by means of instantaneous balances of energy and matter in a non-stationary state in the cover for the air inside the greenhouse, inside the product and on the dryer floor. Since the resulting model is not linear, the solutions are necessarily numerical. Some researchers have studied, with this type of model, the change in the air temperature with respect to time inside the dryer, the product, the ground and the cover, in addition to the change in the moisture content of the product during the dehydration process (Kumar & Tiwari, 2006a; Farhat, Kooli, Kerkeni, Maalej, Fadhel, & Belghith, 2004).

On the other hand, some papers report the convective heat transfer coefficient, which is an important parameter in the simulation of the drying rate, since the temperature difference between the air and the product varies with this coefficient (Anwar & Tiwari, 2001). This has been addressed in natural convection greenhouse solar dryers for khoa drying (Kumar, 2014) and under no-load conditions (Chauhan & Kumar, 2016).

Although drying kinetics can be described using transport properties together with those of the drying medium, a drying constant defined by the thin layer equation is used in agricultural products (Togrul & Pehlivan, 2004). There are numerous studies in which different models have been generated. In the specific case of passive greenhouse solar dryers, thin layer models have been used to study the drying kinetics of amaranth (Ronoh, Kanali, Mailutha, & Shitanda, 2010), coconut (Arun & Sreenarayanan, 2014), red pepper (Fadhel, Kooli, Farhat, & Belghith, 2014) and tomato (Sacilik, Keskin, & Elicin, 2006; Demir & Sacilik, 2010).

se refleja. Posteriormente, una fracción de la radiación transmitida se refleja en forma de longitud de onda corta de la superficie del producto hacia la atmósfera a través de la cubierta. La radiación restante se absorbe por el producto incrementando su temperatura, dando lugar a una radiación de longitud de onda larga, la cual no escapa hacia el ambiente externo debido a la presencia de la cubierta transparente. De este modo, se incrementa la temperatura en el interior del sistema.

La cubierta transparente también cumple con el objetivo de reducir la pérdida de calor por convección directa hacia el ambiente, y así evitar que la temperatura en el interior disminuya. La pérdida de calor o energía por convección y evaporación se producen en el interior del secador, del producto hacia sus alrededores. Finalmente, la humedad producida por la evaporación de agua del producto se retira del secador por una chimenea (convección natural) o por medio de un flujo de aire inducido por ventiladores (convección forzada, Kumar, Tiwari, Kumar, & Pandey, 2006).

Modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección natural

Una de las principales ventajas de los sistemas de secado solar con convección natural sobre los de convección forzada es que los primeros requieren una inversión económica relativamente menor gracias a su bajo costo de operación y mantenimiento (Bala & Debnath, 2012). Por ello, a pesar de tener dificultades en el control de temperatura y una tasa limitada de secado, estos sistemas aparecen como una opción más viable para su uso a escala doméstica (Janjai & Bala, 2012). De acuerdo con la literatura, para modelar matemáticamente los secadores solares tipo invernadero con convección natural se han usado tres tipos de modelos: mecanicistas, empíricos y numéricos o de CFD; estos últimos de forma muy incipiente.

Los modelos mecanicistas, también llamados teóricos, se basan en principios básicos, en particular en los procesos de transferencia de masa y energía que se llevan a cabo durante el secado y en el ambiente del invernadero-secador. Es posible obtener un modelo dinámico representado por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (en general no lineales); esto mediante balances instantáneos de energía y materia en estado no estacionario en la cubierta para el aire dentro del invernadero, dentro del producto y en el piso del secador. Dado que el modelo resultante no es lineal, las soluciones son necesariamente numéricas. Algunos investigadores han estudiado, con este tipo de modelos, el cambio con respecto del tiempo de la temperatura del aire dentro del secador, el producto, el suelo y la cubierta, además del cambio en el contenido de humedad del producto durante el proceso de

To date, fuzzy logic-based models are little used to model the climate of solar dryers. Recently, researchers have begun to use neuro-fuzzy models (Prakash & Kumar, 2014a), which combine the advantages of fuzzy logic systems with artificial neural networks.

It is also possible to obtain spatial models represented by a set of differential equations in partial derivatives, for several variables of the system, carrying out integral balances of matter and energy. The resulting equations are generally non-linear and require numerical solutions. Like fuzzy logic, CFD is a technique that has only been used in an incipient way in the modeling of natural convection greenhouse solar dryers (Lokeswaran & Eswaramoorthy, 2013; Somsila & Teeboonma, 2014). According to Versteeg and Malalasekera (1995), the advantages of CFD analysis compared to experimentation-based ones can be summarized as: a substantial reduction in time and costs for the generation of new designs, the possibility of analyzing systems under conditions that are difficult to create experimentally, the ability to study systems under hazardous conditions, and, finally, the ability to assess a level of detail that is virtually unlimited. That is, experimental methods are more expensive the greater the number of measurement points, while CFD codes can generate a large volume of results at no additional cost, making parametric studies easier to do.

CFD comprises the Navier-Stokes equations, expressed as a set of partial differential equations. These equations can be represented as shown in Equation 1:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho u\phi) = \nabla(\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (1)$$

where, ∂ is the partial derivative, ρ the density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), t is the time, ∇ is the divergence, ϕ is any physical quantity modeled (e.g. air temperature and humidity, moisture content of the product to be dehydrated), u is the wind speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), Γ is the diffusion coefficient ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) and S is the source term.

Table 1 shows a summary of research on mathematical modeling of natural convection greenhouse solar dryers.

Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with forced convection

According to Bala and Janjai (2013), the success achieved by natural convection dryers has been limited due to the low rate of induced airflow. This has led researchers to concentrate their efforts on the development of forced convection solar dryers powered by electricity from the power grid, fossil fuels and mainly the use of photovoltaic (PV) panels. These dryers have some advantages over natural convection

deshidratado (Kumar & Tiwari, 2006a; Farhat, Kooli, Kerkeni, Maalej, Fadhel, & Belghith, 2004).

Por otro lado, algunos trabajos reportan el coeficiente de transferencia de calor por convección; el cual es un parámetro importante en la simulación de la tasa de secado, ya que la diferencia de temperatura entre el aire y el producto varía con este coeficiente (Anwar & Tiwari, 2001). Lo anterior, ha sido abordado en secadores solares tipo invernadero con convección natural para el secado de khoa (Kumar, 2014) y bajo condiciones de no carga (Chauhan & Kumar, 2016).

Aunque las cinéticas de secado pueden ser descritas usando propiedades de transporte conjuntamente con las del medio de secado, en productos agrícolas se emplea una constante de secado definida mediante la ecuación de capa fina (Togrul & Pehlivan, 2004). Existen numerosos estudios en donde se han generado diferentes modelos. En el caso específico de secadores solares tipo invernadero pasivos, se han utilizado los modelos de capa fina para estudiar la cinética de secado de amaranto (Ronoh, Kanali, Mailutha, & Shitanda, 2010), coco (Arun & Sreenarayanan, 2014), pimiento rojo (Fadhel, Kooli, Farhat, & Belghith, 2014) y tomate (Sacilik, Keskin, & Elicin, 2006; Demir & Sacilik, 2010).

Hasta la fecha, los modelos basados en lógica difusa son una opción poco usada para modelar el clima de secadores solares. Recientemente, se ha iniciado el uso de modelos neuro-difusos (Prakash & Kumar, 2014a) que combinan las ventajas de los sistemas de lógica difusa con redes neuronales artificiales.

También es posible obtener modelos espaciales representados mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, para varias variables del sistema, llevando a cabo balances integrales de materia y energía. Las ecuaciones resultantes, generalmente, no son lineales y requieren soluciones numéricas. Al igual que la lógica difusa, la CFD es una técnica que se ha usado solo en forma incipiente en la modelación de secadores solares tipo invernadero de convección natural (Lokeswaran & Eswaramoorthy, 2013; Somsila & Teeboonma, 2014). De acuerdo con Versteeg y Malalasekera (1995), las ventajas que proporciona el análisis mediante CFD respecto de los basados en experimentación, se pueden resumir en: reducción sustancial de tiempos y costos para la generación de nuevos diseños, posibilidad de analizar sistemas en condiciones difíciles de ejecutar experimentalmente, capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas y, finalmente, el nivel de detalle es prácticamente ilimitado. Es decir, los métodos experimentales son más caros cuando mayor es el número de puntos de medida; mientras que los códigos de CFD pueden generar un gran volumen de

Table 1. Papers on mathematical modeling of natural convection greenhouse solar dryers.**Cuadro 1. Trabajos sobre modelación matemática en secadores solares tipo invernadero con convección natural.**

Work performed / Trabajo realizado	Reference / Cita
Development and evaluation of a model that includes an ordinary differential equation to predict jaggery temperature. / Desarrollo y evaluación de un modelo que incluye una ecuación diferencial ordinaria para predecir la temperatura de azúcar palmera.	Kumar and Tiwari (2006a)
Proposal for an ordinary differential equation to simulate moisture loss from pepper as a function of ventilation rate, air temperature, product temperature and solar radiation transmitted through the dryer cover. / Propuesta de una ecuación diferencial ordinaria para simular la pérdida de humedad del pimiento en función de la tasa de ventilación, temperatura del aire, temperatura del producto y radiación solar transmitida a través de la cubierta del secador.	Farhat et al. (2004)
Study of convective heat and mass transfer coefficients during drying of khoa as a function of size. / Estudio de coeficientes de transferencia de masa y calor por convección de la khoa durante el proceso de secado en función de su tamaño.	Kumar (2014)
Evaluation of the heat utilization factor, convective heat transfer coefficient and coefficient of diffusivity coefficient by thermal performance analysis for a north-wall insulated dryer under no-load conditions. / Evaluación del factor de utilización de calor, el coeficiente de transferencia de calor por convección y el coeficiente de difusividad mediante un análisis de eficiencia térmica para un secador con aislamiento en la pared norte en condiciones de no-carga.	Chauhan and Kumar (2016)
Use of six thin layer models to study the drying process of amaranth grains. / Uso de seis modelos de capa fina para estudiar el proceso de secado de granos de amaranto.	Ronoh et al. (2010)
Testing of 10 thin layer mathematical models to describe the drying kinetics of coconut. / Prueba de 10 modelos matemáticos de capa fina para describir la cinética de secado del coco.	Arun and Sreenarayanan (2014)
Study of six thin layer models of the red pepper drying process under three different conditions. / Estudio de seis modelos de capa fina del proceso de secado de pimiento rojo bajo tres condiciones diferentes.	Fadhel et al. (2014)
Use of 10 thin layer models to study the drying process of organic tomato in a tunnel-type solar dryer. / Empleo de 10 modelos de capa fina para estudiar el proceso de secado de tomate orgánico en un secador solar tipo túnel.	Sacilik et al. (2006)
Use and comparison of five thin layer models to determine the drying kinetics of tomato. / Uso y comparación de cinco modelos de capa fina para determinar la cinética de secado del tomate.	Demir and Sacilik (2010)
Development and evaluation of a neuro-fuzzy model to predict the temperature of jaggery and the dryer, plus evaporated moisture. / Desarrollo y evaluación de un modelo neurodifuso para predecir la temperatura de azúcar de palmera y del secador, y humedad evaporada.	Prakash and Kumar (2014a)
Numerical analysis using CFD of a greenhouse solar dryer with no product to dehydrate inside. The dryer model was developed in GAMBIT and analyzed in FLUENT 6.3.26. / Análisis numérico mediante CFD de un secador solar tipo invernadero sin producto a deshidratar en su interior. El modelo del secador fue desarrollado en GAMBIT y analizado en FLUENT 6.3.26	Lokeswaran and Eswaramoorthy (2013)
Study of the distribution of temperature and airflow inside a greenhouse solar dryer for rubber using CFD. / Estudio de la distribución de temperatura y circulación aire en el interior de un secador solar tipo invernadero para caucho mediante CFD.	Somsila and Teeboonma (2014)

ones, such as: they are used on an industrial scale because of the large product load volume that can be dried and the microclimate variables can be controlled more precisely.

At present, one of the most widespread dryer models at research and commercial level is the PF-ventilated parabolic greenhouse solar dryer. This was developed at the Solar Energy Research Laboratory at the University of Silpakorn in Thailand (Bala & Janjai, 2013).

Unlike passive solar dryers, research work on active ones has been limited to the use of theoretical and empirical models, leaving aside the application of CFD, which still needs to be tested in this system.

Regarding forced convection greenhouse solar dryers, the temporal behavior of both the temperature and the moisture of the product has also been studied, thanks to the development of models based on mass and energy balances that finally concludes in a system of ordinary or partial differential equations. It is important to highlight that, for the development of the energy balance in a non-stationary state, the researchers make several assumptions that allow simplifying the system and processes modeled (Jain & Tiwari, 2004b; Kumar & Tiwari, 2006a; Janjai et al., 2009; Tiwari, Tripathi, & Tiwari, 2016):

- (i) The heat capacity of the dryer cover and structure is negligible.
- (ii) A single layer of product to be dried is considered.
- (iii) There is no stratification in dryer air temperature.
- (iv) The absorptivity of air is negligible.
- (v) The fraction of solar radiation that is lost through the north wall is negligible.

The dynamic theoretical models proposed by different authors can be generically defined by a non-linear first order ordinary differential equation of the form:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t), p); \quad x(t_0) = x_0 \quad (2)$$

where $x \in R^n$, $u \in R^m$, $p \in R^q$ and $x_0 \in R^n$. The vector of the state variables (x) contains the variables that characterize the system, such as temperature (of the air, product and cover), moisture ratio inside the dryer and moisture content of the product to be dehydrated. The input vector (u) contains variables that express the effect of the environment on the behavior of the system, such as the temperature and humidity of the outside air, global solar radiation and ventilation rates. The vector (p) represents the thermodynamic parameters of the model, such as the conductive, convection and radiative heat transfer coefficients. In general, f is a non-linear vector function, so the dynamic model has no analytical solution and must be

resultados sin costo añadido, con lo cual resulta más fácil hacer estudios paramétricos.

La CFD comprende las ecuaciones de Navier-Stokes, expresadas como un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales. Estas ecuaciones pueden ser representadas como se muestra en la Ecuación 1:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho u\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (1)$$

donde, ∂ es la derivada parcial, ρ la densidad ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), t es el tiempo, ∇ la divergencia, ϕ es cualquier cantidad física modelada (por ejemplo, temperatura y humedad del aire, contenido de humedad del producto a deshidratar), u es la velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), Γ es el coeficiente de difusión ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) y S es el término fuente.

En el Cuadro 1 se muestra un resumen y referencia de investigaciones sobre modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección natural.

Modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección forzada

De acuerdo con Bala y Janjai (2013), el éxito alcanzado por los secadores con convección natural ha sido limitado debido a la baja tasa de flujo de aire inducido causada por la flotabilidad. Esto ha provocado que los investigadores concentren sus esfuerzos en el desarrollo de secadores solares con convección forzada operados mediante energía proveniente de la red eléctrica, de combustibles fósiles, y principalmente, del uso de paneles fotovoltaicos (PF). Este tipo de secadores tienen algunas ventajas sobre los de convección natural, entre ellas: son utilizados a escala industrial por la gran capacidad de carga de producto que pueden secar y las variables del microclima pueden ser controladas de manera más precisa.

En la actualidad, uno de los modelos de secadores más difundidos a nivel de investigación y comercial es el secador solar tipo invernadero de forma parabólica PF-ventilado. Este se desarrolló en el Laboratorio de Investigación en Energía Solar, en la Universidad de Silpakorn, Tailandia (Bala & Janjai, 2013).

A diferencia de los secadores solares pasivos, en los activos los trabajos de investigación se han limitado al uso de modelos teóricos y empíricos, dejando de lado la aplicación de la CFD, la cual aún necesita probarse en este sistema.

En secadores solares tipo invernadero de convección forzada, también se ha estudiado el comportamiento temporal, tanto de la temperatura como de la humedad del producto; esto gracias al desarrollo de modelos basados en balances de masa y energía que finalmente concluye

solved by numerical integration. As the state collects all system information in an instant, it is possible to define the relationship of the output variable (y) with the state and input. This general non-linear algebraic equation is denoted as:

$$y = g(x(t), u(t), p) \quad (3)$$

Some output variables of the mathematical models of a solar dryer are the same states or a transformation of them, since this allows comparing them with the data measured by the sensors. Since the resulting systems of equations are highly non-linear, their solution is necessarily numerical. The most used method for the solution of the resulting system is that of finite differences (Janjai, Srisittipokakun, & Bala, 2008; Janjai et al. 2009; Janjai, Intawee, Kaewkiew, Sritus, & Khamvongsa, 2011; Janjai, 2012; Janjai, Phusampao, Nilnont, & Pankaew, 2014; Jitjack, Thepa, Sudaprasert, & Namprakai, 2016).

There is research that includes the development of models to simulate the drying process (Bekkioui, Hakam, Zoulalian, & Sesbou, 2011; Aghbashlo, Müller, Mobli, Madadlou, & Rafiee, 2015; Azaizia, Kooli, Elkhadraoui, Hamdi, & Guizani, 2017), the thermal performance of the dryer (Almuhanna, 2012; Tiwari et al., 2016) and the convective heat transfer coefficient obtained during the drying of onion (Kumar & Tiwari, 2007), grape (Barnwal & Tiwari, 2008) and papad (Kumar, 2013). It is even possible to find mechanistic mathematical models, which have been used in conjunction with economic models to find the optimum dimensions for a solar tunnel dryer for drying chilli (Hossain et al., 2005).

The thin layer models in forced convection greenhouse solar dryers have been used in tomato (Prakash & Kumar, 2014b). Unlike theoretical models, empirical ones allow summarizing data and relating the input and output variables of a system. Artificial neural networks are non-linear empirical or black-box models that have been used to describe and explain the behavior of the drying process of jackfruit bulbs (Bala, Ashraf, Uddin, & Janjai, 2005) and rubber sheets (Janjai, Piwsaoad, Nilnont, & Pankaew, 2015) in this type of dryer. Artificial neural networks require a large amount of data and a lot of training time for the user. Also, fuzzy logic has been applied to predict the evaporation rate in jaggery (Prakash, Kumar, Kaviti, & Kumar, 2015) and in neuro-fuzzy models to simulate the behavior of a greenhouse dryer under no-load conditions.

Table 2 shows a summary of the research relating to mathematical modeling of forced convection greenhouse solar dryers.

en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. Es importante resaltar que, para el desarrollo del balance de energía en estado no estacionario, los investigadores asumen varios supuestos que permiten simplificar el sistema y procesos modelados (Jain & Tiwari, 2004b; Kumar & Tiwari, 2006a; Janjai et al., 2009; Tiwari, Tripathi, & Tiwari, 2016):

- (i) La capacidad calorífica de la cubierta y la estructura del secador es despreciable.
- (ii) Se considera una sola capa de producto a secar.
- (iii) No existe estratificación de la temperatura del aire del secador.
- (iv) La absorptividad del aire es despreciable.
- (v) La fracción de radiación solar que se pierde a través de la pared norte es despreciable.

Los modelos teóricos dinámicos planteados por diferentes autores pueden definirse en forma genérica mediante una ecuación diferencial ordinaria de primer orden no-lineal de la forma:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t), p); \quad x(t_0) = x_0 \quad (2)$$

donde $x \in R^n$, $u \in R^m$, $p \in R^q$ y $x_0 \in R^n$. El vector de las variables de estado (x) contiene las variables que caracterizan al sistema, tales como temperatura (del aire, producto y cubierta), razón de humedad en el interior del secador y contenido de humedad del producto a deshidratar. El vector de entrada (u) contiene variables que expresan el efecto del ambiente sobre el comportamiento del sistema, tales como temperatura y humedad del aire exterior; así como la radiación solar global y tasas de ventilación. El vector (p) representa los parámetros termodinámicos del modelo, tales como los coeficientes de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. En general, f es una función vectorial no-lineal, por lo que el modelo dinámico no tiene solución analítica y este debe ser resuelto mediante integración numérica. Como el estado recoge toda la información del sistema en un instante, es posible definir la relación de la variable de salida (y) con el estado y la entrada. Esta ecuación algebraica general no lineal se denota como:

$$y = g(x(t), u(t), p) \quad (3)$$

Algunas variables de salida de los modelos matemáticos de un secador solar son los mismos estados o una transformación de ellos; ya que esto permite su comparación con los datos medidos por los sensores. Dado que los sistemas resultantes de ecuaciones son altamente no lineales, su solución es necesariamente numérica. El método más empleado para la solución del sistema resultante es el de diferencias finitas (Janjai, Srisittipokakun, & Bala,

Table 2. Papers on mathematical modeling of forced convection greenhouse solar dryers.**Cuadro 2. Trabajos sobre modelación matemática en secadores solares tipo invernadero con convección forzada.**

Work performed / Trabajo realizado	Reference / Cita
Study of a dryer (with an integrated photovoltaic panel) through energy balances to predict the temperature of the panel and the air inside. In addition, use of an ordinary differential equation to predict the temperature of the product. / Estudio de un secador (con un panel fotovoltaico integrado) mediante balances de energía para predecir la temperatura del panel y del aire en el interior. Además, uso de una ecuación diferencial ordinaria para predecir la temperatura del producto,	Tiwari et al. (2016)
Analysis of the performance of a dryer with a roof-integrated solar collector, using a model based on ordinary differential equations for the analysis of the collector and a system of partial differential equations for the analysis of the dryer. / Análisis del rendimiento de un secador con un colector solar en el techo, utilizando un modelo basado en ecuaciones diferenciales ordinarias para el análisis del colector y un sistema de ecuaciones diferenciales parciales para el análisis del secador.	Janjai et al. (2008)
Development of a system of partial differential equations to describe the heat and moisture transfer of peeled longan (Asian fruit belonging to the litchi family) and banana processed in a PF-ventilated solar dryer. / Desarrollo de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales para describir la transferencia de calor y humedad de longan (fruta asiática perteneciente a la familia del litchi) y plátano pelados procesados en un secador solar PF-ventilado.	Janjai et al. (2009)
Development of a model based on a system of partial differential equations to describe the heat and moisture transfer in chilli, banana and coffee during drying. / Desarrollo de un modelo basado en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales para describir la transferencia de calor y humedad en chile, plátano y café durante el secado.	Janjai et al. (2011)
Generation of a model with a system of partial differential equations to describe the heat and moisture transfer of osmotically dehydrated tomato. / Generación de un modelo con sistema de ecuaciones diferenciales parciales para describir la transferencia de calor y humedad de tomate deshidratado osmóticamente.	Janjai (2012)
Development of a model using partial differential equations to describe the heat and moisture transfer of macadamia nuts during the drying process. / Desarrollo de un modelo mediante ecuaciones diferenciales parciales para describir la transferencia de calor y humedad de nueces de macadamia durante el proceso de secado.	Janjai et al. (2014)
Testing and generation of a system of partial differential equations to predict the air temperature inside a dryer for rubber drying. / Prueba y generación de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales para predecir la temperatura del aire en el interior de un secador para deshidratado de caucho.	Jitjack et al. (2016)
Development and validation of a mathematical model based on ordinary differential equations to simulate the wood drying process. / Desarrollo y validación de un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales ordinarias para simular el proceso de secado de madera.	Bekkioui et al. (2011)
Development of a model integrating an equilibrium drying model and thin-layer drying principles. The model was evaluated experimentally and TRNSYS was used to simulate the drying process of chamomile flowers. / Combinación de un modelo que describe la tasa de secado en equilibrio y los principios del modelo de capa fina. El modelo se evaluó experimentalmente y utilizaron TRNSYS para simular el proceso de secado de flores de manzanilla.	Aghbashlo et al. (2015)
Generation of a mechanistic model for a greenhouse dryer with an attached solar collector to study the influence of the area of the product to be dried, airflow rate and collector area on the air temperature and humidity inside the dryer. / Generación de un modelo mecanicista para un secador tipo invernadero con un colector solar acoplado para estudiar la influencia del área del producto a deshidratar, la tasa del flujo de aire y el área del colector, la temperatura y la humedad del interior del secador.	Azaizia et al. (2017)
Evaluation of the performance of a dryer by thermal balance derived in algebraic equations showing the distribution of incident solar energy in useful heat gain and thermal losses. / Evaluación del rendimiento de un secador mediante balance térmico derivado en ecuaciones algebraicas que muestran la distribución de la energía solar incidente en ganancia de energía útil y pérdidas térmicas.	Almuhanna (2012)
Evaluation of the effect of drying batch size on convective heat transfer coefficient in onion flakes. / Evaluación del efecto del tamaño del lote de secado sobre el coeficiente de transferencia de calor por convección en cebolla.	Kumar and Tiwari (2007)
Study of the convective heat transfer coefficient in grapes in a hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer. / Estudio del coeficiente de transferencia de calor en uva por convección en un secador solar híbrido térmico-fotovoltaico.	Barnwal and Tiwari (2008)
Determination of average convective and evaporative heat transfer coefficients during papad drying. / Obtención de coeficientes promedio de transferencia de calor por convección y evaporación durante el secado de papad.	Kumar (2013)
Use of a model based on partial differential equations together with an economic (algebraic) model to find the optimum dimensions of a chilli dryer. / Uso de un modelo basado en ecuaciones diferenciales parciales conjuntamente con un modelo económico (algebraico) para encontrar las dimensiones óptimas de un secador de chile.	Hossain et al. (2005)
Testing of seven thin layer models to predict the drying process of tomato flakes. / Prueba de siete modelos de capa fina para predecir el proceso de secado de tomate en rodajas.	Prakash and Kumar (2014b)
Use of the multilayer neural network method to predict the performance of a solar tunnel dryer for drying jackfruit bulbs. / Uso del método de redes neuronales multicapa para predecir el rendimiento de un secador solar en forma de túnel en yaca.	Bala et al. (2005)
Development of a multilayer neural network model to predict the performance of a rubber sheet dryer. / Desarrollo de un modelo de redes neuronales multicapa para predecir el rendimiento de un secador de láminas de caucho.	Janjai et al. (2015)
Use of a fuzzy logic model to predict the rate of moisture evaporation from jaggery in a controlled environment. / Uso de un modelo de lógica difusa para predecir la tasa de evaporación de humedad de azúcar de palmera en un ambiente controlado.	Prakash et al. (2015)

Modeling of greenhouse solar dryers with natural and forced convection

Some researchers have opted to develop complementary works, in which they have presented a thermal model for a dryer with both natural and forced convection (Table 3; Jain & Tiwari, 2004b). It should be noted that these studies have concentrated on the study of the convective heat (Jain & Tiwari, 2004a; Tiwari, Kumar, & Prakash, 2004) and mass (Kumar & Tiwari, 2006b; Kumar, Kasana, Kumar, & Prakash, 2011) transfer coefficient for different agricultural products.

Critical analysis

Up to now, the dynamic mathematical models proposed for greenhouse solar dryers have been mainly theoretical and describe the drying rate of an agricultural product or the behavior of the microclimate variables inside the dryer. Normally, these models are evaluated using data collected in experiments; however, they have not been the result of applying all the stages that the procedure for generating dynamic system models includes (van Straten, 2008). No studies have been found in the literature on sensitivity analysis, parameter estimation (calibration), uncertainty analysis and evaluation related to solar dryers. These analyses are required to determine the behavior of the models and increase the reliability of their predictions before being used

2008; Janjai et al. 2009; Janjai, Intawee, Kaewkiew, Sritus, & Khamvongsa, 2011; Janjai, 2012; Janjai, Phusampao, Nilnont, & Pankaew, 2014; Jitjack, Thepa, Sudaprasert, & Namprakai, 2016).

Existen investigaciones que incluyen el desarrollo de modelos para simular el proceso de secado (Bekkioui, Hakam, Zoulalian, & Sesbou, 2011; Aghbashlo, Müller, Mobli, Madadlou, & Rafiee, 2015; Azaizia, Kooli, Elkhadraoui, Hamdi, & Guizani, 2017), la eficiencia térmica del secador (Almuhanna, 2012; Tiwari et al., 2016) y la obtención del coeficiente de transferencia de calor por convección durante el secado de cebolla (Kumar & Tiwari, 2007), uva (Barnwal & Tiwari, 2008) y papad (Kumar, 2013). Incluso, es posible encontrar modelos matemáticos mecanicistas; los cuales han sido utilizados conjuntamente con modelos económicos para encontrar las dimensiones óptimas para un secador solar de chile (Hossain et al., 2005).

Los modelos de capa fina en secadores solares tipo invernadero de convección forzada se han empleado en tomate (Prakash & Kumar, 2014b). A diferencia de los modelos teóricos, los empíricos permiten resumir datos y relacionar variables de entrada y salida de un sistema. Las redes neuronales artificiales son modelos empíricos o de caja negra, no-lineales, que han sido usados para describir y explicar el comportamiento del proceso de secado de yaca (Bala, Ashraf, Uddin,

Table 3. Work carried out on greenhouse solar dryers with natural and forced convection.
Cuadro 3. Trabajos desarrollados sobre secadores solares tipo invernadero con convección natural y forzada.

Work performed/Trabajo realizado	Reference /Cita
Development of theoretical models based on ordinary differential equations to study the thermal behavior of cabbage and peas during the drying process under the sun and inside a greenhouse (in natural and forced convection)./ Desarrollo de modelos teóricos basados en ecuaciones diferenciales ordinarias para estudiar el comportamiento térmico de col y chícharo durante el proceso de secado al sol y bajo invernadero (en convección natural y forzada).	Jain and Tiwari (2004b)
Evaluation of the behavior of the convective mass transfer coefficient during drying of jaggery./ Evaluación del comportamiento del coeficiente de transferencia de masa por convección durante el proceso de secado de azúcar de palmera.	Tiwari et al. (2004)
Study of the convective mass transfer coefficient and rate of moisture removal from cabbage and peas (in the sun and under a greenhouse) as a function of some climatic parameters./ Estudio del coeficiente de transferencia de masa por convección y la tasa de humedad removida en el deshidratado de col y chícharo (al sol y bajo invernadero) como función de algunos parámetros climáticos.	Jain and Tiwari (2004a)
Study of the effect of sample size and shape on convective mass transfer coefficient during the jaggery drying process./ Estudio del efecto del tamaño y forma de las muestras sobre el coeficiente de transferencia de masa durante el proceso de secado de azúcar de palmera.	Kumar and Tiwari (2006b)
Research on the convective heat transfer coefficient during the drying of khoa (product of India similar to cheese) in the sun and under a greenhouse (in natural and forced convection)./ Investigación sobre el coeficiente de transferencia de calor por convección durante el secado de khoa (producto de India similar al queso) al sol y bajo invernadero (en convección natural y forzada).	Kumar et al. (2011)

in design, optimization and control. Nor has it been explored to what extent the predictive quality of a dynamic mathematical model can be improved by data assimilation methods such as non-linear Kalman filters, particle filtering and variational data assimilation. Therefore, this may be a new line of research. In addition to developing dynamic models, systems theory must be applied to generate realistic models.

The finite difference method is the most used to solve non-linear ordinary differential equations proposed by some authors to account for the change in the temperature variable and humidity of different components of the dryer system (Janjai et al. 2009; Janjai, 2012). One possible line of research is the use of classical numerical methods such as Euler's, the second-order Runge-Kutta, the fourth-order Runge-Kutta or methods for stiff systems for the integration of non-linear ordinary differential equations (Press et al., 1997). These methods are available in simulation environments such as Matlab-Simulink, Fortran Simulation Translator (FST), and R programming language, among others. Also, they can be coded with a generic programming language like C or FORTRAN.

However, dynamic greenhouse solar dryer models have rarely been used in the approach and solution of dynamic optimization problems through the application of optimal control theory. This is a possible line of research, as the solar dryer can be operated optimally by making minimal use of energy. Optimizing drying time can also be sought by combining solar energy with other energy sources (Gallestey & Paice, 1997).

There are few studies focused on the use of artificial neural networks, fuzzy logic systems and neuro-fuzzy models for modeling greenhouse solar dryers. The main advantage of these methods is that they allow obtaining a mathematical model of the system from experimental data of the input and output signals without needing to have a detailed knowledge of the physical processes that occur in a SSSTI. In addition, the process for generating these models is shorter compared to the time required by a mechanistic or CFD model. Regarding autoregressive models with exogenous inputs (ARX), they can be used as an alternative to mechanistic or theoretical models to optimize and control the solar dryer and the drying process.

On the other hand, it is important to emphasize that the study of greenhouse solar dryers using CFD remains a field of interest, since to date this method has not been addressed in detail and the little research that exists has focused on the dryer without product inside. In addition, the design of this type of technology has usually been used in the experimental approach,

& Janjai, 2005) y hojas de caucho (Janjai, Piwsaoad, Nilnont, & Pankaew, 2015) en este tipo de secadores. Las redes neuronales artificiales requieren de una gran cantidad de datos y mucho tiempo de entrenamiento para quien las utiliza. También, la lógica difusa ha sido aplicada en la predicción de la tasa de evaporación en azúcar de palmera (Prakash, Kumar, Kaviti, & Kumar, 2015) y en modelos neuro-difusos para simular el comportamiento de un secador tipo invernadero bajo condiciones de no-carga.

En el Cuadro 2 se muestra un resumen y la cita de investigaciones referentes a modelación matemática en secadores solares tipo invernadero de convección forzada.

Modelación de secadores solares tipo invernadero con convección natural y forzada

Algunos investigadores han optado por desarrollar trabajos complementarios, en los cuales han expuesto un modelo térmico para un secador tanto con convección natural como forzada (Cuadro 3; Jain & Tiwari, 2004b). Cabe destacar que estos trabajos se han concentrado en el estudio del coeficiente de transferencia de calor (Jain & Tiwari, 2004a; Tiwari, Kumar, & Prakash, 2004) y masa (Kumar & Tiwari, 2006b; Kumar, Kasana, Kumar, & Prakash, 2011) por convección para distintos productos agrícolas.

Análisis crítico

Hasta ahora, los modelos matemáticos dinámicos propuestos para secadores solares tipo invernadero han sido principalmente teóricos y describen la tasa de secado de un producto agrícola, o bien, el comportamiento de las variables del microclima dentro del secador. Normalmente, estos modelos son evaluados mediante datos recabados en experimentos; sin embargo, no han sido resultado de la aplicación de todas las etapas que contempla el procedimiento de generación de modelos dinámicos de sistemas (van Straten, 2008). No se han encontrado en la literatura estudios sobre análisis de sensibilidad, estimación de parámetros (calibración), análisis de incertidumbre y evaluación en secadores solares. Estos análisis son necesarios para conocer el comportamiento de los modelos e incrementar la confiabilidad de sus predicciones antes de ser usados en diseño, optimización y control. Tampoco se ha explorado en qué medida la calidad predictiva de un modelo matemático dinámico puede ser mejorada mediante métodos de asimilación de datos, como filtros de Kalman no lineales, filtrado de partículas y asimilación de datos variacional. Por lo tanto, esta puede ser una línea de investigación nueva. Además de desarrollar modelos dinámicos, se requiere aplicar la teoría de sistemas para generar modelos realistas.

because determining the behavior and efficiency of a design with certainty requires the construction of scale models. This requires long periods and even considerable budgets for obtaining precise results.

The results derived from CFD simulation allow us to know, in a fast and economical way, the behavior of the microclimate variables inside the dryer as a function of its design variables. In other words, it is possible to know the spatial behavior (spatial variation) of the temperature (of the air, cover, ground and product), humidity and air speed and direction as a function of the geometry of the dryer (flat roof, parabolic, spherical, among others), its orientation, the ventilation mechanism, the physical properties of the materials and the dimensions of the prototype. The results produced by CFD constitute a reliable basis from which it is possible to consider new measures for the design of greenhouse solar dryers. Therefore, two-dimensional or three-dimensional CFD models have enormous potential, not only to better understand the spatial behavior of the variables of interest, but also to improve the design and optimize this system.

Conclusions

Multiple theoretical and empirical models have been developed for the simulation of processes and variables within a greenhouse solar dryer. However, there is limited research related to the application of this type of model in the management of solar dryers by the application of different control algorithms and systems and control theory approaches (such as classical, optimal, predictive, adaptive and intelligent control) to achieve the desired performance. Therefore, the development of control systems to improve the performance of greenhouse solar dryers is a line of research to be developed.

In order for dynamic models of the solar dryer environment to be a tool to better understand its operation and to be useful for designing, optimizing and controlling it, the generation of its structure must be complemented by sensitivity analysis, calibration, evaluation, uncertainty analysis and data assimilation.

Thin layer models are difficult to use in greenhouse solar dryers, since they are structured as a function of time; however, the most important parameter to consider is global radiation, because the temperature inside the dryers largely depends on it. Therefore, it is necessary to generate models of this type that include in their structure the behavior of radiation throughout the day.

Mathematical models that allow us to study the spatial behavior of a greenhouse solar dryer, represented by partial differential equations, use numerical solutions

El método de diferencias finitas es el más usado para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales propuestas por algunos autores para dar cuenta del cambio de la variable temperatura y humedad de diferentes componentes del sistema secador (Janjai et al. 2009; Janjai, 2012). Una línea posible de investigación es el uso de métodos numéricos clásicos como el de Euler, Runge-Kutta de segundo orden, Runge-Kutta de cuarto orden o métodos para sistemas rígidos para la integración de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales (Press et al., 1997). Estos métodos se encuentran disponibles en ambientes de simulación como Matlab-Simulink, Fortran Simulation Translator (FST), lenguaje de programación R, entre otros. También, pueden codificarse con un lenguaje de programación genérico como C o FORTRAN.

No obstante, rara vez se han usado los modelos dinámicos de secadores solares tipo invernadero en el planteamiento y solución de problemas de optimización dinámica mediante la aplicación de la teoría de control óptimo. Esta es una posible línea de investigación, ya que el secador solar puede operarse de forma óptima haciendo un uso mínimo de energía. También se puede buscar optimizar el tiempo de secado combinando la energía solar con otras fuentes de energía (Gallestey & Paice, 1997).

Existen pocos trabajos enfocados en el uso de redes neuronales artificiales, sistemas de lógica difusa y modelos neuro-difusos para modelación de secadores solares tipo invernadero. La principal ventaja de estos métodos es que permiten obtener un modelo matemático del sistema a partir de datos experimentales de las señales de entrada y salida sin necesidad de tener un conocimiento detallado de los procesos físicos que ocurren en un SSSTI. Además, el proceso de generación de estos modelos es más corto comparado con el tiempo que requiere un modelo mecanicista o de CFD. Referente a los modelos autorregresivos con entradas exógenas (ARX), estos pueden utilizarse como una alternativa a los modelos mecanicistas o teóricos para optimizar y controlar el secador solar y el proceso de secado.

Por otro lado, es importante resaltar que el estudio de secadores solares tipo invernadero mediante CFD sigue siendo un campo de interés; ya que hasta la fecha este problema no ha sido abordado con detalle y la poca investigación que existe se ha centrado en el secador sin producto en su interior. Además, el diseño de este tipo de tecnología, normalmente, se ha utilizado en el enfoque experimental; debido a que, determinar el comportamiento y eficiencia de un diseño con certeza requiere la construcción de modelos a escala. Lo anterior requiere de tiempos largos e incluso considerables presupuestos para la obtención de resultados precisos.

based on computational fluid dynamics (CFD), which have only been applied in an incipient way. Therefore, there is great potential for CFD to become a very important research tool that can contribute to the generation of a solar dryer design with a more appropriate interior distribution of climatic variables.

End of English version

References / Referencias

- Aghbashlo, M., Müller, J., Mobli, H., Madadlou, A., & Rafiee, S. (2015). Modeling and simulation of deep-bed solar greenhouse drying of chamomile flowers. *Drying Technology*, 33(6), 684-695. doi: 10.1080/07373937.2014.981278
- Almuhanna, E. A. (2012). Utilization of a solar greenhouse as a solar dryer for drying dates under the climatic conditions of the eastern province of Saudi Arabia: Part I: Thermal performance analysis of a solar dryer. *Journal of Agricultural Science*, 4(3), 237-246. doi: 10.5539/jas.v4n3p237
- Anwar, S. I., & Tiwari, G. N. (2001). Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions. *Energy conversion and management*, 42(5), 627-637. doi: 10.1016/S0196-8904(00)00065-0
- Arun, S., & Sreenarayanan, V. V. (2014). Mathematical modeling of solar tunnel greenhouse dryer for describing the drying kinetics of copra. *International journal of innovative technology and exploring engineering*, 4(5), 2278-3075. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?jsessionid=9ABE66E3746495B96CC54A47705E7A63?doi=10.1.1.676.1250&rep=rep1&type=pdf>
- Azaizia, Z., Kooli, S., Elkhadraoui, A., Hamdi, I., & Guizani, A. (2017). Investigation of a new solar greenhouse drying system for peppers. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.180
- Bala B. K. (1997). *Drying and storage of cereal grains*. India: Oxford & IBH Pub. Co. Pvt. Ltd.
- Bala, B. K., Ashraf, M. A., Uddin, M. A., & Janjai, S. (2005). Experimental and neural network prediction of the performance of a solar tunnel drier for drying jackfruit bulbs and leather. *Journal of Food Process Engineering*, 28(6), 552-566. doi: 10.1111/j.1745-4530.2005.00042.x
- Bala, B. K., & Debnath, N. (2012). Solar Drying Technology: Potentials and Developments. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2. doi:10.4303/jfrea/R120302
- Bala, B. K., & Janjai, S. (2013). Solar drying of agricultural products. *Stewart Postharvest Review*, 9(2), 1-8. doi: 10.2212/spr.2013.2.4
- Bala, B. K., & Woods, J. L. (1994). Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy*, 53(3), 259-266. doi: 10.1016/0038-092X(94)90632-7

Los resultados derivados de la simulación mediante CFD permiten conocer, de una forma rápida y económica, el comportamiento de las variables del microclima dentro del secador en función de las variables de diseño del mismo. Es decir, es posible conocer el comportamiento espacial (variación espacial) de la temperatura (del aire, cubierta, suelo y producto), humedad, velocidad y dirección del aire en función de la geometría del secador (techo plano, parabólico, esférico, entre otros), su orientación, el mecanismo de ventilación, las propiedades físicas de los materiales y las dimensiones del prototipo. Los resultados producidos por la CFD constituyen una base fidedigna a partir de la cual es posible considerar nuevas medidas de diseño de secadores solares tipo invernadero. Por lo tanto, existe un potencial enorme de los modelos de CFD bidimensionales o tridimensionales, no solo para entender mejor el comportamiento espacial de las variables de interés, sino también para mejorar el diseño y optimizar este sistema.

Conclusiones

Se han desarrollado múltiples modelos teóricos y empíricos para la simulación de procesos y variables dentro de un secador solar tipo invernadero. Sin embargo, son muy limitadas las investigaciones relacionadas con la aplicación de este tipo de modelos en el manejo de los secadores solares mediante la aplicación de diferentes algoritmos de control y enfoques de la Teoría de Sistemas y Control (como control clásico, óptimo, predictivo, adaptable e inteligente) para obtener el desempeño deseado. Por lo tanto, el desarrollo de sistemas de control para mejorar el desempeño de secadores solares tipo invernadero es una línea de investigación a desarrollar.

Para que los modelos dinámicos del ambiente del secador solar sean una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y sean útiles para diseñar, optimizar y controlarlo, la generación de su estructura debe complementarse con análisis de sensibilidad, calibración, evaluación, análisis de incertidumbre y asimilación de datos.

En el caso de los modelos de capa fina, se hace difícil su uso en secadores solares tipo invernadero, ya que están estructurados en función del tiempo; sin embargo, el parámetro más importante a considerar es la radiación global, esto debido a que depende en gran medida de la temperatura en el interior del secador. Por ello, es necesario generar modelos de este tipo que incluyan en su estructura el comportamiento de la radiación a lo largo del día.

Los modelos matemáticos que permiten estudiar el comportamiento espacial de un secador solar tipo invernadero, representado por ecuaciones diferenciales

- Barnwal, P., & Tiwari, G. N. (2008). Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: an experimental study. *Solar Energy*, 82(12), 1131-1144. doi: 10.1016/j.solener.2008.05.012
- Bekkioui, N., Hakam, A., Zoulalian, A., & Sesbou, A. (2011). Solar drying of pine lumber: Verification of a mathematical model. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 13(1), 29-40. doi: 10.4067/S0718-221X2011000100003
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665-1691. doi: 10.1016/j.solener.2009.10.001
- Can, A. (2000). Drying kinetics of pumpkinseeds. *International Journal of energy research*, 24(11), 965-975. doi: 10.1002/1099-114X(200009)24:11<965::AID-ER635>3.0.CO;2-W
- Chauhan, P. S., & Kumar, A. (2016). Performance analysis of greenhouse dryer by using insulated north-wall under natural convection mode. *Energy Reports*, 2, 107-116. doi: 10.1016/j.egyr.2016.05.004
- Chauhan, P. S., Kumar, A., & Gupta, B. (2016). A review on thermal models for greenhouse dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.023
- Demir, K., & Sacilik, K. (2010). Solar drying of Ayaş tomato using a natural convection solar tunnel dryer. *J. Food Agric. Environ*, 8(1), 7-12. Retrieved from http://world-food.net/download/journals/2010-issue_1/1.pdf
- El-Sebaei, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37-43. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.134
- Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349-359. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2003.08.007
- Fadhel, A., Kooli, S., Farhat, A., & Belghith, A. (2014). Experimental study of the drying of hot red pepper in the open air, under greenhouse and in a solar drier. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014(2014), 1-14. doi: 10.5171/2014.515285.
- Farhat, A., Kooli, S., Kerkeni, C., Maalej, M., Fadhel, A., & Belghith, A. (2004). Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse. *International journal of thermal sciences*, 43(1), 53-58. doi: 10.1016/S1290-0729(03)00098-X
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1-30. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.032
- Gallestey, E., & Paice, A. D. (1997). Mathematical modelling and optimal control of solar dryers. *Mathematical Modelling of Systems*, 3(4), 297-322. doi: 10.1080/13873959708837063
- Hossain, M. A., Woods, J. L., & Bala, B. K. (2005). Optimisation of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss. *Renewable Energy*, 30(5), 729-742. doi: 10.1016/j.renene.2004.01.005
- Jain, D., & Tiwari, G. N. (2004a). Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: en derivadas parciales, utilizan soluciones numéricas basadas en dinámica de fluidos computacional; los cuales, solo se han aplicado de manera incipiente. Por lo tanto, existe gran potencial para investigaciones como una herramienta muy importante que puede contribuir en la generación de un diseño de secador solar, cuya distribución de las variables climáticas en el interior sea la más adecuada.
- Janjai, S., & Tiwari, G. N. (2004b). Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection II. Thermal modeling and experimental validation. *Energy Conversion and management*, 45(17), 2777-2793. doi: 10.1016/j.enconman.2003.12.011
- Janjai, S. (2012). A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination. *International Journal of Energy Environment*, 3(3), 383-398. Retrieved from http://www.ijee.ieefoundation.org/vol3/issue3/IJEE_05_v3n3.pdf
- Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar drying technology. *Food Engineering Reviews*, 4(1), 16-54. doi: 10.1007/s12393-011-9044-6
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C., & Khamvongsa, V. (2011). A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 36(3), 1053-1062. doi: 10.1016/j.renene.2010.09.008
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B. K., Nagle, M., & Müller, J. (2009). Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, 83(9), 1550-1565. doi: 10.1016/j.solener.2009.05.003
- Janjai, S., Phusampao, C., Nilnont, W., & Pankaew, P. (2014). Experimental performance and modeling of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(6), 1155-1161. Retrieved from <http://www.ijser.org/researchpaper%5CExperimental-performance-and-modeling-of-a-greenhouse-solar-dryer.pdf>
- Janjai, S., Piwsaoad, J., Nilnont, W., & Pankaew, P. (2015). Experimental Performance and Neural Network Modeling of a Large-scale Greenhouse Solar Dryer for Drying Natural Rubber Sheets. *Journal of Control Science and Engineering*, 3(1), 48-53. doi: 10.17265/2328-2231/2015.01.006
- Janjai, S., Srisittipokakun, N., & Bala, B. K. (2008). Experimental and modelling performances of a roof-integrated solar drying system for drying herbs and spices. *Energy*, 33(1), 91-103. doi: 10.1016/j.energy.2007.08.009

Fin de la versión en español

Evaluation of convective mass transfer coefficient. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 765-783. doi: 10.1016/S0196-8904(03)00178-X

- Jitjack, K., Thepa, S., Sudaprasert, K., & Namprakai, P. (2016). Improvement of a rubber drying greenhouse with a parabolic cover and enhanced panels. *Energy and Buildings*, 124, 178-193. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.04.030
- Kumar, M. (2013). Forced convection greenhouse papad drying: An experimental study. *Journal of Engineering, Science and Technology*, 8(2), 177-189. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Mahesh_Kumar83/publication/255722806_Forced_convection_greenhouse_papad_dryingAn_experimental_study/links/5487ebb80cf2ef34478ed238/Forced-convection-greenhouse-papad-dryingAn-experimental-study.pdf
- Kumar, M. (2014). Effect of size on the convective heat and mass transfer coefficients during natural convection greenhouse drying of khoa-a heat desiccated milk product. *International Journal of Renewable Energy and Biofuels*, 2014, 1-11. doi: 10.5171/2014.961114
- Kumar, M., Kasana, K. S., Kumar, S. & Prakash, O. (2011). Experimental investigation on convective heat transfer coefficient for khoa drying. *International Journal of Current Research*, 3(8), 88-93. Retrieved from <http://www.journalcra.com/sites/default/files/Download%20901.pdf>
- Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2006a). Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation. *Solar Energy*, 80(9), 1135-1144. doi: 10.1016/j.solener.2005.09.011
- Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2006b). Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient during greenhouse drying (GHD) of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 73(2), 121-134. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.01.011
- Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2007). Effect of mass on convective mass transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of onion flakes. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1337-1350. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.04.026
- Kumar, A., Tiwari, G. N., Kumar, S., & Pandey, M. (2006). Role of greenhouse technology in agricultural engineering. *International Journal of Agricultural Research*, 1(4), 364-372. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/265249365>
- Lokeswaran, S., & Eswaramoorthy, M. (2013). An experimental analysis of a solar greenhouse: computational fluid dynamics (CFD) validation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(21), 2062-2071. doi: 10.1080/15567036.2010.532195
- Pangavhane, D. R., Sawhney, R. L., & Sarsavadia, P. N. (2002). Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, 27(6), 579-590. doi: 10.1016/S0360-5442(02)00005-1
- Prakash, O., & Kumar, A. (2013). Historical review and recent trends in solar drying systems. *International Journal of Green Energy*, 10(7), 690-738. doi: 10.1080/15435075.2012.727113
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014a). ANFIS modelling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation. *International Journal of Sustainable Energy*, 33(2), 316-335. doi: 10.1080/14786451.2012.724070
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014b). Environomical analysis and mathematical modelling for tomato flakes drying in a modified greenhouse dryer under active mode. *International Journal of Food Engineering*, 10(4), 669-681. doi: 10.1515/ijfe-2013-0063
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014c). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 905-910. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.084
- Prakash, O., Kumar, A., Kaviti, A. K., & Kumar, P. V. (2015). Prediction of the rate of moisture evaporation from jaggery in greenhouse drying using the fuzzy logic. *Heat Transfer Research*, 46(10). doi: 10.1615/HeatTransRes.2015007463
- Prakash, O., Laguri, V., Pandey, A., Kumar, A., & Kumar, A. (2016). Review on various modelling techniques for the solar dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 396-417. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.028
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (1997). *Numerical recipes in C. The art of scientific computing*. Retrieved from https://www2.units.it/jpl/students_area/imm2/files/Numerical_Recipes.pdf
- Ronoh, E. K., Kanali, C. L., Mailutha, J. T., & Shitanda, D. (2010). Thin layer drying kinetics of amaranth (*Amaranthus cruentus*) grains in a natural convection solar tent dryer. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 10(3). doi: 10.4314/ajfand.v10i3.54080
- Sacilik, K., Keskin, R., & Elicin, A. K. (2006). Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of food Engineering*, 73(3), 231-238. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.01.025
- Sahdev, R. K. (2014). Open sun and greenhouse drying of agricultural and food products. A review. *International Journal of Engineering*, 3(3). 1053-1066. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Ravinder_Sahdev/publication/305082489_Open_Sun_and_Greenhouse_Drying_of_Agricultural_and_Food_Products_A_Review/links/5794c30508aed51475ceff34.pdf
- Somsila, P., & Teeboonma, U. (2014). Investigation of temperature and air flow inside Para rubber greenhouse solar dryer incline roof type by using CFD technique. *Advanced Materials Research*, 931-932. 1238-1242. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1238
- Tiwari, G. N., Kumar, S., & Prakash, O. (2004). Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 63(2), 219-227. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2003.07.003
- Tiwari, S., Tripathi, R., & Tiwari, G. N. (2016). Thermal Analysis of Photovoltaic Integrated Greenhouse Solar Dryer. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 10(1), 81-85. Retrieved from <http://www.waset.org/publications/10003509>
- Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 413-425. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001

- van Straten, G. (2008). What can systems and control theory do for agricultural science?. *Automatika: Časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, 49(3-4), 105-117. Retrieved from http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=46123
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Retrieved from <https://ekaoktariyantongroho.files.wordpress.com/2008/04/an-introduction-to-computational-fluid-dynamics-versteeg.pdf>
- Vijayavenkataraman, S., Iniyan, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652-2670. doi: 10.1016/j.rser.2012.01.007
- Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457-465. doi: 10.1016/S0360-5442(01)00018-4