UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA

JOSÉ FRANCISCO MARÍN CAMACHO





30 de Noviembre de 2020, Chapingo, Estado de México, México



MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

Tesis realizada por José Francisco Marín Camacho bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

> DOCTOR EN INGENÍERIA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Dr. Irineo L. López Cruz

DIRECTOR:

ASESOR:

ASESOR:

Dr. Agustín Ruíz García

Dr. Salvador Valle Guadarrama

LECTOR EXTERNO:

Dra. Anabel López Ortiz

CONTENIDO

1	LISTA DE CUADROS6					
2	LISTA DE FIGURAS					
RESL	RESUMEN12					
ABST	ABSTRACT					
1	INTRODUCCIÓN GENERAL1					
1.1	1 Objetivo General4					
1.2 Objetivos Particulares4						
1.3 Estructura de la tesis4						
2 REVISIÓN DE LITERATURA						
2.1	2.1 Antecedentes5					
2.2 Clasificación de secadores6						
2.2.1	Inc	cidencia de radiación solar sobre el producto	6			
	2.2.1.1	Secadores solares tipo directo	6			
	2.2.1.2	Secadores solares tipo indirecto	6			
	2.2.1.3	Secadores solares tipo mixto	7			
2.2.2 Movimiento del aire caliente						
	2.2.2.1	Secadores solares pasivos	7			
	2.2.2.2	Secadores solares activos	7			
2.3	2.3 Tipos de modelos en secadores solares		8			
2.3.1	Importancia de los modelos8					
2.3.2	Modelos Empíricos8					

2.3.3	Modelos Físicos o mecanicistas10			
3 Deshidratado de jitomate (Solanum lycopersicum) y guayaba (Psidium guajava) en un secador solar tipo invernadero				
3.1	Resumen13			
3.2	Introducción14			
3.3	Materiales y métodos16			
3.3.1	Descripción del sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI)16			
3.3.2	Descripción de experimentos y toma de mediciones17			
3.3.3	Ajuste de los modelos de capa delgada18			
3.4	Resultados y discusión20			
3.4.1	Perfil de temperatura y radiación solar a través del secador20			
3.4.2	Razón de humedad y contenido de humedad sobre el tiempo24			
3.4.3	Modelado de cinética de secado25			
3.5	Conclusiones			
3.6	Agradecimientos32			
4 Modelo ARX y ARMAX para predecir la temperatura del aire de un deshidratador solar tipo invernadero				
4.1	Resumen			
4.2	Introducción			
4.3	Materiales y métodos36			
4.3.1	Descripción del sistema secador solar tipo invernadero			
4.3.2	Descripción de los experimentos37			
4.3.3	Modelos ARX y ARMAX e identificación del sistema			

4.3.4 Selección de los subconjuntos de datos para estimar y evaluar los					
modelos ARX y ARMAX41					
4.4 Resultados y discusión41					
4.5 Conclusiones					
5 MODELO DINÁMICO DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO PARA EL SECADO DE TOMATE (Solanum lycopersicum)					
5.2 Introducción					
5.3 Materiales y Métodos52					
5.3.1 Estructura del modelo matemático52					
5.3.1.1 Balance de energía en estado no estacionario52					
5.3.1.2 Balance de materia en el producto61					
5.3.2 Descripción del sistema secador solar tipo invernadero y					
experimento de secado63					
5.3.3 Simulación o solución numérica del modelo dinámico66					
5.3.4 Proceso de evaluación					
5.4 Resultados y discusión67					
5.4.1 Resultados experimentales					
5.4.2 Resultados de la simulación70					
5.5 Conclusiones74					
6 LITERATURA CITADA					

1.-LISTA DE CUADROS

CUADRO 3-1 MODELOS DE CAPA DELGADA PARA EL CÁLCULO DE MR18	3
Cuadro 3-2 P arámetros estimados y estadísticas de ajuste de los modelos de capa delgada	
PARA JITOMATE	5
Cuadro 3-3 Parámetros estimados y estadísticas de ajuste de los modelos de capa delgada	
PARA GUAYABA	7
CUADRO 4-1MEJORES MODELOS ARX 50% 50%42	2
CUADRO 4-3MEJORES MODELOS ARX 60% 40%42	2
CUADRO 4-4MEJORES MODELOS ARX 70% 30%42	2
Cuadro 4-5mejores modelos ARX 80% 20%42	2
CUADRO 4-6MEJORES MODELOS ARX 90% 10%4	3

2.-LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1 EL PROCESO DE MODELADO MODIFICADO DE VOINOV, 2008
FIGURA 3-1 SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO
Figura 3-2 Temperatura y radiación solar durante los experimentos de deshidratado de guayaba
FIGURA 3-3 HUMEDAD RELATIVA DURANTE LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN DE GUAYABA22
Figura 3-4 Temperatura y radiación solar durante los experimentos de deshidratado de jitomate
FIGURA 3-5 HUMEDAD RELATIVA DURANTE LOS EXPERIMENTOS DE DESHIDRATACIÓN DE JITOMATE24
Figura 3-6 Variación del contenido de humedad en el tiempo de secado de guayaba (a) y jitomate
(в)25
Figura 3-7 Modelos de capa delgada para predecir la razón de humedad en rebanadas de jitomate
Figura 3-8 Razón de humedad medida y predicha por el modelo Harris y Pabis modificado en
REBANADAS DE JITOMATE
Figura 3-9 Modelos de capa delgada para predecir la razón de humedad en rebanadas de guayaba
Figura 3-10 Razón de humedad medida y predicha por el modelo Harris y Pabis modificado en
REBANADAS DE GUAYABA
FIGURA 4-1 SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO DE FORMA PARABÓLICA EN CHAPINGO, MÉXICO36
Figura 4-2 Variables de entrada para los modelos ARX y ARMAX de un secador solar tipo
INVERNADERO MEDIDAS DURANTE EL 15 AL 22 DE DICIEMBRE DE 2019
FIGURA 4-3 SIMULATED RESPONSE COMPARISON
FIGURA 4-4 ONE STEP PREDICTED RESPONSE COMPARISON
FIGURA 4-5 THIRTY STEP PREDICTED RESPONSE COMPARISON
FIGURA 4-6 FUNCIÓN DE CORRELACIÓN ENTRE LAS ENTRADAS Y SALIDA DEL MODELO ARX
FIGURA 4-7 FUNCIÓN DE CORRELACIÓN ENTRE LAS ENTRADAS Y SALIDA DEL MODELO ARMAX

FIGURA 5-1 ESQUEMA DEL SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO CONSTRUIDO EN LA UNIVERSIDAD				
Autónoma Chapingo64				
FIGURA 5-2 EXPERIMENTO DE DESHIDRATADO CON REBANADAS DE TOMATE EN EL SECADOR SOLAR TIPO				
INVERNADERO65				
FIGURA 5-3 RADIACIÓN SOLAR DURANTE EL EXPERIMENTO				
Figura 5-4 Comparación de temperatura dentro y fuera del secador durante el experimento de				
SECADO				
Figura 5-5 Humedad Relativa dentro y fuera del secador69				
FIGURA 5-6 VELOCIDAD DEL AIRE DENTRO Y FUERA DEL SECADOR				
Figura 5-7 Variación del contenido de humedad de las muestras de tomate deshidratado en el				
SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO70				
Figura 5-8 comparación entre la temperatura de la cubierta del secador simulada y observada				
DURANTE EL DESHIDRATADO DE TOMATE71				
Figura 5-9 comparación entre la temperatura del aire dentro del secador simulada y observada				
DURANTE EL DESHIDRATADO DE TOMATE71				
FIGURA 5-10 COMPARACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA DEL PISO DEL SECADOR SIMULADA Y OBSERVADA DURANTE				
EL DESHIDRATADO DE TOMATE72				
FIGURA 5-11 TEMPERATURA DEL TOMATE SIMULADA DURANTE EL DESHIDRATADO DE TOMATE72				
Figura 5-12 Comparación del comportamiento de la masa del tomate simulada y observada				
DURANTE EL DESHIDRATADO DE TOMATE				
Figura 5-13 comparación entre el contenido de humedad del tomate simulada y observada				
DURANTE EL DESHIDRATADO DE TOMATE73				

DATOS BIOGRÁFICOS

José Francisco Marín Camacho nace en Martínez de la Torre, Veracruz, el 12 de febrero de 1988. En el año 2003 ingresa a la preparatoria en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. Para el año 2006 inicia sus estudios en Ingeniería Mecánica Agrícola, mismos que concluyeron en el año 2010. En ese mismo año empieza a trabajar en el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas al Agua, como asesor técnico de las asociaciones civiles de usuarios de los distritos de temporal tecnificado 026,008 y 024, ubicadas en la península de Yucatán. En 2013 ingresa a la maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, estudiando la orientación de Biosistemas, con el tema de investigación Máquina micro perforadora de polipropileno para atmósferas modificadas, en 2016 ingresa al doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, estudiando la orientación de Biosistemas, con el tema de investigación Modelación matemática de un secador solar tipo invernadero, derivado de la investigación realizaron tres ponencias, una ponencia en el Primer encuentro nacional de secado y cocción solar de alimentos, otra en el congreso internacional EuroDrying 2019 7 th European Drying Conference y la otra en el congreso internacional "ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) Annual International Meeting 2018" y se escribieron tres artículos para revistas.

DEDICATORIAS

A mi esposa que me acompaño en todo este camino

a mis padres

a mi hermana

a mi hermano

a mis compañeros

a todos mis amigos

y personas queridas a los cuales guardaré siempre mi eterna gratitud.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo que me ha dado tanto y me convirtió en lo que soy, siempre estaré eternamente agradecido.

Al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua que me brindo la oportunidad de ampliar y mejorar mis conocimientos profesionales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento que me otorgaron a través de la beca de estudios de posgrado.

Al Dr. Irineo L. López Cruz. por su dirección, apoyo, revisión y acertados consejos para la realización de esta investigación.

Al Dr. Salvador Valle Guadarrama por su apoyo, asesoría, entusiasmo y compromiso para llevar a cabo esta investigación, le agradezco además sus consejos, ayuda y amistad brindada.

Al Dr. Agustín Ruiz García por su participación y apoyo en este trabajo.

A la Dra. Anabel López Ortiz por su ayuda y contribuciones valiosas para la realización de este documento.

A Mayra por su guía y ayuda estos años en el posgrado.

Y a todos los que de manera indirecta contribuyeron para concluir con éxito este trabajo.

GRACIAS

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

Autor: José Francisco Marín Camacho Director: Irineo Lorenzo López Cruz **RESUMEN**

En México se desperdician, cada año, alrededor de 10 mil toneladas de alimentos (verduras y frutas), equivalente al 37% de la producción de acuerdo con estudios de la FAO. El deshidratado puede contribuir a reducir este problema ya que permite aumentar la vida postcosecha de los productos agrícolas. El objetivo de esta investigación fue generar y analizar modelos matemáticos del comportamiento de un secador solar tipo invernadero. Se llevaron a cabo experimentos de secado de tomate (Solanum lycopersicum L) y guayaba (Psidium quajava) que se utilizaron para evaluar modelos de capa fina: se generaron modelos ARX y ARMAX para predecir la temperatura dentro del secador y se desarrolló un modelo dinámico mecanicista que predice el comportamiento del secador solar durante el proceso de secado de frutos de tomate. El sistema de secado solar parabólico tipo invernadero permite condiciones adecuadas para el secado de rodajas de tomate y guayaba, ya que reduce el contenido de humedad al 20% en base húmeda en tomate y al 8% en el caso de guayaba. Con un tiempo de secado de 8 horas para ambos productos. El mejor modelo fue el Henderson y Pabis Modificado para ambos productos, con una eficiencia de modelado de 0.995 v 0.997. respectivamente. Las variables de estado predichas por el modelo mecanicista coincidieron razonablemente con los datos experimentales medidos, ya que el valor del error cuadrático medio de la predicción fue 9.02% para la temperatura de la cubierta. 6.26% para la temperatura del aire, 6.13% para la temperatura del piso y 6.00% para el contenido de humedad de tomate. Dado que los modelos dinámicos ARX y ARMAX mostraron un ajuste mayor del 85% con los datos del conjunto de evaluación; son una excelente opción para diseñar sistemas de control para el ambiente del sistema secador solar tipo invernadero.

Palabras clave: modelos dinámicos, SSSTI, ARX, ARMAX, modelos de capa delgada.

MATHEMATICAL MODELING OF A GREENHOUSE-TYPE SOLAR DRYER

Author: José Francisco Marín Camacho Advisor: Irineo Lorenzo López Cruz **ABSTRACT**

In Mexico, about 10,000 tons of food (vegetables and fruits) are wasted yearly, which is equivalent to 37% of the production according to FAO studies. Dehydration can contribute to bring down this problem as increases postharvest life of agricultural products. The objective of this research was to generate and analyze mathematical models of the behavior of the greenhouse-type solar drver, Tomato (Solanum lycopersicum L) and guava (Psidium guajava) drying experiments were carried out to evaluate thin laver models. ARX and ARMAX models were identified to predict the temperature inside the dryer and a mechanistic dynamic model that predicts the behavior of the solar dryer during the tomato drying process was developed. The greenhouse-type parabolic solar drying system allows suitable conditions for drving tomato and guava slices, as it reduces the moisture content of tomato slices to 20% on a wet basis and 8% in case of guava slices. The drying time was 8 hours for both products. The best thin-laver model was the Henderson and Pabis Modified for both studies with a modeling efficiency of 0.995 and 0.997, respectively. The state variables predicted by the mechanistic model reasonably fitted the measured experimental data, as the value of the mean square error of the prediction was 9.02% in case of the temperature of the dryer cover, 6.26% for air temperature inside the dryer, 6.13% for dryer floor temperature, and 6.00% for moisture content of tomato. Since ARX and ARMAX dynamic models showed a greater than 85% fit with the evaluation dataset, they are an excellent option to design control strategies to the environment of a greenhouse-type solar dryer system.

Keywords: dynamic models, GTSDS, ARX, ARMAX, thin layer models.

1.-INTRODUCCIÓN GENERAL

En la actualidad, en el mundo, se utilizan aproximadamente 4.1 X 10²⁰ J/año de energía para satisfacer las necesidades de consumo humano, la cual es abastecida principalmente a partir de energía fósil. Esto hace evidente la necesidad de hacer uso de las fuentes de energía alternas, de entre la cuales, la principal fuente de energía limpia a la que se tiene acceso es la energía solar, ya que ésta genera 120 000 TW de radiación sobre la superficie de la Tierra; cantidad muy por encima de las necesidades humanas (Nault, 2005).

La radiación solar se distribuye de manera desigual en todo el mundo. Ésta varía en intensidad desde una ubicación geográfica a otra dependiendo de la latitud, estación, y hora del día. El territorio total de México se encuentra entre las latitudes 14° y 33° N y las longitudes 86° y 119° W, por lo que es uno de los 66 países que están 100% dentro del cinturón solar y de los 5 con mayor potencial. De esta manera, la radiación diaria en el país oscila entre los 4.4 kWhm⁻² y 6.3 kWhm⁻² lo cual ayuda a que la implementación de tecnologías que funcionan a base de energía solar sea altamente factible (Romero-Hernández, S., Rodríguez-Granada, B. D., Romero-Hernández, O., Wood, 2012).

En México el problema de la pérdida y desperdicio de alimentos durante el almacenamiento, transporte, comercialización y distribución se ha tratado minimizar mediante el programa cruzada nacional sin hambre promovido por el gobierno mexicano en el año 2013. El índice de desperdicio de alimentos en México es del 37.26 %, con el cual se podrían alimentar a 7.4 millones de personas en pobreza extrema e inseguridad alimentaria. Esto con una despensa semanal de 16 litros de leche, 2.6 kg de cebolla, 3.6 kg de papa, 4.2 kg de carne de res y 3.5 kg de carne de cerdo. Los productos agrícolas que tienen más desperdicio en México son la Guayaba 57.73 %, leche de vaca 57.14 %, Mango 54.07 %, Aguacate 53.97 %, Plátano verde y tabasco 53.26 %, Nopal 53.26 %, Arroz 46.87 % y Pepino con un 45.46 % (FAO, 2015b).

El uso de la energía solar en México para el deshidratado de productos agrícolas ha cobrado mayor importancia debido a que existen productos como frutas y verduras que si no se comercializan inmediatamente después de su cosecha, representan pérdidas para los productores, lo cual se traduce en un menor ingreso económico. Una alternativa a este problema es conservar productos agrícolas mediante su deshidratación para incrementar vida postcosecha y prolongar el tiempo en el que pueden ser comercializados. Otra razón del aumento del uso de la energía solar para el secado de productos agrícolas son las ventajas que se obtienen, tales como la facilidad de transporte y almacenamiento de dichos productos, o bien, para el caso de los granos la inducción de la inhibición de la germinación. Además, se debe tomar en cuenta que en productos agrícolas como granos de café y flor de Jamaica requieren forzosamente deshidratación en postcosecha para poder realizar su comercialización. Sin embargo, la calidad del secado es muy deficiente ya que generalmente es llevado al sol o a la intemperie (Castañeda Miranda, González Parada, Guzmán Cabrera, & Ibarra Manzano, 2012; Hernández et al., 2010).

Los sistemas de secado mediante energía solar (secadores solares) pueden ser considerados como un avance de secado solar natural y es una técnica eficiente de la utilización de la energía solar (Bala, 1998). Por esto se han desarrollado varios tipos de secadores solares (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010).

Aun cuando en la literatura se encuentran varios estudios de deshidratado en sistema de secado solar tipo invernadero (Sethi & Arora, 2009), existen pocos estudios de modelado matemático de estos sistemas (Jain & Tiwari, 2004).

La mayoría de los secadores solares han sido desarrollados para usos domésticos o aplicaciones comerciales a pequeña escala. Sin embargo, en algunas aplicaciones agroindustriales en el sudeste de Asia, se requiere de sistemas de secado de escala industrial. Como, por ejemplo, un secador solar tipo invernadero a gran escala con una capacidad de carga de 1000 kg de frutas o verduras frescas. Por lo que en estos países se ha diseñado y desarrollado un

sistema de secado solar tipo invernadero para productos como chile, plátano y café en las condiciones climáticas tropicales de Laos y Tailandia y se ha propuesto un modelo matemático dinámico para simular tanto el ambiente como el p*roceso de* secado de estos productos. (Serm Janjai, Intawee, Kaewkiew, Sritus, & Khamvongsa, 2011).

En general, de acuerdo con la revisión de literatura (Garduño-García et al., 2017) tanto en sistemas de secado solar como para el sistema secador solar tipo invernadero, en particular, existe la necesidad de generar conocimiento del comportamiento de estos sistemas mediante la generación de modelos matemáticos dinámicos.

Por lo anterior, en la presente investigación se aplica

el procedimiento general para modelación de sistemas que propone la Teoría de Sistemas Dinámicos (L. Ljung & Glad, 1994) para la generación de modelos matemáticos dinámicos del sistema secador solar tipo invernadero. El procedimiento de modelación de sistemas incluye las siguientes etapas: la obtención del conjunto de ecuaciones dinámicas, análisis de incertidumbre, análisis de sensibilidad, desarrollo de experimentos, identificación del sistema, estimación de parámetros (calibración), evaluación (validación) y análisis de incertidumbre (Figura 1-1).



Figura 1-1.- el proceso de modelado modificado de Voinov, 2008.

1.1 Objetivo General

Generar y analizar modelos matemáticos del comportamiento del sistema secador solar tipo invernadero

1.2 Objetivos Particulares

- Evaluar diferentes modelos de capa delgada para predecir el comportamiento de varios productos hortofrutícolas dentro del secador solar tipo invernadero.
- Identificar un modelo ARX y ARMAX para predecir la temperatura del secador solar tipo invernadero, para diseñar estrategias de control del ambiente de este sistema.
- Desarrollar un modelo dinámico mecanicista para predecir el comportamiento de la temperatura del ambiente del secador solar tipo invernadero y la humedad del producto que se está deshidratando.

1.3 Estructura de la tesis

La tesis se compone de cinco capítulos en los cuales se abordan las aportaciones de este trabajo. En el capítulo dos se realizó una revisión del estado del arte de los secadores solares y su modelación matemática. En el capítulo tres se presentan resultados de experimentos de deshidratado de jitomate y guayaba que se llevaron a cabo en el secador solar tipo invernadero con los cuales se recabaron datos de las cinéticas de secado de estos productos. Estos datos experimentales permitieron realizar un ajuste de modelos de capa delgada. En el capítulo cuatro se presenta el proceso de generación de modelos dinámicos ARX y ARMAX para la temperatura del aire dentro del secador solar tipo invernadero. Finalmente, en el capítulo cinco se presenta el desarrollo de un modelo dinámico mecanicista que predice el comportamiento de la temperatura del ambiente del secador tipo invernadero y la temperatura y contenido de humedad del producto que se está deshidratando. El modelo matemático es evaluado con datos del deshidratado de jitomate.

2.-REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes

La demanda de productos agrícolas deshidratados tales como verduras, frutas, especias, y plantas medicinales está creciendo a nivel nacional y mundial. La remoción de humedad reduce la acción de las enzimas, bacterias, levaduras y mohos preservando y mejorando la calidad de productos agrícolas. El secado mediante energía solar es amigable con el ambiente (Bala & Janjai, 2013; S. Janjai & Bala, 2012).

El secado o deshidratado es el proceso mediante se elimina el agua del producto debido a la transferencia de calor y masa en forma simultánea (El-Sebaii & Shalaby, 2012; S. Janjai & Bala, 2012). Mediante este proceso se reduce el peso del producto y tamaño, lo cual facilita su transporte y almacenamiento, prolongando también su vida de anaquel (C. Ertekin & Yaldiz, 2004). Otras ventajas del secado solar son el uso de fuentes de energía alternas y en consecuencia la disminución de costos de operación.

En el proceso de secado existen dos etapas. La primera ocurre cuando en la superficie del material se encuentra saturada de agua lo cual permite una velocidad de secado constante y es similar a la evaporización. La segunda etapa se lleva a cabo con una velocidad de secado decreciente debido a la poca disponibilidad de agua que se encuentra en el producto. La condición de la segunda etapa depende de la estructura interna del material que se está deshidratando (Can, 2000).

El secado al sol es el método más comúnmente utilizado para preservar productos agrícolas debido a su bajo costo. El problema es que se generan graves pérdidas en la cantidad y calidad del producto debido a la contaminación por suciedad, el polvo y la infestación por insectos, roedores y otros animales. Por lo tanto, la introducción de la tecnología de secadores solares puede reducir las pérdidas de los productos y mejorar la calidad en comparación con métodos tradicionales de secado al sol (Yaldiz, Can, & Uzun, 2001).

2.2 Clasificación de secadores

Los secadores solares se pueden clasificar dependiendo de diferentes factores, se pueden clasificar dependiendo su forma de calentar el aire, su diseño, el material con el que están construidos, si cuentan con sistemas de respaldo de energía o no.

2.2.1 Incidencia de radiación solar sobre el producto

Basados en la incidencia los secadores solares se pueden clasificar en directos, indirectos y mixtos (Akamphon, Sukkasi, & Sedchaicharn, 2018).

2.2.1.1 Secadores solares tipo directo

Este tipo de secadores son una mejora a la forma tradicional de deshidratar a sol abierto, donde el material que se está deshidratando se coloca en un secador el cual está cubierto de una cubierta transparente como plástico, vidrio o policarbonato (Ameri, Hanini, Benhamou, & Chibane, 2018), esto permite el paso de los rayos solares los cuales calientan el producto y las partes solidas dentro del secador, las cuales emiten radiación que no puede salir por la cubierta transparente, provocando un aumento de temperatura al interior del sistema. La desventaja es que los productos deshidratados en secadores solares de tipo directo sufren una importante pérdida de calidad (Kumar, Sansaniwal, & Khatak, 2016).

2.2.1.2 Secadores solares tipo indirecto

Los secadores indirectos son una contra propuesta a los secadores de tipo directo, con la finalidad de que la radiación solar no se encuentre en contacto directo del producto que se está deshidratando para preservar la calidad. Estos sistemas cuentan con un gabinete opaco donde se coloca el producto a deshidratar que no deja pasar la radiación solar, cuentan con un colector solar en el cual se calienta el aire para después hacerlo pasar a la cámara de deshidratado (Dhanushkodi, Wilson, & Sudhakar, 2014).

2.2.1.3 Secadores solares tipo mixto

Los secadores solares mixto, como su nombre lo indica, es una combinación de los secadores directos e indirectos. Este tipo de secadores cuentan con la cámara de deshidratado con una cubierta transparente que deja pasar la radiación solar al producto, y cuenta con un colector solar que calienta el aire y después se hace pasar por la cámara de deshidratado (Dhalsamant, Tripathy, & Shrivastava, 2018).

2.2.2 Movimiento del aire caliente

Los secadores solares se pueden clasificar de acuerdo con el movimiento del aire en su interior , los cuales pueden ser pasivos o activos

2.2.2.1 Secadores solares pasivos

En los secadores solares pasivos la circulación del aire se produce por fuerza de flotabilidad o debido a diferencias de presión o por una combinación de ambas. La mayoría de los secadores de gabinete e invernadero funcionan en modo pasivo (Khadraoui, Hamdi, Kooli, & Guizani, 2019), estos secadores cuentan con orificios que sirven de entrada de aire y en el lado opuesto se coloca otro orificio o salida de aire caliente conocido como chimenea. La desventaja de este tipo de sistemas es que existe la posibilidad de sobrecalentamiento del aire y por consecuencia se vea mermada la calidad de los productos que se están deshidratando. Este tipo de secadores pueden tener una eficiencia de secado del 20 al 40 % (Udomkun et al., 2020).

2.2.2.2 Secadores solares activos

Un secador solar se considera activo cuando el movimiento del aire se obtiene de manera artificial, ya sea por el uso de ventiladores o bombas. Existen estudios donde se analizan los secadores solares que se usan de manera activa con ayuda de paneles fotovoltaicos (S. Janjai et al., 2009).

2.3 Tipos de modelos en secadores solares

2.3.1 Importancia de los modelos

El sistema de secado solar debe ser muy específico para satisfacer los requerimientos de un producto específico y presentar su desempeño óptimo. Sin embargo, para poder llevar a cabo los experimentos a gran escala con diferentes productos y diseño de secadores (dimensiones, materiales, microclima) estos sistemas resultan muy costosos e imprácticos (Bala & Woods, 1995). Por esto, el desarrollo de modelos matemáticos dinámicos y simulación computarizada es una herramienta de gran valor para pronosticar cómo será el comportamiento de un sistema de secado solar. Los modelos matemáticos de los secadores solares se ocupan para poder incrementar el conocimiento del sistema, para diseñar el sistema, para controlar el sistema y para optimizar el desempeño del sistema. Si bien los modelos contribuyen para la optimización en el diseño de secadores, también se utilizan para la operación, control de calidad del producto que se está deshidratando y el uso eficiente de la energía (Prakash, Kumar, & Laguri, 2016).

En esta investigación se aplicaron dos enfoques para modelar matemáticamente el sistema secador solar tipo invernadero: modelos físicos y modelos empíricos.

2.3.2 Modelos Empíricos

Los modelos empíricos permiten resumir datos y relacionar variables de entrada y salida de un sistema por lo que su obtención es relativamente más rápida que los modelos físicos. Las redes neuronales artificiales (ANN) son un ejemplo de modelos empíricos o de caja negra, los cuales han sido empleados para predecir el comportamiento de los secadores especialmente para variables complejas como la humedad y contenido de humedad en los productos. Estas requieren de una gran cantidad de datos y mucho tiempo para su entrenamiento (Serm Janjai, Jagrapan Piwsaoad, Wanich Nilnont, & Prasan Pankaew, 2015).

Las redes neuronales estáticas han sido usadas para describir el comportamiento de la humedad en secadores solares (Bala, Ashraf, Uddin, & Janjai, 2005). Pero

si desea optimizar y controlar un secador solar, las redes neuronales dinámicas son una alternativa con mayores ventajas cuyo uso debe explorarse y explotarse. Los sistemas de lógica difusa son una opción que poco se ha usado, hasta la fecha, para la modelación de secadores solares. Sin embargo, recientemente se ha reportado el uso de modelos que combinan las ventajas de estos con redes neuronales artificiales, los llamados modelos neuro-difusos (Prakash & Kumar, 2014).

Los modelos matemáticos se requieren para diseñar diferentes algoritmos de control para un secador solar y usar diferentes enfoques de la Teoría de Sistemas y Control para obtener el desempeño que se desea en los secadores, para aumentar la calidad de los productos. Se ha aplicado la teoría de control óptimo para mejorar el desempeño de un secador solar (Gallestey & Paice, 1997). Se ha diseñado un controlador basado en Lógica difusa que es capaz de lidiar con las dificultades encontradas en el control de secadores (Vásquez, Reyes, Mahn, & Cubillos, 2016). Diferentes enfoques de control que se han usado en el ambiente invernadero se pueden utilizar en el control del microclima de los secadores solares (López-cruz et al., 2014; Van Straten & Van Henten, 2010).

Se han utilizado modelos de lógica difusa que predicen la tasa de evaporación de la azúcar de palmera en un secador con ambiente controlado (Prakash & Kumar, 2014) y modelos de redes neuronales de varias capas para predecir el deshidratado de las láminas de caucho en un secador solar tipo invernadero (Serm Janjai et al., 2015).

El secado de capa fina significa secar como una capa de partículas o rodajas. Existen modelos de secado de capa fina que describen el fenómeno de secado de los materiales agrícolas (Ebru Kavak Akpinar, 2006) como lo son las ciruelas, jitomate, zanahoria, ejote, cacahuate, pimiento verde, guayaba, banana, mango, manzana y papaya (E. Kavak Akpinar & Bicer, 2008; Doymaz, Kipcak, & Piskin, 2015; Hussein, Filli, & Oke, 2016; Koua, Fassinou, Gbaha, & Toure, 2009; N. Kumar, Sarkar, & Sharma, 2012; Menges & Ertekin, 2006a, 2006c; Mocelin et al., 2014; Shiva, B, & M, 2015; Wang, Sun, Chen, Liao, & Hu, 2007). Los modelos ARX y ARMAX se han utilizado en diversas investigaciones como modelos de caja negra para el calcular la corriente de salida en relación a su flujo de hidrogeno como entrada en las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) (P. A. Kumar, Geetha, Chandran, & Sanjeevikumar, 2018), para el secado de madera (Zhou, Zhang, Huai, & Huang, 2019), germinación de arroz (Zhou, Fu, & Liang, 2019), sistemas poblacionales (Batista, Djermoune, & Bastogne, 2017), temperatura de invernaderos (Frausto, Pieters, & Deltour, 2003; López-Cruz, Rojano-aguilar, Ojeda-bustamante, & Salazar-Moreno, 2007; Patil, Tantau, & Salokhe, 2008), transpiración de cultivos en invernaderos (Sánchez, Rodríguez, Guzmán, Ruiz Arahal, & Fernández, 2011), distribución de temperatura en paredes (Naveros, Ghiaus, Ruíz, & Castaño, 2015) y control de inventario (Rachad, Nsiri, & Bensassi, 2015), pero no en el enfoque de predecir las condiciones de un secador solar con respecto a las variables climatológicas.

2.3.3 Modelos Físicos o mecanicistas

Los modelos físicos también llamados teóricos, tienen su base en fenómenos de transporte de energía y masa que se llevan a cabo durante el proceso de secado. Para obtener un modelo dinámico representado por un conjunto de ecuaciones diferenciales, es posible mediante balances de energía en estado no estacionario de los componentes del secador como lo son el aire dentro del secador, la cubierta, el piso del secador, la temperatura y contenido de humedad del producto. Esto es así ya que se desea dar cuenta del cambio temporal de la variable temperatura (Garduño-García, López-Cruz, & Ruiz-García, 2017). En forma similar se puede llevar a cabo un balance de masa para dar cuenta del comportamiento de la humedad del aire dentro del secador. Las cinéticas de secado de un producto se pueden modelar usando propiedades de transporte de masa juntamente con las del aire dentro del secador. En el caso de secado de transporte y es definida mediante la ecuación de capa fina (Togrul & Pehlivan,

2004). Por esto las propiedades del producto son consideradas mediante la ecuación de secado de capa fina obtenida mediante modelos matemáticos empíricos y experimentación tanto en secadores a pequeña como mediana y gran escala (Bagheri, Arabhosseini, Kianmehr, & Chegini, 2013; Faal, Tavakoli, & Ghobadian, 2015).

Dado que el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales resultante es altamente no lineal su solución es necesariamente numérica. Varios autores han utilizado el método de diferencias finitas para su solución (S. Janjai et al., 2009, 2008; Serm Janjai et al., 2011). Sin embargo, es posible usar otros métodos numéricos de solución como colocación ortogonal, elementos finitos y en general la Dinámica de Fluidos Computacional. También es posible generar diferentes modelos del sistema. Por ejemplo, se puede obtener una primera aproximación del comportamiento del sistema secador solar utilizando exclusivamente ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, como se ha modelado el microclima del invernadero para producción de cultivos (Singh, Pal, Pal, Lubana, & Singh, 2006; Vanthoor, Stanghellini, Henten, & Visser, 2011).

Los modelos matemáticos dinámicos propuestos para secadores solares no han sido sujetos a un análisis de incertidumbre, análisis de sensibilidad, estimación de parámetros, análisis de incertidumbre y evaluación. No se ha explorado en qué medida la calidad predictiva de un modelo matemático dinámico del proceso de secado de productos agrícolas, estas predicciones podrían ser mejoradas usando métodos de asimilación de datos como por ejemplo los filtros de Kalman no lineales.

Se ha implementado un sistema de ecuaciones diferenciales parciales para describir el comportamiento de la humedad y la transferencia de calor en el secado de nuez de macadamia en un secador solar tipo invernadero (S. Janjai, Phusampao, Nilnont, & Pankaew, 2014), el proceso de secado de pimiento rojo (Fadhel, Kooli, Farhat, & Belghith, 2014) y un modelo teórico térmico de un secador tipo invernadero con sistema fotovoltaico (Tiwari & Tiwari, 2016).

Los modelos matemáticos dinámicos son necesarios para optimizar y diseñar secadores solares en forma más eficiente. Se han usado modelos matemáticos físicos juntamente con un modelo económico para optimizar la geometría y parámetros operacionales de un secador solar para frutos de plátano (Smitabhindu, Janjai, & Chankong, 2008). Otros autores usaron un modelo matemático y uno económico para calcular las dimensiones óptimas de un colector solar y la unidad de secado para chiles (Hossain, Woods, & Bala, 2005). También se usaron modelos matemáticos teóricos y numéricos para proponer un nuevo diseño de secador solar para frutas y verduras (Sámano-Delgado et al., 2012) así como modelos matemáticos físicos para un secador solar y optimizar sistemas de secador solar basado en convección natural (Bala & Woods, 1995).

3.-Deshidratado de jitomate *(Solanum lycopersicum)* y guayaba *(Psidium guajava)* en un secador solar tipo invernadero

José F. Marín-Camacho

Irineo L. López-Cruz

Salvador Valle-Guadarrama

Agustín Ruíz-García

3.1 Resumen

Introducción: Los modelos de capa delgada se utilizan para predecir la razón de humedad de los productos hortofrutícolas.

Objetivo: investigar la razón de humedad de las rebanadas de jitomate y de guayaba mediante modelos de capa delgada en un secador solar parabólico tipo invernadero.

Metodología: Los datos de contenido de humedad se ajustaron a 13 modelos matemáticos de cinética de secado mediante el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales disponible en la función Isqnonlin.m de la herramienta de optimización de Matlab (Matlab Optimization Toolbox). Se calcularon las estadísticas: error absoluto medio (MAE), la eficiencia del modelado (EF) y el error de la raíz cuadrada de la media (RMSE).

Resultados: en los modelos en la parte de calibración hubo mejor ajuste de las estadísticas que en evaluación, los modelos que mejor se desempeñaron fueron el modelo Henderson y Pabis Modificado, el modelo Henderson y Pabis, Aproximación por difusión, dos términos y dos términos exponencial .

Limitaciones del estudio: los resultados obtenidos solo son válidos para este diseño de secador y espesor del producto de 5 mm.

Originalidad: La cinética de secado de estos productos no se han estudiado en este tipo de secadores.

Conclusiones: los resultados mostraron que el modelo Henderson y Pabis Modificado es el que mejor explica el comportamiento de secado de capa delgada de las rebanadas de guayaba y de jitomate con una eficiencia de modelado de 0.995 y 0.997 respectivamente.

Palabras clave: Capa delgada, modelos matemáticos, secado solar, razón de humedad, cinética de secado

Highlights:

- El jitomate perdió el 94 % de su peso original y la guayaba el 79 %

- El tiempo del proceso de secado es de cinco horas y media y ocho horas para jitomate y guayaba respectivamente

- Se evaluaron 13 modelos de capa fina.

- El secador alcanzó una temperatura máxima de 65 grados Celsius y una mínima de 25 grados.

3.2 Introducción

La producción de jitomate en México creció a una tasa promedio anual de 3.6 % entre 2007 y 2017, alcanzando una producción de 3.47 millones de toneladas anuales .En 2018 el jitomate fue el segundo producto en el sector primario en cuanto al valor de las exportaciones con una participación del 12.8 %, que creció a una tasa promedio anual de 4.7 por ciento. El volumen exportado, de 1.68 millones de toneladas de este producto, fue equivalente al 48.7 % de la producción nacional en 2018 (FIRA, 2019). La producción de guayaba en México contribuye con cinco de cada 100 toneladas a nivel mundial. China destaca como el principal productor de la fruta con una aportación del 40 por ciento. En México son 20 las entidades productoras del fruto; en conjunto destinan una superficie de 22 mil 562 hectáreas. El estado de Michoacán es el principal productor de la año 2017 (SAGARPA, 2014). La demanda de productos agrícolas deshidratados

tales como verduras, frutas, especias, y plantas medicinales está creciendo a nivel nacional y mundial. La remoción de humedad reduce la acción de las enzimas, bacterias, levaduras y mohos, preservando y mejorando la calidad de productos agrícolas. El secado mediante energía solar es amigable con el ambiente (El-Sebaii & Shalaby, 2012; S. Janjai & Bala, 2012). El desperdicio de alimentos el cual en el caso de guayaba es de un 57.73 % (FAO, 2015a).

El secado o deshidratado consiste en el proceso de eliminación de humedad debido a la transferencia de calor y masa en forma simultánea (El-Sebaii & Shalaby, 2012). Tradicionalmente, el secado se puede realizar mediante secado al sol o industrialmente mediante el uso de secadores solares (E. Kavak Akpinar & Bicer, 2008), La característica más importante de los secadores solares es que el producto no incluye ningún tipo de conservantes u otros productos químicos añadidos (Akhijani, Arabhosseini, & Kianmehr, 2016), el secado al sol abierto (OSD) es el método más barato y más común de secado de productos agrícolas, pero involucra muchos desventajas como el deterioro de los productos debido a polvo, suciedad, calentamiento incontrolado, decoloración de productos debido a rayos ultravioletas, animales y microorganismos (Sahdev, Kumar, & Dhingra, 2017).

Los modelos de capa delgada se utilizan para predecir la razón de humedad de los productos hortofrutícolas. Se han aplicado a frutos y verduras como ciruelas, jitomate, zanahoria, ejote, cacahuate, pimiento verde, guayaba, banana, mango, manzana y papaya (E. Kavak Akpinar & Bicer, 2008; Doymaz et al., 2015; Hussein et al., 2016; Koua et al., 2009; N. Kumar et al., 2012; Menges & Ertekin, 2006a, 2006c; Mocelin et al., 2014; Shiva et al., 2015; Wang et al., 2007).

El objetivo del presente trabajo fue modelar la cinética del secado de las rebanadas de jitomate y de guayaba mediante modelos de capa delgada en un secador solar parabólico tipo invernadero con cubierta de policarbonato.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Descripción del sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI)

Los experimentos de secado de las rebanadas de jitomate y de guayaba se llevaron a cabo en un secador tipo invernadero de 108 m2 (9 m de ancho ×12 m de longitud), localizado en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México. Ubicación geográfica 19° 29' N, 98°, 53' O, a una altitud de 2240 m. La orientación (azimut) del secador es 45° E con respecto al eje Norte-Sur, tiene una cubierta de doble capa de policarbonato de 6 mm de espesor (Figura 3-1) con tratamiento contra rayos ultravioleta, cuenta con 18 mesas de 1.8 m x 2 m y cada mesa con la capacidad de 6 charolas de 1.8 m x 1m, con dos charolas por nivel y piso de concreto.



Figura 3-1 Secador solar tipo invernadero

EL sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI) tiene un gran potencial, ya que puede ser usado a escala industrial debido a su capacidad de procesamiento. La radiación solar incide en la cubierta y la parte que logra traspasar calienta el aire, los productos y el piso de concreto. El aire caliente que se mueve alrededor y a través del producto, lo cual ayuda para absorber su humedad (Garduño-García et al., 2017).

3.3.2 Descripción de experimentos y toma de mediciones

Se realizaron dos experimentos de secado de jitomate, los días 6 y 7 durante el mes de diciembre de 2019, con 90 kilogramos cada uno. Se usaron frutos de jitomates frescos, los cuales fueron lavados y desinfectados, posteriormente fueron rebanados con un espesor de 5 milímetros mediante una rebanadora de disco y acomodados en 36 charolas de secado de 1 m x 1.8 m para su ingreso al secador. Las rebanadas de jitomate se colocaron en el mismo nivel en todas las mesas de secado a una altura de 1.5 m sobre el nivel del piso. Los experimentos iniciaron a las 10:00 am, y terminaron a las 17:00 pm. Se realizaron dos experimentos de secado de guayaba, el 8 y 9 de diciembre de 2019, con 150 kilogramos cada uno. Los frutos de guayaba fueron rebanados con un espesor de 5 milímetros con una rebanadora y acomodados en 36 charolas de secado de 1 m x 1.8 m para su ingreso al secador. Las rebanadas de secado de 1 m x 1.8 m para secado de 1 m x 1.8 m para secado de 1 m x 1.8 m para secado de guayaba, el 8 y 9 de diciembre de 2019, con 150 kilogramos cada uno. Los frutos de guayaba fueron rebanados con un espesor de 5 milímetros con una rebanadora y acomodados en 36 charolas de secado de 1 m x 1.8 m para su ingreso al secador. Las rebanadas de guayaba se colocaron en el mismo nivel en todas las mesas de secado a una altura de 1.5 m sobre el nivel del piso.

Las variables de temperatura y humedad del aire se midieron cada minuto mediante dos sensores modelo Cs 215 de la marca Campbell ubicados a la altura del producto, los cuales fueron conectados a un datalogger CR1000 marca Campbell Scientific, ubicada en el centro del secador, y otra estación meteorológica ubicada en el módulo de energías alternativas de la Universidad Autónoma Chapingo para las variables climatológicas a 15 metros de distancia del secador solar.

Se tomaron las mediciones de peso sobre cuatro muestras distribuidas espacialmente dentro del secador, las cuales se realizaron cada 30 minutos con ayuda de una balanza digital marca Velab con precisión de \pm 0.01 gramos, durante el proceso de secado.

3.3.3 Ajuste de los modelos de capa delgada

El contenido de humedad del jitomate en base húmeda (Mwb) en porciento se determinó con la ecuación (1), el peso de materia seca (Wd) se obtuvo mediante un proceso de secado en donde las muestras se colocaron en una estufa eléctrica a 105 °C durante 24 horas (Badaoui, Hanini, Djebli, Haddad, & Benhamou, 2019).

$$M_{wb} = \left(\frac{W_o - W_d}{W_o}\right) * 100\tag{1}$$

Donde Wo es el peso de la muestra húmeda (kg)

Los modelos de capa fina se programaron en Matlab y se utilizó el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales que se encuentra programado en la función lsqnonlin de la herramienta de Optimización de Matlab para regresiones non lineales para determinar los coeficientes de los 13 modelos de capa delgada que se muestran en el cuadro 3-1 (Arepally, Ravula, & Reddy, 2017), se utilizaron los datos del primer experimento de deshidratado de guayaba y de jitomate.

Para el cálculo de la razón de humedad (MR) se utilizó la ecuación (2)(Prakash & Kumar, 2017).

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \tag{2}$$

Donde M_t es el contenido de humedad en cualquier tiempo (kg de agua.kg de materia seca ⁻¹) y M_i es el contenido de humedad en el tiempo inicial (kg de agua.kg de materia seca ⁻¹).

NO NOMBRE DEL MODELO REFERENCIA MODELO 1 Newton MR = exp(-kt)(Mujumdar, 2007) 2 Page (Diamante & $MR = \exp(-kt^n)$ Munro, 1993) 3 Page Modificado (N. Kumar et al., $MR = \exp[-(kt)^n]$ 2012)

Cuadro 3-1 Modelos de capa delgada para el cálculo de MR

4	Henderson y Pabis		(Malan, Kamboj,
		$MR = a \exp(-kt^n)$	Sharma, & Yadav,
			2019)
5	Logarítmico		(Dhanushkodi,
		$MR = a \exp(-kt) + c$	Wilson, &
			Sudhakar, 2017)
6	Dos términos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(Wang et al., 2007)
7	Dos términos	$MR = a \exp(-k_0 t) + (1)$	(Doymaz, 2007a)
	exponencial	$-a) \exp(-k_1 at)$	
8	Aproximación por	$MR = a \exp(-kt)$	(Toğrul, 2006)
	difusión	$+ (1 - a) \exp(-kbt)$	
9	Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$	(Menges &
	Modificado	+ c exp(-ht)	Ertekin, 2006b)
10	Verma	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	(Pardeshi, Arora, &
			Borker, 2009)
11	Midilli y Kucuk	$MR = a \exp(-kt) + bt$	(Midilli, Kucuk, &
	•		Yapar, 2002)
12	Waibull distribution	MP = $a = b \operatorname{aver} \left((\operatorname{Irt}^{\eta}) \right)$	(Dhanushkodi
		$MR = a - b \exp(-(RC))$	et al., 2017)
13	Ц;;	MD = a_{n} (l_{t} t^{n}) (b_{n} a_{t} t^{n})	(Hii, Law, &
	ПШ	$MK = a \exp(-Kt^2) + b \exp(-gt^2)$	Cloke, 2009)

Las estadísticas mediante las cuales se evaluaron los diferentes modelos de capa delgada fue la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el cual es un error medido de las diferencias entre los valores predichos por un modelo o un estimador y los valores observados a partir de los datos experimentales. RMSE es una buena medida de precisión ya que permite agregar los residuos en una sola medida de poder predictivo (Ecuación 3) (Doymaz, 2007a, 2007b; Menges & Ertekin, 2006c; Toğrul, 2006; Wang et al., 2007). El error absoluto medio (MAE), es una cantidad utilizada para medir la proximidad a las predicciones a los resultados finales (Ecuación 4) (Badaoui et al., 2019; Can Ertekin & Firat, 2017). La eficiencia de modelado, (EF), indica la capacidad de ajuste del modelo (Menges & Ertekin, 2006c, 2006b; Pardeshi et al., 2009; Toğrul, 2006)y su valor más alto es 1 (Ecuación 5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (D_i)^2} ; MAE$$
$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |D_i| ; EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} D_i^2}{\sum_{i=1}^{N} (MR_{exp,i} - \overline{MR_{expmean}})^2} (3,4,5)$$

Donde Di es la diferencia entre el valor estimado y el valor experimental, N el número de observaciones experimentales, MR_{exp} es la razón de humedad experimental y MR_{expmean} es el promedio de la razón experimental.

Estas estadísticas de ajuste se realizaron estimando los valores de la razón de humedad para cada modelo con los coeficientes calculados con el uso del primer experimento para cada producto y posteriormente comparándolos entre lo predicho por los modelos y lo medido para obtener las estadísticas de la calibración de los modelos, con los datos de la razón de humedad obtenidos en el segundo experimento y lo predicho por los modelos se obtuvieron las estadísticas de la estadísticas.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Perfil de temperatura y radiación solar a través del secador

La variación de la radiación solar con respecto al tiempo es importante y afecta directamente los requisitos de energía para aplicaciones de sistemas que operan con esta fuente de energía (Badaoui et al., 2019). En la figura 3-2 se puede observar la variación de la temperatura dentro y fuera del secador durante los experimentos del deshidratado de guayaba, y la variación de la radiación solar se comportó de una forma similar para ambos experimentos, la radiación máxima fue de 750 W.m-2, la cual se presentó a las 12:30 horas. Se puede observar que la temperatura dentro del secador solar tipo invernadero varió entre los 35 °C a los 55 °C y la temperatura fuera del secador se mantuvo entre los 16 °C y los 20 °C.



Figura 3-2 Temperatura y radiación solar durante los experimentos de deshidratado de guayaba

La humedad relativa (HR) en la velocidad del deshidratado impacta indirectamente, a menor HR mayor será la velocidad de deshidratado y viceversa. Para el caso del deshidratado de guayaba, la humedad relativa que se muestra en la figura 3-3 corresponde a la HR medida durante los experimentos, se observa que dentro del secador se alcanzaron HR de 10 %, cuando en el ambiente se tienen alrededor de 30 %, tener una HR baja dentro del secador impacto en la velocidad de secado de la guayaba.



Figura 3-3 Humedad relativa durante los experimentos de deshidratación de guayaba.

En la figura 3-4 se puede observar la variación de la temperatura dentro y fuera del secador durante los experimentos del deshidratado de jitomate, y la variación de la radiación solar no se comportó de una forma similar para ambos experimentos, la radiación máxima fue de 780 W.m-2 en el primer experimento y de 700 W.m-2 para el segundo experimento, la cual se presentó a las 13:30 horas, se puede observar que la temperatura dentro del secador solar tipo invernadero fue entre los 25 °C a 55 °C y la temperatura fuera del Secador se mantuvo entre los 12 °C a 19 °C.



Figura 3-4 Temperatura y radiación solar durante los experimentos de deshidratado de jitomate

La humedad relativa que se muestra en la figura 3-5 corresponde a la HR medida durante los experimentos de deshidratado de jitomate, se observa que dentro del secador se alcanzaron HR del 15 %, cuando en el ambiente se tienen en promedio una HR de 50 %, las ventajas de tener una HR baja impacta en la velocidad de secado del jitomate, como se observa en el experimento 2 la HR en el interior del secador fue menor que en el experimento 1, lo cual está muy relacionado con la HR del ambiente, ya que se comportó de la misma manera durante los experimentos.



Figura 3-5 Humedad relativa durante los experimentos de deshidratación de jitomate

3.4.2 Razón de humedad y contenido de humedad sobre el tiempo

El contenido de humedad en las rebanadas de guayaba varió durante el tiempo de secado de 81 % a un 7 % como se muestra en la figura 3-6a, lo cual es similar a otros investigaciones (Shiva et al., 2015; Shravya, Renu, & Srinivas, 2019). El contenido de humedad inicial del jitomate fue del 95 % base húmeda y al final del proceso de secado el contenido de humedad fue de 20 % como se observa en la figura 3-6b, estos valores son similares a lo reportado por otros investigadores (Sacilik, Keskin, & Elicin, 2006) con la diferencia en que en esta investigación se deshidrato en 8 horas y en Sacilik duro entre 82 a 96 horas, con la diferencia que las rebanadas en este experimento fueron de 5 mm y en el de Sacilik de 30 mm. Las rebanadas de jitomate obtuvieron un porcentaje de 20 % de humedad en base húmeda, similar a la reportada por otros autores (Akhijani et al., 2016; Badaoui et al., 2019; Bagheri, Arabhosseini, Kianmehr, & Chegini, 2013; Belghith, Azzouz, & ElCafsi, 2016; Hussein et al., 2016; Sacilik et al., 2006), después de 8 horas de secado en el secador solar tipo invernadero.


Figura 3-6 Variación del contenido de humedad en el tiempo de secado de guayaba (a) y jitomate (b)

3.4.3 Modelado de cinética de secado

Los valores para el caso de calibración de los modelos para el caso del jitomate el MAE va de 0.017 en su valor más bajo y 0.083 en su valor más alto, en el RMSE con 0.019 en su valor bajo y en 0.091 en su valor alto, y por último en la EF el mejor modelo con un valor de 0.997 y los modelos con la eficiencia de modelado más baja tienen un valor de 0.93. Para el caso de la evaluación de los modelos en la deshidratación de jitomate, en el cual se utilizaron los valores del segundo experimento el MAE van de 0.017 en su valor más bajo y 0.085 en su valor más alto para el caso del jitomate, en el RMSE con 0.019 en su valor bajo y en 0.093 en su valor alto, y por último en la EF el mejor modelo con un valor de 0.997 y los modelos con la eficiencia de modelado más baja tienen un valor de 0.928.

La evaluación de los 13 modelos de capa delgada, para el caso de las rebanadas de jitomate, el mejor ajuste, de acuerdo con las estadísticas aplicadas, resultó

ser el modelo Henderson y Pabis Modificado (núm. 9, Cuadro 3-2), el cual es válido para este tipo de secador, ya que otros autores para este mismo producto encontraron como mejor modelo el de aproximación por difusión (Sacilik et al., 2006), modelo Page (Hussein et al., 2016) y el modelo Midilli y Kucuk (Badaoui et al., 2019), la diferencia entre los autores es que aplicaron los modelos de capa delgada a otro tipo de secador diferente al SSSTI usado en el presente trabajo.

		E	valuación	L	Calibración		
No	Coeficientes	MAE	RMSE	EF	MAE	RMSE	EF
1	K = 0.28751	0.085	0.093	0.928	0.083	0.091	0.930
2	K = 0.16693 n = 1.72236	0.085	0.093	0.928	0.083	0.091	0.930
3	K = 0.24099 n = 1.19307	0.085	0.093	0.928	0.083	0.091	0.930
4	K = 0.32356 a = 1.13614	0.012	0.015	0.998	0.012	0.015	0.998
5	K = 0.16866 a = 1.48536 c = - 0.41476	0.039	0.044	0.984	0.039	0.043	0.984
6	K_0 = 0.66070 a = - 24.03 K_1 = 0.62966 b = 25	0.031	0.033	0.991	0.030	0.033	0.991
7	K = 0.46838 a = 2.10905	0.032	0.035	0.990	0.030	0.034	0.990
8	K = 0.63794 a = - 125.690 b = 0.99114	0.031	0.035	0.990	0.029	0.034	0.990
9	K = 0.26470 a = - 3.39779 b = - 5.62068 c = 10 g = 0.50850 h = 0.37468	0.017	0.019	0.997	0.017	0.019	0.997

Cuadro 3-2 Parámetros estimados y estadísticas de ajuste de los modelos de capa delgada para jitomate

10	K = 0.06074 a = 67.3932 g = 0.05767	0.043	0.049	0.980	0.042	0.048	0.981
11	K = 0.56882 a = 1.13614 b = 0.00000 n = 0.56882	0.041	0.046	0.982	0.040	0.045	0.982
12	K = -0.408 a = - 0.415 b = - 1.485 n = -0.414	0.039	0.044	0.984	0.039	0.043	0.984
13	K = 0.577 a = 0.445 b = 0.691 n = 0.560	0.073	0.079	0.948	0.071	0.077	0.949

Los valores de MAE para el caso de la calibración de los modelos de capa delgada en el deshidratado de guayaba van de 0.022 a 0.048 en su valor más bajo y alto respectivamente, en el RMSE con 0.024 en su valor bajo y en 0.055 en su valor más alto, y por último en la EF su mayor valor es 0.995 y el valor más bajo de 0.971.

Para llevar a cabo la evaluación de los modelos en el deshidratado de guayaba, se utilizaron los datos de contenido de humedad del experimento 2, con lo cual se obtuvieron valores de MAE de 0.021 a 0.05 en su valor más bajo y alto respectivamente, en el RMSE con 0.024 en su valor bajo y en 0.057 en su valor más alto, y por último en la EF 0.995 y 0.969 para el mejor y el peor modelo respectivamente, teniendo mejores resultados de ajuste en la calibración que en la evaluación. La evaluación de los 13 modelos de capa delgada, para el caso de guayaba el mejor ajuste lo obtuvo el modelo de Henderson y Pabis modificado (núm. 9, Cuadro 3-3).

Cuadro 3-3 Parámetros estimados y estadísticas de ajuste de los modelos de capa delgada para guayaba

		Evaluación			Calibración		
No	Coeficientes	MAE	RMSE	EF	MAE	RMSE	EF

1	K = 0.419	0.050	0.057	0.969	0.048	0.055	0.971
2	K = 0.238 n = 1.760	0.050	0.057	0.969	0.048	0.055	0.971
3	K = 0.338 n = 1.240	0.050	0.057	0.969	0.048	0.055	0.971
4	K = 0.233 a = 0.959 n= 1.507	0.020	0.024	0.994	0.020	0.023	0.995
5	K = 0.348 a = 1.144 c = - 0.105	0.034	0.039	0.986	0.034	0.038	0.986
6	k_0 =0.810 a = - 24.024 k_1 = 0.782 b = 25.000	0.024	0.028	0.992	0.022	0.027	0.993
7	k_0 = 0.720 a = 5.0 k_1= 0.173	0.023	0.029	0.992	0.022	0.027	0.993
8	K = 0.206 a = - 110.930 b = 1.006	0.032	0.038	0.986	0.032	0.037	0.986
9	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	0.021	0.024	0.995	0.022	0.024	0.995
10	K = 0.126 a = 77.553 g = 0.122	0.026	0.031	0.991	0.026	0.031	0.991
11	K = 0.385 a = 1.043 b = - 0.010	0.036	0.041	0.984	0.036	0.040	0.984
12	K = 0.591 a = - 0.105 b = - 1.144 n = 0.588	0.034	0.039	0.986	0.034	0.038	0.986
13	K = 0.613 a = 0.417 b = 0.653 n = 0.726	0.046	0.052	0.974	0.044	0.050	0.976

_

El mejor modelo para predecir la razón de humedad de rebanadas de guayaba en un secador solar tipo invernadero es el modelo Henderson y Pabis modificado, el cual coincide con lo reportado en 2015 (Shiva et al., 2015), solo que en esa investigación no se evaluó el modelo de Henderson y Pabis modificado, y el modelo que mejor se ajustó a las rebanadas de guayaba en esa investigación fue el de Henderson y Pabis para una estufa de secado de 0.033 m3. En la figura 3-7 se observan los datos predichos por los 13 diferentes modelos de capa delgada, y de los datos reales que se obtuvieron de las mediciones del experimento de deshidratado de rebanadas de jitomate en el secador solar tipo invernadero, en la figura 3-8 se puede observar el ajuste que tiene el modelo de Harris y Pabis modificado con respecto a los datos experimentales de las rebanadas de jitomate.



Figura 3-7 Modelos de capa delgada para predecir la razón de humedad en rebanadas de jitomate



Figura 3-8 Razón de humedad medida y predicha por el modelo Harris y Pabis modificado en rebanadas de Jitomate

En la figura 3-9 se observan los datos predichos por los 13 diferentes modelos de capa delgada, y de los datos reales que se obtuvieron de las mediciones del experimento de deshidratado de rebanadas de guayaba en el secador solar tipo invernadero, en la figura 3-10 se puede observar el ajuste que tiene el modelo Henderson y Pabis modificado con respecto a los datos experimentales de las rebanadas de guayaba.



Figura 3-9 Modelos de capa delgada para predecir la razón de humedad en rebanadas de guayaba



Figura 3-10 Razón de humedad medida y predicha por el modelo Harris y Pabis modificado en rebanadas de guayaba

3.5 Conclusiones

El Sistema secador solar parabólico tipo invernadero permite condiciones adecuadas para el secado de rebanadas de jitomate y de guayaba, disminuyendo considerablemente las perdidas por daños del medio ambiente, llevando a 20 % de humedad final en base húmeda a las rebanadas de jitomate y en 8 % a las rebanadas de guayaba, tomando 8 horas el proceso de secado en ambos productos

Derivado de la comparación de las estadísticas los modelos que mejor se ajustan a la cinética de secado en un secador solar parabólico tipo invernadero es el modelo Henderson y Pabis Modificado para el caso de las rebanadas de guayaba y para el caso de las rebanadas de jitomate con una eficiencia de modelado de 0.995 y 0.997 respectivamente.

Los modelos de capa delgada que describen el comportamiento de la razón de humedad de los productos que se están deshidratando, no dependen tanto de las características de estos, sino del tipo de sistema de secado (secador) en el que están implementando, ya que se observó que la diferencia de nuestros resultados respecto a otros autores, donde el mejor ajuste lo tuvo otro modelo, fue el diseño del secador.

3.6 Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Chapingo (Proyecto de Investigación Estratégico: 20016-EI) por el uso de las instalaciones en el módulo de energías alternativas y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por los recursos por medio de un proyecto de ciencia básica (CB-2015-1, 254055) para llevar a cabo esta investigación.

4.-Modelo ARX y ARMAX para predecir la temperatura del aire de un deshidratador solar tipo invernadero

José Francisco Marín-Camacho; Irineo L. López-Cruz; Agustín Ruíz-García; Salvador Valle-Guadarrama

4.1 Resumen

Se desarrolló un modelo dinámico lineal autoregresivo con variables exógenas (ARX) y un modelo con media móvil autoregresivo con entrada externa ARMAX para predecir la temperatura del aire en el interior de un deshidratador solar tipo invernadero, aplicando la metodología de la teoría de Identificación de Sistemas. Las entradas en ambos modelos fueron las variables de velocidad del viento, la radiación solar, la temperatura del aire y humedad relativa del aire. Los datos obtenidos fueron tomados a una distancia de 2 metros de altura, cada minuto, durante 30 días. El sistema secador solar tipo invernadero se localiza en la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México. El sistema tiene 108 m² de área, cubierta de policarbonato, de forma parabólica. Sé evaluaron 129 600 000 modelos ARX y 9 765 625 modelos ARMAX usando el criterio de predicción final de Akaike y mínimo cuadrados, en donde la mejor precisión obtenida en predicción con un paso hacia delante fue de 99.9% y 99.78% de ajuste entre lo predicho y lo medido, siendo de tercer y quinto orden en el modelo ARX y ARMAX, respectivamente.

Palabras clave: Autoregresivo, secador, modelo dinámico, Identificación de sistemas, Criterio de Akaike

4.2 Introducción

Cada año en México los desperdicios de alimentos alcanzan más de 10 mil toneladas lo que equivale a un 37% de la producción agrícola en el país. Los desperdicios de estos productos tienen un valor aproximado de más de 100 mil

millones de pesos. Los desperdicios en granos básicos son del 24.0% de frijol y 46.0% de arroz. Para el caso de la leche es del 37.0%; para el pollo es del 39.0%; la carne de cerdo del 40.0%; la de res 34.8% y 54.0% de los pescados y mariscos. En las frutas y verduras los porcentajes de las pérdidas son para el caso del del aguacate de 54.0%; del jitomate 28.8%; de la cebolla 32.0%; del melón 41.0%; de la guayaba 57.7%, del mango 54.5% y de las manzanas 49.0% (SEDESOL, 2013).

El secado o deshidratado se define como un proceso en el cual se elimina la humedad debido a una transferencia de calor y masa de forma simultánea (C. Ertekin & Yaldiz, 2004), Secar a sol abierto es una técnica de preservación de alimentos más antiguo para preservar carne, granos, frutas y verduras en la mayoría de los países en desarrollo. Tal secado bajo clima hostil las condiciones conducen a pérdidas severas en la cantidad y calidad del producto seco (El-Sebaii & Shalaby, 2012). La deshidratación es un proceso importante que se utiliza para extender la vida útil de los productos agrícolas al disminuir el contenido de humedad con diferentes técnicas (Şevik, Aktaş, Dolgun, Arslan, & Tuncer, 2019), reducir el contenido de humedad de los materiales alimenticios a niveles seguros ralentiza las acciones de enzimas, bacterias, levaduras y mohos. La mejora de la calidad del producto y la reducción de pérdidas solo se pueden lograr mediante la introducción de tecnologías de secado adecuadas (S. Janjai & Bala, 2012).

Los sistemas de secado solar deben diseñarse adecuadamente para cumplir con los requisitos particulares de secado de productos específicos y para brindar un rendimiento óptimo. Los diseñadores deben investigar los parámetros básicos como las dimensiones, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del flujo de aire y las características de los productos a secar. Sin embargo, los experimentos a gran escala para diferentes productos, temporadas de secado y configuraciones del sistema a veces son costosos y poco prácticos (S. Janjai & Bala, 2012). El desarrollo de un modelo de simulación es una herramienta valiosa para predecir el comportamiento de los sistemas de secado solar. Por esta razón, la simulación del secado solar de productos agrícolas es fundamental para optimizar las dimensiones de este tipo de sistemas, además de que con esto sería posible aplicar técnicas para el diseño y control óptimo de los secadores solares (Bala, 1998). En contraste con modelos dinámicos mecanicistas, los modelos dinámicos autoregresivos con entradas exógenas son generados con más rapidez, debido a que se utilizan datos experimentales para establecer relaciones entre los datos de entrada y los de salida del sistema mediante técnicas de identificación de parámetros (Lennart Ljung, 1998).

Los modelos ARX y ARMAX se han utilizado en diversas investigaciones para la estimación de parámetros de modelos de caja negra, se han ocupado para el calcular la corriente de salida en relación a su flujo de hidrogeno como entrada en las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) (P. A. Kumar et al., 2018), para el secado de madera (Zhou, Zhang, et al., 2019), germinación de arroz (Zhou, Fu, et al., 2019), sistemas poblacionales (Batista et al., 2017), temperatura de invernaderos (Frausto et al., 2003; López-Cruz et al., 2007; Patil et al., 2008), transpiración de cultivos en invernaderos (Sánchez et al., 2011), distribución de temperatura en paredes (Naveros et al., 2015) y control de inventario (Rachad et al., 2015).

El objetivo de esta investigación es generar un modelo ARX y ARMAX para predecir la dinámica de la temperatura interna del aire del deshidratador solar tipo invernadero, con la finalidad de utilizar este modelo matemático dinámico para control y optimización de la temperatura.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Descripción del sistema secador solar tipo invernadero

El experimento se llevó a cabo en un secador solar tipo invernadero de forma parabólica con circulación de aire forzada, el cual cuenta de cubierta de policarbonato de 6 mm de espesor y piso de concreto reforzado, cuyas dimensiones son de 12 x 9 m en la base y 3.5 m de altura, cuenta con dos extractores ubicados en pared sur con una capacidad de 9435 m³ h⁻¹ cada uno, accionados mediante motores monofásicos de 0.5 HP (373 W) permitiendo una renovación del aire en el interior del secador en un tiempo aproximado de 40 s (Figura 4-1). Este sistema se encuentra localizado en módulo de energías alternativas de la Universidad Autónoma Chapingo, México, localización geográfica: 19° 29' N, 98°, 53' O, a una altitud de 2240 m. La orientación (azimut) del secador es 45° E con referencia a la orientación Norte-Sur.



Figura 4-1 Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica en Chapingo, México

4.3.2 Descripción de los experimentos

Para obtener los datos de las variables de entrada y de salida para los modelos ARX y ARMAX se utilizaron dos estaciones Campbell CR1000. Una se localizó en el centro del secador y la otra a 10 metros fuera del secador. Se realizó el muestreo cada minuto durante 8 días, obteniendo un total de 11604 datos (Figura 4-2). Las mediciones de la radiación solar se llevaron a cabo con el piranómetro CMP11 tuvieron una incertidumbre de \pm 10 W m⁻², para las mediciones de humedad relativa y temperatura fuera del secador se utilizó un sensor de la marca VAISALA HMP60 con una incertidumbre ± 3 % RH en el rango de 0 a 90 % RH y para el caso de la temperatura una incertidumbre de ± 0.5 °C para un rango de 0 a 40°C, para las mediciones de la velocidad del aire afuera del secador se utilizó un sensor YOUNG 05305-L que tiene una incertidumbre de ± 0.2 m s⁻¹ en un rango de 0 a 50 m s-1 y para la temperatura dentro del secador se utilizaron sensores Cs 215-L que para el rango de -40 °C a +70 °C tiene una incertidumbre de ± 0.9 °C.



Figura 4-2 Variables de entrada para los modelos ARX y ARMAX de un secador solar tipo invernadero medidas durante el 15 al 22 de diciembre de 2019

4.3.3 Modelos ARX y ARMAX e identificación del sistema

Un modelo general ARX SISO se describe mediante la ecuación lineal en diferencias (Aguado-Behar & Martínez-Iranzo, 2003; Keesman, 2011; L. Ljung, 1999; Lennart Ljung, 1998, 2017):

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + b_2 u(t-nk-1) + \dots$$
$$\dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t)$$
(1)

Donde:

y(t) es la salida del modelo ARX para t = t, t-1, ... t-na;

u(t): es la entrada del modelo ARX modelo para t=t-nk, t-nk-1, ..., t-nk-nb+1;

na: es el número de pasos de tiempo de la salida;

nb: es el número de pasos de tiempo de la entrada;

nk: es el retardo de la entrada con respecto a la salida;

e(t): es ruido blanco asociado con la variable de salida.

En esta investigación se desea predecir la temperatura del aire dentro de un secador solar tipo invernadero parabólico, para lo que se utilizaran cuatro variables de entrada, por lo que el modelo ARX utilizado en esta investigación es un modelo con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).

La ecuación (2) define el modelo ARX MIMO:

$$A(q) y(t)=B(q)u(t)+e(t)$$

Donde:

A(q) es una matriz cuadrada de tamaño ny; sus elementos son polinomios en el operador de retraso q^{-1}

(2)

y(t) = y(t-1). $A(q)=In_y+A_1q^{-1}+...+A_{na}q^{-na}$ In_y es la matriz identidad.

En forma matricial (ecuación 3):

$$A(q) = \begin{bmatrix} a_{11}(q) & a_{12}(q) & \dots & a_{1ny}(q) \\ a_{21}(q) & a_{22}(q) & \dots & a_{2ny}(q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{ny1}(q) & a_{ny2}(q) & \dots & a_{nyny}(q) \end{bmatrix}$$
(3)

Donde cada elemento akj son polinomios en el operador q⁻¹ (ecuación 4)

$$a_{kj}(q) = \delta_{kj} + a_{kj}^1 q^{-1} + \dots + a_{kj}^{na_{kj}} q^{-na_{kj}}$$
(4)

 $\delta_{kj} = \{ \begin{matrix} 1 \ si \ k = j \\ 0 \ de \ lo \ contrario \\ La \ matriz \ B(q) \ es \ similar \ a \ A(q) \ pero \ con \ dimensiones \ ny \ x \ nu, \ (ecuación \ 5): \end{matrix}$

$$B(q) = \begin{bmatrix} b_{11}(q) & b_{12}(q) & \dots & b_{1nu}(q) \\ b_{21}(q) & b_{22}(q) & \dots & b_{2nu}(q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{ny1}(q) & b_{ny2}(q) & \dots & b_{nynu}(q) \end{bmatrix}$$
(5)

Y de forma similar para los elementos b_{kj} (ecuación 6):

$$b_{kj}(q) = b_{kj}^1 q^{-nk_{kj}} + \dots + b_{kj}^{nb_{kj}} q^{-nk_{kj}-nb_{kj}+1}$$
(6)

La estructura del modelo ARMAX es similar a la estructura ARX, pero con un término adicional, que representa el error promedio móvil. La estructura del modelo ARMAX se puede escribir en la forma de la ecuación (7) y la estructura general del modelo MISO ARMAX se muestra en la ecuación (8) (Rachad et al., 2015):

$$A(q^{-1})y(k-n) = q^{-d}B(q^{-1})u(k-n) + e(k)$$
(7)

$$A(q)y(k-n) = q^{-d}B_1(q)u_1(k-n) + q^{-d}B_2(q)u_2(k-n) + C(q)e(k)$$
(8)

Ya sea un modelo ARX o ARMAX A (q⁻¹), B (q⁻¹) y C (q⁻¹) son polinomios que estimar. Para el modelo ARX, el polinomio C (q⁻¹) = 1. Estos polinomios representan la dinámica general del sistema, donde A (q⁻¹), B (q⁻¹) y C (q⁻¹) se definen por:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}$$
$$B(q^{-1}) = b_0 + \dots + b_{n_b} q^{-n_b}$$
$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c}$$

Para conocer la estructura completa de un modelo ARX primero de debe establecer la estructura na, nb y nk, y después se encontrarán los coeficientes a₁₁, a₁₂, a_{ny1}, ..., a_{ny2}, ..., a_{nyny} y b₁₁, b₁₂, ..., b_{1nu}, ..., b_{ny1}, b_{ny2}, ..., b_{nyny}, mediante mínimos cuadrados de cada una de las estructuras generadas, basándose en los datos obtenidos experimentalmente de las entradas y salida.

Para determinar cuál es la mejor combinación de las estructuras na, nb, nk y nc se utilizaron el error de predicción final de Akaike (ecuación 9) y el criterio de información de Akaike (ecuación 10). Los cuales utilizan una función de pérdida mínima en combinación con un número mínimo de parámetros estimados (Keesman, 2011; L. Ljung, 1999) :

$$FPE = \left(\frac{1+\frac{d}{N}}{1-\frac{d}{N}}\right)V$$

$$AIC = \log\left(V\left(1+2\frac{d}{N}\right)\right)$$
(10)

Donde:

V es una función de pérdida.

d es el número de parámetros estimados.

N es el número de datos.

4.3.4 Selección de los subconjuntos de datos para estimar y evaluar los modelos ARX y ARMAX

Se utilizaron para estimar y validar los conjuntos de datos 50 % :50 % , 60 % :40 %, 70% :30%, 80% 20% y 90% 10%. Se hizo uso la herramienta disponible en el software Matlab de identificación de sistemas (System Identification Toolbox), con la cual se estimó la estructura de los modelos y se evaluaron. La combinación de estructuras dio como resultado 129 600 000 modelos ARX para cada uno de los subconjuntos de datos mencionados, ya que el valor para na (una variable de salida) y para nb (cuatro variables de entrada) fue del 1 al 10 y para nk (retraso de la salida) de cero a cinco, tardando un tiempo estimado para evaluar cada modelo de 0.005 segundos, dando un total de 180 horas de cómputo continuas para la evaluación de cada conjunto de datos. Para el caso de los modelos ARMAX se trabajó una estructura del 1 a 5 para na, nb, nk y nc, dando como total de 9 765 625 de modelos evaluados los cuales se evaluaron para el subconjunto de 50% 50% para estimar y validar, debido a que en estos subconjuntos el modelo ARX tuvo mejores resultados, tardando un tiempo estimado para evaluar cada modelo de 0.15 segundos, dando un total de 406.9 horas de cómputo continuas para la evaluación.

Para evaluar los modelos un primer criterio fue el nivel ajuste (%) que se observa en las temperaturas simuladas con respecto a las medidas en el secador, y como segundo criterio el análisis residual que evalúa la calidad predictiva del modelo (Parzinger et al., 2020).

4.4 Resultados y discusión

En los Cuadros 4-1, 4-2, 4-3, 4-4 y 4-5 muestran los resultados de la evaluación de los modelos ARX.

na	nb	nk	FPE (x 10 ⁻⁴)	AIC (x 10 ⁻⁴)	Ajuste en estimación (%)	Ajuste en evaluación (%)
7	2231	0100	7.329	7.274	87.49	87.03
6	1111	4100	7.373	7.333	85.48	85.18
5	1111	4100	7.395	7.36	85.49	85.16
4	1111	4100	7.478	7.447	85.51	85.16
3	1111	4150	7.893	7.865	85.53	85.24
2	1111	4050	8.423	8.399	84.78	84.79
1	1111	5053	68.36	68.22	79.62	80.96

Cuadro 4-1.-mejores modelos ARX 50% 50%

na: número de retrasos de la variable de salida.

nb: número de retrasos para las variables de entrada.

nk: retardo entre las variables de entrada y salida.

FPE: error de predicción final de Akaike. AIC: criterio de información de Akaike.

	Cuadro	4-2me	ores	modelos	ARX	60%	40%
--	--------	-------	------	---------	-----	-----	-----

na	nb	nk	FPE (x 10 ⁻⁴)	AIC (x 10 ⁻⁴)	Ajuste en estimación (%)	Ajuste en evaluación (%)
4	5521	2215	7.486	7.439	85.13	85.34
3	1211	1115	8.319	8.292	85.64	85.51
3	1111	4100	8.335	8.311	85.5	85.44
2	1111	4100	8.831	8.811	83.83	84.52
1	1111	4150	73.03	72.84	79.12	80.85

Cuadro 4-3.-mejores modelos ARX 70% 30%

na	nb	nk	FPE (x 10 ⁻⁴)	AIC (x 10 ⁻⁴)	Ajuste en estimación (%)	Ajuste en evaluación (%)
3	3214	1113	7.969	7.891	86.26	85.57
3	2214	1113	7.979	7.906	86.06	85.33
3	1214	1113	7.977	7.909	85.61	84.83
3	1111	1213	8.024	7.978	85.44	84.63
2	1111	1313	8.693	8.353	83.95	83.45
1	1111	1333	72.62	72.37	81.13	81.59

Cuadro 4-4.-mejores modelos ARX 80% 20%

na	nb	nk	FPE (x 10 ⁻⁴)	AIC (x 10 ⁻⁴)	Ajuste en estimación (%)	Ajuste en evaluación (%)
8	2332	2212	6.659	6.511	86.28	85.12

8	2331	2213	6.656	6.514	86.24	85.07
5	1111	2213	6.716	6.636	85.3	84.06
4	1111	1213	6.853	6.783	85.46	84.23
3	1111	1213	7.471	7.406	85.43	84.18
2	1111	1213	8.305	8.248	85.22	84.03
1	1111	1233	71.62	71.25	82.34	81.91

Cuadro 4-5.-mejores modelos ARX 90% 10%

na	nb	nk	FPE (x 10 ⁻⁴)	AIC (x 10 ⁻⁴)	Ajuste en estimación (%)	Ajuste en evaluación (%)
6	3243	1111	5.915	5.676	86.97	84.76
6	1221	1113	5.866	5.687	86.02	83.51
5	1111	1213	5.977	5.835	85.39	82.85
4	1111	1213	6.179	6.052	85.39	82.86
3	1111	1213	6.669	6.556	85.34	82.77
2	1111	1213	7.3	7.2	85.09	82.56
1	1111	1233	70.61	69.89	82.36	80.61

Para obtener el mejor modelo que prediga la temperatura dentro del secador, se empleó un procedimiento de validación cruzada (Salcedo, Feliu, & Rivas, 2020), el cual nos ayudó a escoger el modelo con el mejor ajuste que cumpla con la prueba de los residuales y de bajo orden.

Después de la evaluación de todos los modelos por medio del error de predicción final de Akaike, el criterio de información de Akaike y el porcentaje de ajuste, el mejor modelo es el de estructura na=7, nb=[2 2 3 1], nk=[0 1 0 0] (Cuadro 1, renglón uno), y la estructura na=3, nb=[1 1 1 1], nk=[4 1 5 0] (quinto reglón, Cuadro 1) presenta un grado de ajuste similar, con 1.96 % menos de ajuste. Basándonos en la Teoría de Control un modelo con la estructura más simple en cuanto a los valores de sus números de parámetros es preferible a otro con una estructura más compleja (Lennart Ljung, 1998), esto debido a que el comportamiento con respecto a un modelo de orden superior es muy similar y por consecuente se facilita el proceso de diseño de un sistema de control.

El modelo que en esta investigación basándonos en la teoría de control tiene la estructura na=3, nb=[1 1 1 1], nk=[4 1 5 0] que se presenta en la siguiente ecuación:

Modelo ARX: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)

Donde:

 $A(z) = 1 - 1.695 z^{-1} + 0.4441 z^{-2} + 0.2522 z^{-3}$

 $B_1(z) = 0.0009718 z^{-4}$

 $B_2(z) = 0.00005657 z^{-1}$

 $B_3(z) = 0.0001761 z^{-5}$

 $B_4(z) = -0.0003509$

La estructura completa para el modelo ARMAX, el cual fue evaluado con un porcentaje de 50 % de los datos para estimación y el otro 50 % para la validación es la siguiente na=5 nb=[2 2 2 3] nc=5 nk=[1 1 5 2] que se puede representar en la siguiente ecuación:

Modelo ARMAX: A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t) $A(z) = 1 - 3.552 z^{-1} + 4.963 z^{-2} - 3.432 z^{-3} + 1.19 z^{-4} - 0.1679 z^{-5}$ $B_1(z) = 0.001475 z^{-1} - 0.001442 z^{-2}$ $B_2(z) = 0.0001247 z^{-1} - 0.0001225 z^{-2}$ $B_3(z) = -0.0002359 z^{-5} + 0.0002434 z^{-6}$ $B_4(z) = 0.0007435 z^{-2} - 0.006927 z^{-3} + 0.0062 z^{-4}$

$$C(z) = 1 - 2.006 z^{-1} + 1.378 z^{-2} - 0.2355 z^{-3} - 0.1244 z^{-4} + 0.05056 z^{-5}$$

El ajuste en la simulación de los modelos ARX es de 82.93 % (Figura 4-3) y el ajuste con el modelo ARMAX es de 86.49 % (Figura 4-3), por lo que se considera que están de acuerdo con lo reportado en otros trabajos para un sistema invernadero (Frausto et al., 2003; López-Cruz et al., 2007).



Figura 4-3.- Simulated response comparison

El modelo en fase de predicción con un paso hacia adelante tiene un ajuste de 99.86 % para el modelo ARX y el para el modelo ARMAX un 99.87 % (Figura 4-4), lo que significa que el modelo se ajusta aceptablemente para predecir la temperatura del minuto siguiente a la medición.



Figura 4-4 One step predicted response comparison

Aumentando el número de pasos que debe predecir el modelo, el ajuste de ambos modelos decae, con treinta pasos hacia adelante como predicción tiene un ajuste de 93.68 % para el modelo ARX y el para el modelo ARMAX un 95.28 % (Figura 4-5), lo que significa que el modelo predice bien la temperatura del secador solar tipo invernadero con media hora de antelación.



Figura 4-5 thirty step predicted response comparison

Del análisis residual y de coeficientes se obtienen los resultados (Figura 4-6) en los que se puede observar que las funciones de correlación de las entradas y la salida se mantienen dentro de los intervalos de confianza para el caso del modelo ARX.



Figura 4-6 Función de correlación entre las entradas y salida del modelo ARX.

Para el caso del modelo ARMAX (Figura 4-7), los valores residuales del modelo también se mantienen dentro de los intervalos de confianza, lo que conlleva menor incertidumbre al usarlos.



Figura 4-7 Función de correlación entre las entradas y salida del modelo ARMAX.

Si se usa un modelo ARX o un modelo ARMAX de base para el diseño de un dispositivo de control de la temperatura del aire del secador solar tipo invernadero, el subconjunto de datos para estimar y evaluar en esta investigación fue del 60 % - 40 %. Con base en los resultados el nivel de predicción es alta en la precisión de la temperatura del secador solar con los datos de entrada de temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento (López-Cruz et al., 2007), será necesario recalibrar periódicamente el modelo o usar algoritmos recursivos como modelos de redes neuronales o una combinación de estos con modelos autorregresivos (NARX) para determinar nuevas estructuras ante nuevos escenarios (Aguado-Behar & Martínez-Iranzo, 2003; Lennart Ljung, 1998).

4.5 Conclusiones

Se evaluaron 648 000 000 modelos ARX para predecir la temperatura del aire en un deshidratador solar tipo invernadero 129 600 000 para cada subconjunto de datos a partir de las mediciones de velocidad del viento, humedad relativa del aire fuera del secador, radiación solar y temperatura del aire fuera del secador. Se obtuvieron modelos ARX con un ajuste de 87.49 % sobre el conjunto de datos de evaluación. El modelo con na=3, nb=[1 1 1 1] y nk=[4 1 5 0] satisface también el análisis residual y los coeficientes estimados son precisos.

Se generaron 9 765 625 modelos ARMAX para predecir la temperatura del aire en un deshidratador solar tipo invernadero a partir de las mediciones de velocidad del viento, humedad relativa del aire fuera del secador, radiación solar y temperatura del aire fuera del secador. Obteniendo un modelo ARMAX con un ajuste de 86.49 % sobre el conjunto de datos de validación. El modelo con estructura na=5 nb=[2 2 2 3] nc=5 nk=[1 1 5 2] satisface también el análisis residual y los coeficientes estimados son precisos.

Se evaluaron en predicción ambos modelos y se recomienda un paso de predicción máximo de 30 minutos, en el cual tuvieron un desempeño en el ajuste de 93.68 % y 95.28 % para el caso del modelo ARX y ARMAX respectivamente.

5.-MODELO DINÁMICO DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO PARA EL SECADO DE TOMATE (Solanum lycopersicum)

José F. Marín-Camacho, Irineo L. López-Cruz, Agustín Ruíz-García, Salvador Valle-Guadarrama

5.1 Resumen

El objetivo de esta investigación fue generar la estructura de un modelo matemático dinámico de un sistema de secado solar de convección natural tipo invernadero y su calibración. El modelo incluye tanto al microclima como propiedades del producto en la forma de rodajas de tomate con un nuevo enfoque de presión se vapor de saturación. la estructura de este modelo proviene de balances de energía en estado no estacionario en la cubierta, aire, piso y producto y de un balance de materia en estado no estacionario para el caso del producto. Las variables de estado del modelo dinámico son la temperatura de la cubierta, del piso, el aire dentro del secador, del producto y la masa del producto. Las variables de entrada del modelo son la radiación solar, la temperatura del ambiente, la humedad relativa ambiental, el flujo de aire fuera y dentro del secador. Para estudiar el comportamiento del modelo dinámico se realizó un experimento el 6 de febrero de 2020 con rodajas de tomate de 5 mm de espesor, se ingresaron 100 kilogramos de tomate al interior del secador. Los resultados obtenidos de esta investigación mostraron que las temperaturas del aire dentro del secador fueron 25 °C por arriba de las ambientales. Los resultados de la simulación muestran un buen ajuste con los datos experimentales El valor del error cuadrático medio de la predicción para el caso de la temperatura de la cubierta del secador es del 9.02 %, para el caso de la temperatura del aire dentro del secador 6.26 %, para el caso de la temperatura del piso del secador 6.13 % y para el caso de la predicción del contenido de humedad en el tomate es del 10 %.

Palabras clave: tomate (Solanum lycopersicum), deshidratado, secador solar, Ecuaciones diferenciales ordinarias, calibración, evaluación

5.2 Introducción

Anualmente en México se desperdician alrededor de 10 mil toneladas de alimentos, equivalente al 37% de la producción agrícola nacional. Las cifras de los desperdicios alcanzan el 54.0% para el aguacate; 57.7% de guayaba, 54.5% de mango 28,8% para tomate; 32,0% para cebolla; 41,0% para melón; y 49.0% de manzanas (FAO, 2015a). Una alternativa para reducir este problema es el secado de estos productos.

La producción de jitomate en México creció a una tasa anual de 3.6 % entre los años 2007 y 2017, teniendo una producción de 3.47 millones de toneladas anuales. En 2018 el jitomate fue el segundo producto en el sector primario en cuanto al valor de las exportaciones con una participación del 12.8 %, que creció a una tasa promedio anual de 4.7 por ciento. El volumen exportado, de 1.68 millones de toneladas de este producto, fue equivalente al 48.7 % de la producción nacional en 2018 (FIRA, 2019)

La demanda de productos agrícolas deshidratados como verduras, frutas, especias y plantas medicinales está creciendo a nivel nacional y mundial. La eliminación de la humedad reduce la acción de enzimas, bacterias, levaduras y mohos conservando y mejorando la calidad de los productos agrícolas. El secado por energía solar es respetuoso con el medio ambiente (S. Janjai & Bala, 2012).

Los modelos matemáticos dinámicos son necesarios para diseñar y optimizar el funcionamiento de los secadores solares, la calidad del producto a secar y el ahorro energético (Prakash & Kumar, 2014, 2017), de igual manera también para su supervisión, control y automatización (Mohana et al., 2020).

Existen diferentes tipos de secadores solares, los cuales han sido modelado en otros trabajos (Abunde Neba & Jiokap Nono, 2017; Akharume, Adeyemi, & Obayopo, 2019; Atalay, Turhan Çoban, & Kıncay, 2017; Djebli, Hanini, Badaoui, & Boumahdi, 2019; Erick César, Ana Lilia, Octavio, Isaac, & Rogelio, 2020; Lamrani, Khouya, & Draoui, 2019; Ndukwu et al., 2020; Silva, Ferreira, Coutinho, & Maia, 2020; Simo-Tagne, Zoulalian, Rémond, & Rogaume, 2018; Vásquez, Reyes, & Pailahueque, 2019), pero con una capacidad pequeña para los productos a deshidratar, en este trabajo el secador solar tipo invernadero utilizado para deshidratar tomate que tiene la capacidad de deshidratar 300 kg de tomate por día.

El objetivo de la presente investigación es generar un modelo dinámico que prediga la temperatura del aire en el secador, la temperatura del piso, la temperatura de la cubierta, la temperatura del tomate y la masa del tomate en el proceso de deshidratación, ajustar sus predicciones a mediciones obtenidas de un experimento de secado de rebanadas de tomate.

5.3 Materiales y Métodos

5.3.1 Estructura del modelo matemático

Se ha aplicado el procedimiento general de modelado de sistemas propuesto por la Teoría de Sistemas Dinámicos (Ljung y Glad ,1994; Prakash and Kumar, 2017), el cual consiste en la obtención del conjunto de ecuaciones dinámicas, análisis de incertidumbre, análisis de sensibilidad, desarrollo de experimentos, identificación del sistema, estimación de parámetros (calibración), evaluación (validación) y análisis de incertidumbre.

5.3.1.1 Balance de energía en estado no estacionario

Para llevar a cabo el balance de energía en el secador, este sistema se dividió en cuatro componentes: (i) la cubierta del secador, (ii) el piso del secador, (iii) el aire dentro del secador y (iv) el producto dentro del secador. Además, se plantearon los siguientes supuestos:

- La capacidad calorífica de la cubierta y la estructura del secador es despreciable.
- La temperatura del aire dentro del secador es homogénea.
- La absortividad del aire es despreciable.

La ecuación general de balance de energía en estado no estacionario (Doran, 2013) aplicada en los componentes del secador solar tipo invernadero, cubierta, piso, aire y producto fue:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{d(C_p(t)\rho(t)V(t)T(t))}{dt} = Q_i(t) - Q_u(t) - P(t) - C(t)$$

donde: E(t) es la entalpía del sistema (J), $\rho(t)$ es la densidad del material (kg /m³), $c_p(t)$ es la capacidad térmica del material (J/kgK), V(t) es el volumen del material , $Q_i(t)$ es la energía entrante al sistema (J/s), $Q_u(t)$ es la perdida de energía que sale del sistema (J/s), P(t) es la producción de calor dentro del sistema (J/s) y C(t) es el consumo de calor dentro del sistema (J/s).

5.3.1.1.1 Balance de energía en la cubierta del secador

Para realizar el balance de energía en estado no estacionario de la cubierta del secador se aplicó la primera ley de la termodinámica y se consideró como la tasa de acumulación de energía térmica en la cubierta = la tasa de energía térmica entre el cielo y la cubierta por medio de radiación + la tasa de radiación solar absorbida por la cubierta del secador + la tasa de energía térmica entre la cubierta y el aire dentro del secador por medio de convección - la tasa de energía térmica entre la cubierta y el aire fuera del secador (aire ambiente) por medio de convección

(1).....
$$m_c C_c \frac{dT_c}{dt} = (G_{sky} + SC) + Q_{c-a} - Q_{c-am}$$

Donde:

mc : masa de la cubierta (kg)

C_c : Calor específico de la cubierta (J kg⁻¹ K⁻¹)

Se consideró la emisión de radiación del cielo por unidad de área que es interceptada por la cubierta del secador. G_{sky} es definido para un cielo despejado como (Duffie & Beckman, 1991) :

(2).....
$$G_{sky} = \sigma(0.0559 T_{am}^{1.5})^4$$

Donde:

 σ : es la constante de Stefan–Boltzmann 5.67 * 10⁻⁸ (W m⁻² K⁻⁴)

T_{am} :es la temperatura ambiente (K)

La radiación solar interceptada por la cubierta del secador se obtiene:

(3)..... $SC = (G_{sky} + G_s)(A_c\alpha_c)$

Donde G_s es la radiación solar (W m⁻²), A_c es el área de la cubierta (m²), α_c es la absortividad de la cubierta.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta y el aire dentro del secador se utilizó uno propuesto en la literatura (Papadakis, Frangoudakis, & Kyritsis, 1992), modificando los parámetros debido a que es para invernaderos el propuesto en este artículo.

(4)..... $h_{c-a} = 2.9(T_c - T_a)^3$

Donde T_c es la temperatura de la cubierta (K).

Y para calcular la cantidad de calor transferido por convección entre la cubierta del secador y el aire dentro del secador se utiliza la formula.

(5).....
$$Q_{c-a} = h_{c-a}A_c(T_c - T_a)$$

Que se basa en la ley de Newton de enfriamiento y para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta y el aire fuera del secador se utilizó uno propuesto en la literatura por Papadakis (Papadakis et al., 1992), modificando los parámetros unos coeficientes debido a que es para invernaderos el propuesto en este artículo.

(6).....
$$h_{c-am} = 1.95 + 6.76 (V_m)^{0.49}$$

Donde V_m es la velocidad del aire afuera del secador (m s⁻¹)

Y para encontrar la cantidad de calor transferido por convección entre la cubierta del secador y el aire dentro del secador se utiliza la formula.

(7)...... $Q_{c-am} = h_{c-am} * A_c (T_c - T_{am})$

Donde Tam es la temperatura del ambiente fuera del secador (K)

5.3.1.1.2 Balance de energía en el piso del secador

Para el balance de energía en el piso del secador se aplicó la primera ley de la termodinámica y se consideró como la tasa de acumulación de energía térmica en el piso = la tasa de radiación interceptada por el piso del secador - la tasa de energía térmica entre el piso del secador y el aire dentro del secador por medio de convección - la tasa de energía térmica entre el piso del secador y el suelo debajo del secador por medio de conducción.

(8).....
$$m_f C_f \frac{dT_f}{dt} = SF - Q_{f-a} - Q_{f-g}$$

Donde:

m_f : masa del piso (kg)

C_f : Calor específico del piso (J kg⁻¹ K⁻¹)

Para determinar la radiación interceptada por el piso del secador se obtiene aplicando la ley de Stefan–Boltzmann:

(9)..... $SF = G_s(A_f \tau_c)$

Donde:

 τ_c : es la transmisividad solar de la cubierta

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta y el aire dentro del secador se utilizó uno propuesto en la literatura por Kindelan (Kindelan, 1980), modificando los coeficientes debido a que en esta investigación la cubierta el policarbonato y no es plástico de invernadero.

(10)..... $h_{f-a} = 1.52(T_f - T_a)^{0.3} + 6.2(\frac{u}{L})^{0.5}$

donde u es la velocidad promedio del aire dentro del secador (m s⁻¹) y L es la longitud característica del piso del secador (m).

Y para encontrar la cantidad de calor transferido por convección entre el piso del secador y el aire dentro del secador se utiliza la formula.

(11)......
$$Q_{f-a} = h_{f-a} * A_f (T_f - T_a)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección del piso del secador y el suelo abajo de él se propone utilizar la siguiente ecuación:

(12)..... $h_{f-g} = 1.9 + (T_f - T_g)^{0.72}$

Donde T_g es la Temperatura del suelo abajo del secador (K)

Y para encontrar la cantidad de calor transferido por convección entre el piso del secador y el suelo de bajo del secador se utiliza la formula.

(13).....
$$Q_{f-g} = h_{f-g} * A_f(T_f - T_g)$$

5.3.1.1.3 Balance de energía del aire dentro del secador

Para realizar el balance de energía del aire del secador se aplicó la primera ley de la termodinámica, para sistemas abiertos (volúmenes de control) donde la tasa

de acumulación de energía térmica en el aire = el flujo de energía térmica de entrada - el flujo de energía térmica de entrada - la tasa de energía térmica entre el piso del secador y el aire dentro del secador por medio de convección - la tasa de energía térmica entre la cubierta y el aire dentro del secador por medio de convección - la tasa de energía térmica entre el producto y el aire dentro del secador por medio de convección - la tasa de energía térmica que se utiliza para evaporar el agua del producto + la tasa de energía solar que entra al sistema mediante la radiación que pasa a través de la cubierta de policarbonato

La ecuación del balance de energía en el aire dentro del secador queda de la forma:

(14).....
$$m_a C_a \frac{dT_a}{dt} = \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s - Q_{f-a} - Q_{c-a} - Q_{p-a} - K \frac{dM_p}{dt} + ((G_s + G_{sky})(A_c \tau_c))$$

Donde:

me : flujo másico de entrada al sistema

 h_e : Entalpia de entrada al sistema

 \dot{m}_s : flujo masico de salida del sistema

- h_s : Entalpia de salida del sistema
- Q : calor neto

En donde se puede calcular el flujo másico de entrada con la siguiente ecuación

 $(15)\dots \dot{m}_e = \rho_e V_e A_e$

Donde:

 ρ_{e} densidad del aire de entrada

 V_e : Velocidad del aire de entrada

 A_e : Área de entrada de aire

En donde se puede calcular el flujo másico de salida con la siguiente ecuación

(16)..... $\dot{m}_s = \rho_s V_s A_s$

Donde:

 ρ_{s} densidad del aire de salida

 V_s : Velocidad del aire de salida

 A_s : Área de salida de aire

Para calcular la entalpia de entrada y de salida se necesita la temperatura ambiente y la temperatura dentro del secador.

(17)...... $h_e = 1000 * T_{am}$ $h_s = 1000 * T_a$ (J)

Donde:

M_a : masa del aire (kg)

Ca : Calor específico del aire(J kg⁻¹ K⁻¹)

Para determinar el calor neto (Q) se considera el calor que sale y el calor que entra al sistema

(18)..... $Q = Q_s - Q_e$

Donde :

 Q_s : calor que sale del sistema

 Q_e : calor que entra al sistema

El calor que entra al sistema se da mediante la radiación que pasa a través de la cubierta de policarbonato, la cual se puede representar con la siguiente ecuación.

(19).....
$$Q_e = (G_s + G_{sky})(A_c\tau_c)$$

El calor que se pierde o que sale del sistema es por efecto de la convección y el calor latente de vaporización, la cual podemos obtener con la siguiente ecuación.

(20).....
$$Q_s = Q_{f-a} + Q_{c-a} + Q_{p-a} + K \frac{dM_p}{dt}$$

Donde:

K: es el calor latente de evaporación del agua (J/Kg)

Para poder calcular el calor latente de evaporación se ocupó la ecuación propuesta por Smolik (Smolink, Dzumbava, Schwaz, & Kulmala, 2001).

(21).....
$$K = (3470.2 - 5.7352T_a + 1.1687 \times 10^{-2}T_a^2 - 1.3478 \times 10^{-5}T_a^3) \times 10^3$$

5.3.1.1.4 Balance de energía en el producto a deshidratar

Para realizar el balance de energía en el producto del secador se aplicó la primera ley de la termodinámica donde la tasa de acumulación de energía térmica en el producto = la tasa de radiación solar absorbida por el producto que pasa a través de la cubierta de policarbonato - la tasa de energía térmica entre el producto y el aire dentro del secador por medio de convección - la tasa de energía térmica entre la cubierta y el aire dentro del secador por medio de convección - la tasa de energía térmica que el producto pierde por medio de radiación - la tasa de energía térmica que se utiliza para evaporar el agua del producto.

(22).....
$$M_p C_p \frac{dT_p}{dt} = SP + Q_{p-a} - \dot{Q}_p - K \frac{dM_p}{dt}$$

Donde:

M_f : masa del del producto (kg)

C_f : Calor específico del producto (J/kg.K)

T_p: temperatura del producto (K)

Para determinar la radiación interceptada por el producto dentro del secador se obtiene aplicando la ley de Stefan–Boltzmann y se aplicó la siguiente ecuación:

$$(23)\dots SP = G_s(A_p\tau_c)$$

Donde: A_p : Área del producto (m²)

Para determinar E_{in_conv} se consideró el uso de la ley de Newton de enfriamiento, en la cual dice que la cantidad de calor transferido por convención entre una superficie y un fluido es el producto de su coeficiente de transmisión por convección, el área de la superficie y la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección del producto y el aire dentro del secador se propone uno en base a lo utilizó en la literatura (Kindelan, 1980) para la convección de suelo y aire en un invernadero.

(24).....
$$h_{p-a} = 1.52(T_p - T_a)^{0.3} + 2(\frac{u}{p})^{1.5}$$

donde u es la velocidad promedio del aire dentro del secador (m s⁻¹) y P es el espesor del producto dentro del secador (m).

Y para estimar la cantidad de calor transferido por convección entre el producto dentro del secador y el aire dentro del secador se utiliza la formula.

(25).....
$$Q_{p-a} = h_{p-a} * A_p (T_p - T_a)$$

Para determinar la razón neta de transferencia de calor por radiación se obtiene aplicando la ley de Stefan–Boltzmann:

(26)..... $\dot{Q}_p = \varepsilon_p \sigma A_p (T_p^4 - T_a^4)$
Para determinar la energía que se ocupa para poder evaporar el agua del producto conocido como el calor latente de evaporación y se calcula:

(27).....
$$E_{out\,conv} = K \frac{dM_p}{dt}$$

5.3.1.2 Balance de materia en el producto

Para llevar a cabo el balance de materia en el secador, se identificaron un sistema (i) la masa del producto en el deshidratador

a el componente se le considero el siguiente supuesto:

El sistema es homogéneo, así que las propiedades del sistema no varían con la posición.

Para realizar el balance de masa en el producto (Doran, 2013) que se deshidrata en el secador se aplicó la ley de la conservación de la masa.

Se aplicó la ecuación general de material en estado no estacionario

$$\frac{dM}{dt} = \dot{M}_i - \dot{M}_o + R_g - R_c$$

Donde \hat{M}_i representa la tasa de material por unidad de tiempo (MT⁻¹) que entra al sistema, \hat{M}_o (MT⁻¹), representa la tasa de material que sale del sistema, R_g (MT⁻¹) es la tasa de generación de material dentro del sistema y R_c (MT⁻¹) la tasa de consumo de material dentro del sistema.

5.3.1.2.1 Masa del producto dentro del secador

El proceso de secado en un producto depende de la difusión de agua. La difusión en un proceso de secado es un mecanismo complejo que involucra la fase líquida y de vapor del agua y es una función de la temperatura, la presión y los parámetros del producto (Nidhul, Kumar, Yadav, & Anish, 2020), en esta investigación, el proceso de deshidratado de tomate se considera como una relación de la diferencia de presión de vapor en el ambiente y en el producto.

Para el caso del producto que se deshidrata se ocupará la siguiente formula debido a que considerando el producto nuestro sistema de análisis, no entra materia, no se genera materia y el sistema no está consumiendo materia, solo está saliendo material del sistema, por lo tanto, la formula quedaría como:

(28).....
$$\frac{dM_p}{dt} = -A_p E(\frac{e_{ps}-e_a}{170})$$

Analizando la masa que sale del sistema se observa que es el agua que se evapora debido al calor latente de evaporación, por lo que se puede usar la presión de saturación del vapor y determinar un coeficiente de deshidratación para cada producto.

Donde:

E : coeficiente de deshidratación del producto (s⁻¹)

 e_{ps} : presión de vapor saturado estimado a la temperatura del producto (Pa)

 e_a : presión de vapor saturado estimado a la temperatura del aire dentro del secador (Pa)

Para calcular el coeficiente de deshidratación del tomate se propone usar la ecuación siguiente (Abdel-Ghany & Kozai, 2006):

(29)..... $E = (1.5 + 1.6 x 10^{-2} G_s \tau_c) x 10^{-8}$

Donde:

M_p : masa del producto (kg)

Para calcular la presión de vapor saturado del aire se utilizó la ecuación:

(30)..... In
$$e_a = \frac{c_1}{T_a} + C_2 + C_3 T_a + C_4 T_a^2 + C_5 T_a^3 + C_6 In(T_a)$$

Para calcular la presión de vapor saturado del producto se utilizó la ecuación:

(31)..... In
$$e_{ps} = \frac{c_1}{T_a} + C_2 + C_3 T_p + C_4 T_p^2 + C_5 T_p^3 + C_6 In(T_p)$$

Donde :

 $\begin{array}{l} C_1 = -5800.2206 \\ C_2 = 1.3914993 \\ C_3 = -0.048640239 \\ C_4 = 0.000041764768 \\ C_5 = -0.00000014452093 \\ C_6 = 6.5459673 \end{array}$

El contenido de humedad del jitomate en base húmedad (M_{wb}) en porciento se determinó con la ecuación (1), el peso de materia seca en kg (W_d) se obtuvo mediante un proceso de secado en donde las muestras se colocaron en una estufa eléctrica a 105 °C durante 24 horas (Badaoui et al., 2019).

$$M_{wb} = \left(\frac{W_o - W_d}{W_o}\right) * 100\tag{1}$$

Donde W_o es el peso de la muestra húmeda (kg)

5.3.2 Descripción del sistema secador solar tipo invernadero y experimento de secado

Los experimentos de secado de las rebanadas de jitomate se llevaron a cabo en un secador tipo invernadero de 108 m² (9 m de ancho ×12 m de longitud), localizado en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México. Ubicación geográfica 19° 29' N, 98°, 53' O, a una altitud de 2240 m. La orientación (azimut) del secador es 45° E con respecto al eje Norte-Sur, tiene una cubierta de doble capa de policarbonato de 6 mm de espesor con tratamiento contra rayos ultravioleta, cuenta con 18 mesas de 1.8 m x 2 m y cada mesa con la capacidad de 6 charolas de 1.8 m x 1m, con dos charolas por nivel y piso de concreto (figura 5-1).



Figura 5-1 Esquema del sistema secador solar tipo invernadero construido en la Universidad Autónoma Chapingo.

El sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI) tiene un gran potencial, ya que puede ser usado a escala industrial debido a su capacidad de procesamiento (Garduño-García et al., 2017).

Para estudiar el comportamiento del modelo dinámico se realizó un experimento con rodajas de tomate de 5 mm de espesor, se ingresaron 100 kilogramos de tomate al interior del secador (Figura 5-2). Se colocaron 4 muestras distribuidas al interior del secador, las cuales fueron pesadas cada 30 minutos en una báscula VELAB. El experimento de secado se llevó a cabo el 6 de febrero de 2020 y se dio por iniciado a las 7:00 a.m.



Figura 5-2 Experimento de deshidratado con rebanadas de tomate en el secador solar tipo invernadero.

Para obtener los datos de las variables de entrada del modelo se utilizaron dos estaciones Campbell CR1000. Una se localizó en el centro del secador y la otra a 10 metros fuera del secador. Se usó un tiempo de muestreo de un minuto. Los sensores fueron colocados en las posiciones como se muestra en la figura 5-1, Las mediciones de la radiación solar las cuales se llevaron a cabo con el piranómetro CMP11 tuvieron una incertidumbre de \pm 10 W m⁻², para las mediciones de humedad relativa y temperatura del medio ambiente se utilizó un sensor de la marca VAISALA HMP60 con una incertidumbre ± 3 % RH en el rango de 0 a 90 % RH y para el caso de la temperatura una incertidumbre de ± 0.5 °C para un rango de 0 a 40°C, para las mediciones de la velocidad afuera del secador se utilizó un sensor YOUNG 05305-L que tiene una incertidumbre de

 $\pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$ en un rango de 0 a 50 m s⁻¹, para la temperatura y la humedad relativa dentro del secador se utilizaron sensores Cs 215-L que para un rango de 0 a 90% RH tienen una incertidumbre en sus mediciones $\pm 2\%$ RH y para el rango de -40 °C a +70 °C tiene una incertidumbre de ± 0.9 °C, las mediciones de velocidad del viento que se hicieron al interior del secador fueron hechas por un sensor WindSonic4 que en el rango de 0 a 60 m s⁻¹ tiene una incertidumbre de $\pm 2\%$ y por último para medir la masa de las muestras de tomate de llevó a cabo con una báscula VELAB la cual tiene una incertidumbre de ± 0.01 gr.

5.3.3 Simulación o solución numérica del modelo dinámico

El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden es no lineal y por lo tanto fueron resueltas numéricamente. El modelo matemático fue programado en el ambiente de simulación Simulink. Y se usó el método de integración con tamaño de paso variable de Dormund-Prince (ode45) con una tolerancia relativa de 10⁻⁸ y una tolerancia absoluta de 10⁻¹⁰.

5.3.4 Proceso de evaluación

Para evaluar el modelo dinámico se llevó a cabo un análisis de la predicción de la temperatura del aire dentro del secador, así como la temperatura de la cubierta del secador, la temperatura del piso del secador y el contenido de humedad del tomate con respecto a los datos experimentales que se obtuvieron durante el proceso de secado. La evaluación del modelo se realizó utilizando el valor del error cuadrático medio (RMSD) (S. Janjai et al., 2009):

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (Y_{pre,i} - Y_{meas,i})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^{N} Y_{meas,i}}{N}} x \ 100$$

Donde :

 $Y_{pre,i}$ es el valor predicho de la variable Y

 $Y_{meas,i}$ es el valor medido de la variable Y

N es el número total de puntos de datos

5.4 Resultados y discusión

5.4.1 Resultados experimentales

Los datos recopilados durante el periodo de secado de tomate se pueden observar en la figura 3 la variación de la radiación solar, en donde el experimento empezó a las 7 a.m. la radiación es cercana a los 0 W m⁻² y después de 11 horas de experimento termino a las 6 p.m. siendo a las 12:30 p.m. la hora con mayor radiación solar con un valor de 780 W m⁻².

En la figura 5-4 se muestra la comparación de la temperatura del aire dentro y fuera del secador, adentro del secador se midieron en tres puntos diferentes distribuidas como se muestra en la figura $1(T_{a1}, T_{a2} \ y \ T_{a3})$ y en la parte de afuera un punto (T_{amb}), en la gráfica se presenta el promedio de las tres temperaturas, se puede observar que al inicio del experimento el secador se encuentra a 12 °C y después de 4 horas de experimento a las 11:00 a.m. el secador supera los 50 °C, mientras que la temperatura ambiente se mantuvo alrededor de los 25 °C, lo cual nos da una diferencia de más de 25 °C las temperaturas del aire.



Figura 5-3 radiación solar durante el experimento



Figura 5-4 Comparación de temperatura dentro y fuera del secador durante el experimento de secado

En la figura 5-5 podemos observar el comportamiento que tuvo la Humedad relativa adentro y afuera del secador, adentro del secador se midió en dos puntos (RH₁ y RH₂) y en la parte de afuera del secador en un punto (RH_{amb}), como se aprecia en la figura 5-5 la humedad relativa afuera es mayor que la que se presentó al interior del secador, esto se debe a que la temperatura del exterior es más baja que la que se encuentra dentro del secador y la humedad relativa depende en parte a la temperatura del aire.



Figura 5-5 Humedad Relativa dentro y fuera del secador

En la figura 5-6 se muestra el comportamiento que tuvo la velocidad del aire afuera y adentro del secador, se observa como en la parte interior la velocidad del aire se encuentra muy cercana a cero, solo después de 6 horas de comenzado el experimento se nota que la velocidad del aire al interior del secador empieza a incrementar y se le atribuye a un aumento de temperatura en el aire, con lo que se consigue un cambio de presión que permite tener un flujo de aire mayor.



Figura 5-6 Velocidad del aire dentro y fuera del secador

El contenido de humedad de las cuatro muestras que se colocaron en el secador se puede observar en la figura 5-7, las muestras colocadas espacialmente en el secador se comportan de manera similar, por lo que el supuesto de que la deshidratación del tomate dentro del secador es homogénea es aceptado. El contenido de humedad del tomate en el secador solar fue reducido de un 95 % (wb) a un valor final después de 11 horas de secado de 21 % (wb).



Figura 5-7 Variación del contenido de humedad de las muestras de tomate deshidratado en el secador solar tipo invernadero.

5.4.2 Resultados de la simulación

Para evaluar el modelo, se compararon los valores obtenidos experimentalmente de la temperatura del aire dentro del secador, la temperatura de la cubierta del secador, la temperatura del piso del secador y la masa del tomate con los valores predichos por el modelo dinámico que en esta investigación se propone.

En la figura 5-8 se muestra la comparación entre lo predicho por el modelo propuesto en este trabajo y la temperatura de la cubierta medida durante el experimento de secado de las rebanadas de tomate llevado a cabo el 6 de febrero

de 2020. La temperatura simulada muestra un comportamiento semejante a la medida y la concordancia entre los valores previstos y observados es razonable.



Figura 5-8 comparación entre la temperatura de la cubierta del secador simulada y observada durante el deshidratado de tomate

En la figura 5-9 se muestra una comparación de las temperaturas del aire al interior del secador simuladas y medidas. Las predicciones del modelo dinámico para el secado de las rebanadas de tomate se evaluaron mediante la estadística de diferencia cuadrática media (RMSD).



Figura 5-9 comparación entre la temperatura del aire dentro del secador simulada y observada durante el deshidratado de tomate

En la figura 5-10 se muestra una comparación de las temperaturas del piso del secador que se obtuvieron mediante la simulación del modelo dinámico y las medidas en el experimento de secado de tomate. Se evaluaron mediante la estadística de diferencia cuadrática media (RMSD) para evaluar que ajuste tiene el modelo propuesto con respecto a las mediciones experimentales. La figura 5-11 muestra el comportamiento de la temperatura del tomate dentro del secador, calculada por el modelo dinámico.



Figura 5-10 comparación entre la temperatura del piso del secador simulada y observada durante el deshidratado de tomate



Figura 5-11 temperatura del tomate simulada durante el deshidratado de tomate

La masa del tomate dentro del secador se muestra en la figura 5-12, como van de un peso inicial de 100 kg a una masa final de aproximadamente 5 kg, la comparación de las masas mediante la simulación del modelo dinámico y las medidas en el experimento se evaluaron mediante la estadística de diferencia cuadrática media (RMSD). Y con los datos obtenidos de masa pérdida se obtuvo la figura 5-13 que muestra las diferencias en el contenido de humedad del tomate simulado y medido.



Figura 5-12 Comparación del comportamiento de la masa del tomate simulada y observada durante el deshidratado de tomate



Figura 5-13 comparación entre el contenido de humedad del tomate simulada y observada durante el deshidratado de tomate

Aunque existen ligeras discrepancias entre las mediciones en el experimento y lo predicho con el modelo, la RMSD de la predicción para el caso de la temperatura de la cubierta del secador es del 9.02 %, la predicción para el caso de la temperatura del aire dentro del secador 6.26 %, la predicción para el caso de la temperatura del piso del secador 6.13 % y para el caso de la predicción del contenido de humedad en el tomate es del 10 %.

Este estudio indica que el modelo puede predecir las temperaturas con una precisión razonable. Además, las predicciones están dentro del límite aceptable (10%) (O'Callaghan, Menzies, & Bailey, 1971).

Otras investigaciones han encontrado RMSD de 9 % en la predicción del contenido de humedad del plátano (S. Janjai et al., 2009), RMSD de 12.9 % para chile, RMSD de 12.9 % para café (Serm Janjai et al., 2011), RMSD de 1.9 % para macadamia (S. Janjai et al., 2014).

5.5 Conclusiones

Hay una diferencia significativa en las temperaturas dentro del secador con las temperaturas del aire ambiente con una diferencia de más de 25 °C.

Las pruebas durante la experimentación demostraron el potencial para deshidratar rebanadas de tomate en el secador solar tipo de invernadero.

Se desarrolló un sistema de ecuaciones diferenciales parciales para la transferencia de calor y masa en el secado solar de rebanadas de tomate en un secador solar tipo invernadero.

Las variables simuladas dentro del secador coincidieron razonablemente con los datos experimentales observados. El valor del error cuadrático medio de la predicción para el caso de la temperatura de la cubierta del secador es del 9.02 %, para el caso de la temperatura del aire dentro del secador 6.26 %, para el caso de la temperatura del secador 6.13 % y para el caso de la predicción del contenido de humedad en el tomate es del 10 %.

El nuevo enfoque de pérdida de masa del producto a deshidratar por medio de la presión se vapor de saturación del producto y el ambiente funciono, ya que se comporta de forma similar a el enfoque clásico por medio de la ley de difusión de Fick.

Es necesario hacer un análisis de sensibilidad local y global para medir los parámetros más influyentes en el modelo para hacer una estimación de parámetros, ajustar los parámetros más influyentes para obtener un mejor ajuste en las simulaciones.

6.-LITERATURA CITADA

- Abdel-Ghany, A. M., & Kozai, T. (2006). Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renewable Energy*, *31*(10), 1521–1539. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.07.013
- Abunde Neba, F., & Jiokap Nono, Y. (2017). Modeling and simulated design: A novel model and software of a solar-biomass hybrid dryer. *Computers and Chemical Engineering*, 104, 128–140. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.04.002
- Aguado-Behar, A., & Martínez-Iranzo, M. (2003). *Identificación y control adaptativo*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Akamphon, S., Sukkasi, S., & Sedchaicharn, K. (2018). An integrated heattransfer-fluid-dynamics-mass-transfer model for evaluating solar-dryer designs. *journal of food processing and preservation*, (March), 1–9. https://doi.org/10.1111/jfpp.13649
- Akharume, F., Adeyemi, S., & Obayopo, S. (2019). A study on the numerical simulations and experimental validation of a hybrid solar dryer for cocoa. *Journal of Postharvest Technology*, (March 2020). https://doi.org/10.13031/aim.201900890
- Akhijani, H. S., Arabhosseini, A., & Kianmehr, M. H. (2016). Effective moisture diffusivity during hot air solar drying of tomato slices. *Research in Agricultural Engineering*, 62(1), 15–23. https://doi.org/10.17221/33/2014-RAE
- Akpinar, E. Kavak, & Bicer, Y. (2008). Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1367–1375. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.004
- Akpinar, Ebru Kavak. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73(1), 75–84. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.007

- Ameri, B., Hanini, S., Benhamou, A., & Chibane, D. (2018). Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation. *Solar Energy*, *159*(November 2017), 722–732. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.032
- Arepally, D., Ravula, S. R., & Reddy, V. (2017). Mathematical modelling of mixed mode natural convection solar drying of tomato slices. *International Journal* of Chemical Studies, 5(4), 1274–1279. Recuperado de http://www.chemijournal.com/
- Atalay, H., Turhan Çoban, M., & Kıncay, O. (2017). Modeling of the drying process of apple slices: Application with a solar dryer and the thermal energy storage system. *Energy*, *134*, 382–391. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.030
- Badaoui, O., Hanini, S., Djebli, A., Haddad, B., & Benhamou, A. (2019). Experimental and modelling study of tomato pomace waste drying in a new solar greenhouse: Evaluation of new drying models. *Renewable Energy*, 133, 144–155. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.020
- Bagheri, H., Arabhosseini, A., Kianmehr, M. H., & Chegini, G. R. (2013).
 Mathematical modeling of thin layer solar drying of tomato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *15*(1), 146–153. Recuperado de https://cigrjournal.org
- Bala, B. K. (1998). *Solar drying systems: simulations and optimization*. India: Agrotech Publishing Academy.
- Bala, B. K., Ashraf, M. A., Uddin, M. A., & Janjai, S. (2005). THE PERFORMANCE OF A SOLAR TUNNEL DRIER FOR DRYING JACKFRUIT BULBS AND LEATHER. *Journal of Food Process Engineering*, *28*, 552–566.
- Bala, B. K., & Janjai, S. (2013). Solar drying of agricultural products. *Stewart Postharvest Review*, *9*(2). https://doi.org/10.2212/spr.2013.2.4

- Bala, B. K., & Woods, J. L. (1995). Optimization of natural-convection, solar drying systems. *Energy*, 20(4), 285–294. https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)00083-F
- Batista, L., Djermoune, E. H., & Bastogne, T. (2017). Identification of dynamical systems population described by a mixed effect ARX model structure. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 13516–13520. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2342
- Belghith, A., Azzouz, S., & ElCafsi, A. (2016). Desorption isotherms and mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 52(3), 407–419. https://doi.org/10.1007/s00231-015-1560-0
- Can, A. (2000). Drying kinetics of pumpkinseeds. *Int. J. Energy Res*, 24(October 1999), 965–975.
- Castañeda Miranda, A., González Parada, A., Guzmán Cabrera, R., & Ibarra Manzano, O. G. (2012). Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. *Acta Universitaria*, *22*(3), 14–19. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=416/41622592002
- Dhalsamant, K., Tripathy, P. P., & Shrivastava, S. L. (2018). Heat transfer analysis during mixed-mode solar drying of potato cylinders incorporating shrinkage:
 Numerical simulation and experimental validation. *Food and Bioproducts Processing*. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.03.005
- Dhanushkodi, S., Wilson, V. H., & Sudhakar, K. (2014). Thermal Performance
 Evaluation of Indirect Forced Cabinet Solar Dryer for Cashew Drying. J.
 Agric. & Environ, 14(11), 1248–1254.
 https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2014.14.11.21871
- Dhanushkodi, S., Wilson, V. H., & Sudhakar, K. (2017). Mathematical modeling of drying behavior of cashew in a solar biomass hybrid dryer. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 359–364.

https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.12.002

- Diamante, L. M., & Munro, P. A. (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. Solar Energy, 51(4), 271–276. https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90122-5
- Djebli, A., Hanini, S., Badaoui, O., & Boumahdi, M. (2019). A new approach to the thermodynamics study of drying tomatoes in mixed solar dryer. *Solar Energy*, *193*(February), 164–174. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.057
- Doymaz, I. (2007a). Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 591–596. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.037
- Doymaz, I. (2007b). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 243–248. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.049
- Doymaz, I., Kipcak, A. S., & Piskin, S. (2015). Characteristics of thin-layer infrared drying of green bean. *Czech Journal of Food Sciences*, *33*(1), 83–90. https://doi.org/10.17221/423/2014-CJFS
- Duffie, J., & Beckman, W. (1991). Solar engineering of termal processes. New York: Wiley.
- El-Sebaii, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37–43. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134
- Erick César, L. V., Ana Lilia, C. M., Octavio, G. V., Isaac, P. F., & Rogelio, B. O. (2020). Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (Solanum lycopersicum). *Renewable Energy*, *147*, 845–855. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.018
- 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.

https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.007

- Ertekin, Can, & Firat, M. Z. (2017). A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *57*(4), 701–717. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493
- Faal, S., Tavakoli, T., & Ghobadian, B. (2015). Mathematical modelling of thin layer hot air drying of apricot with combined heat and power dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2950–2957. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1331-9
- 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. https://doi.org/10.5171/2014.515285
- FAO. (2015a). Food Losses and Waste in Latin America and the Caribbean. The countries of the region are progressing towards a future with less Food Losses and Waste. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i4655e.pdf
- FAO. (2015b). PDA en América Latina y el caribe 2015. Recuperado de https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/perdidas_y_desperdicios _de_alimenticios_en_america_latina_y_caribe.pdf
- FIRA. (2019). Panorama agroalimentario tomate rojo 2019. Recuperado de https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2019/06/Panorama-Agroalimentario-Tomate-rojo-2019.pdf
- Frausto, H. U., Pieters, J. G., & Deltour, J. M. (2003). Modelling greenhouse temperature by means of auto regressive models. *Biosystems Engineering*, 84(2), 147–157. https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00239-8
- 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, 1–30.

https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032

- Gallestey, E., & Paice, A. D. B. (1997). Mathematical modelling and optimal control of solar dryers. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 3(4), 297–322.
- Garduño-García, Á., López-Cruz, I. L., & Ruiz-García, A. (2017). Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural and forced convection for agricultural products: state of the art. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, *9*(1), 19–36. https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.02.004
- Hernández, R. J., Martínez, V. O., Quinto, D. P., Cuevas, D. J., Acosta, O. R., & Aguilar, J. (2010). Secado De Chile Habanero Con Energía Solar. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, *10*(2), 120–127. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=813/81315091008
- Hii, C. L., Law, C. L., & Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, *90*(2), 191–198. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.022
- Hossain, M. A., Gottschalk, K., & Amer, B. M. A. (2010). Mathematical modelling for drying of tomato in hybrid dryer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *35*(2 A), 239–262.
- 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*, 729–742. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.01.005
- Hussein, J. B., Filli, K. B., & Oke, M. O. (2016). Thin layer modelling of hybrid, solar and open sun drying of tomato slices. *Research Journal of Food Science and Nutrition*, 1(1), 15–27. https://doi.org/10.31248/rjfsn2016.010
- Jain, D., & Tiwari, G. N. (2004). 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.

https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.12.011

- Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar Drying Technology. *Food Engineering Reviews*, *4*(1), 16–54. https://doi.org/10.1007/s12393-011-9044-6
- 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. https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.05.003
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Haewsungcharern, M., Bala,
 B. K., & Müller, J. (2008). Finite element simulation of drying of mango. *Biosystems Engineering*, *99*(4), 523–531.
 https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.12.010
- Janjai, S., Phusampao, C., Nilnont, W., & Pankaew, P. (2014). Experimental performance of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, *5*(6), 1155–1161.
- Janjai, Serm, 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. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.09.008
- Keesman, K. J. (2011). System identification an introduction. En *Foreign Affairs*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004
- Khadraoui, A. EL, Hamdi, I., Kooli, S., & Guizani, A. (2019). Drying of red pepper slices in a solar greenhouse dryer and under open sun: Experimental and mathematical investigations. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52(April 2018), 262–270. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.01.001

Kindelan, M. (1980). Dynamic modeling of greenhouse environment. Trans

ASAE, 1232–1239.

- Koua, K. B., Fassinou, W. F., Gbaha, P., & Toure, S. (2009). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy*, 34(10), 1594–1602. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.005
- Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 346–360. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158
- Kumar, N., Sarkar, B. C., & Sharma, H. K. (2012). Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 33–41. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0266-7
- Kumar, P. A., Geetha, M., Chandran, K. R., & Sanjeevikumar, P. (2018). PEM Fuel Cell System Identi fi cation and Control (B. A. SenGupta S., Zobaa A., Sherpa K., Ed.). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-4286-7_44
- Lamrani, B., Khouya, A., & Draoui, A. (2019). Energy and environmental analysis of an indirect hybrid solar dryer of wood using TRNSYS software. *Solar Energy*, 183(February), 132–145. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.014
- Ljung, L. (1999). *System Identification theory for the user* (second; T. Kailath, Ed.). New Jersey, USA: Prentice Hall Information and System Sciences Series.
- Ljung, L., & Glad, T. (1994). *Modeling of Dynamic Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Ljung, Lennart. (1998). System identification. En A. Procházka, J. Uhlíř, P. W. J. Rayner, & N. G. Kingsbury (Eds.), *Signal Analysis and Prediction* (pp. 163– 173). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1768-8_11
- Ljung, Lennart. (2017). System Identification. En J. Webster (Ed.), Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.

https://doi.org/10.1002/047134608X.W1046.pub2

- López-cruz, I. L., Fitz-rodríguez, E., Torres-monsivais, J. C., Trejo-zúñiga, E. C., Ruíz-garcía, A., & Ramírez-arias, A. (2014). Control Strategies of Greenhouse Climate for Vegetables Production. En R. Guevara-Gonzalez & I. Torres-Pacheco (Eds.), *Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in the Century XXI* (pp. 401–421). https://doi.org/10.1007/978-3-319-03880-3
- López-Cruz, I. L., Rojano-aguilar, A., Ojeda-bustamante, W., & Salazar-Moreno, R. (2007). Modelos arx para predecir la temperatura del aire de un invernadero: una metodología. AGROCIENCIA, 41, 181–192.
- Malan, A., Kamboj, V., Sharma, A. K., & Yadav, A. (2019). Mathematical modelling of solar drying of a novel composite desiccant. *International Journal of Ambient Energy*, 40(1), 28–34. https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1360200
- Menges, H. O., & Ertekin, C. (2006a). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77(1), 119–125. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.049
- Menges, H. O., & Ertekin, C. (2006b). Modelling of air drying of Hacihaliloglu-type apricots. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(2), 279–291. https://doi.org/10.1002/jsfa.2340
- Menges, H. O., & Ertekin, C. (2006c). Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management*, 47(15–16), 2337–2348. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.11.016
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. Drying Technology, 20(7), 1503–1513. https://doi.org/10.1081/DRT-120005864

Mocelin, B., Oliveira, D. L., Chielle, D. P., Tanabe, E. H., Bertuol, D. A., Schwaab,

M., & Meili, L. (2014). Mathematical modeling of thin layer drying of papaya seeds in a tunnel dryer using particle swarm optimization method. *Particulate Science and Technology*, 32(2), 123–130. https://doi.org/10.1080/02726351.2013.839015

- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, *208*(August), 321– 344. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.098
- Mujumdar, A. s. (2007). *Handbook of industrial drying* (tercera). https://doi.org/10: 1-57444-668-1
- Nault, R. M. (2005). *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization* (Office of Science, Ed.). US Department of Energy.
- Naveros, I., Ghiaus, C., Ruíz, D. P., & Castaño, S. (2015). Physical parameters identification of walls using ARX models obtained by deduction. *Energy and Buildings*, *108*, 317–329. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.021
- Ndukwu, M. C., Simo-Tagne, M., Abam, F. I., Onwuka, O. S., Prince, S., & Bennamoun, L. (2020). Exergetic sustainability and economic analysis of hybrid solar-biomass dryer integrated with copper tubing as heat exchanger. *Heliyon*, 6(2), e03401. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03401
- Nidhul, K., Kumar, S., Yadav, A. K., & Anish, S. (2020). Computational and experimental studies on the development of an energy-efficient drier using ribbed triangular duct solar air heater. *Solar Energy*, *209*(May), 454–469. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.012
- O'Callaghan, J. R., Menzies, D. J., & Bailey, P. H. (1971). Digital simulation of agricultural drier performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *16*(3), 223–244. https://doi.org/10.1016/S0021-8634(71)80016-1

Papadakis, G., Frangoudakis, A., & Kyritsis, S. (1992). Forced and free

convection heat transfer at greenhouse cove. J Agric Eng Res, 51, 191–205.

- Pardeshi, I. L., Arora, S., & Borker, P. A. (2009). Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. *Drying Technology*, 27(2), 288–295. https://doi.org/10.1080/07373930802606451
- Parzinger, M., Hanfstaengl, L., Sigg, F., Spindler, U., Wellisch, U., & Wirnsberger, M. (2020). Residual analysis of predictive modelling data for automated fault detection in building's heating, ventilation and air conditioning systems. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(17). https://doi.org/10.3390/SU12176758
- Patil, S. L., Tantau, H. J., & Salokhe, V. M. (2008). Modelling of tropical greenhouse temperature by auto regressive and neural network models. 99, 423–431. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.11.009
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014). ANFIS modelling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: An experimental validation. *International Journal of Sustainable Energy*, 33(2), 316–335. https://doi.org/10.1080/14786451.2012.724070
- Prakash, O., & Kumar, A. (2017). solar drying technology: concept, design, testing, modeling, economics, and environment. En Green Energy and Technology. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4_9
- Prakash, O., Kumar, A., & Laguri, V. (2016). Performance of modified greenhouse dryer with thermal energy storage. *Energy Reports*, 2, 155–162. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.06.003
- Rachad, S., Nsiri, B., & Bensassi, B. (2015). System Identification of Inventory System Using ARX and ARMAX Models. *International Journal of Control and Automation*, 8(12), 283–294. https://doi.org/10.14257/ijca.2015.8.12.26
- Romero-Hernández, S., Rodríguez-Granada, B. D., Romero-Hernández, O.,
 Wood, D. (2012). Solar Energy Potential in Mexico's Northern Border States.
 Washington DC: Woodrow Wilson International Center for Scholars.

- 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. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.025
- SAGARPA. (2014). Frutas Guayaba Guayaba. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/66023/MC_guayaba_septi embre_2015.pdf
- Sahdev, R. K., Kumar, M., & Dhingra, A. K. (2017). Development of empirical expression for thin layer groundnut drying under open sun and forced convection modes. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(4), 152–158. Recuperado de https://cigrjournal.org
- Salcedo, J., Feliu, V., & Rivas, R. (2020). State Feedback Temperature Control Based on a Smith Predictor in a Precalciner of a Cement Kiln. *IEEE Latin America Transactions*, *100*, 1–8.
- Sámano-Delgado, E., Martinez-flores, H. E., Garnica-romo, M. A. G., Arandasanchez, J. I., Sosa-aguirre, C. R., Cortés-penagos, C. D. E. J., & Fernándezmuñoz, J. L. (2012). OPTIMIZATION OF SOLAR DRYER FOR THE DEHYDRATION OF. *Journal of Food Processing and Preservation*, (1), 1–7. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00668.x
- Sánchez, J. A., Rodríguez, F., Guzmán, J. L., Ruiz Arahal, M., & Fernández, M.
 D. (2011). Modelling of tomato crop transpiration dynamics for designing new irrigation controllers. *Acta Horticulturae*, *893*, 729–738. https://doi.org/10.17660/actahortic.2011.893.78
- SEDESOL. (2013). Comunicado de Prensa Núm. 524/141113. Recuperado de www.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Sala_Prensa/Comunicados/p df/141113-Desperdicio_alimentos.pdf
- Serm Janjai, Jagrapan Piwsaoad, Wanich Nilnont, & Prasan Pankaew. (2015). Experimental Performance and Neural Network Modeling of a Large-scale Greenhouse Solar Dryer for Drying Natural Rubber Sheets. *J. of Control*

Science and Engineering, *3*(1), 48–53. https://doi.org/10.17265/2328-2231/2015.01.006

- Sethi, V. P., & Arora, S. (2009). Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection. *Solar Energy*, 83(9), 1472–1484. https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.04.001
- Şevik, S., Aktaş, M., Dolgun, E. C., Arslan, E., & Tuncer, A. D. (2019). Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. *Solar Energy*, *180*(January), 537– 549. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.049
- Shiva, K. M., B, D., & M, B. (2015). An Experimental Study on Drying Kinetics of Guava Fruit (Psidium Guajava L) By Thin Layer Drying. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*, 9(1), 74–80. https://doi.org/10.9790/2402-09117480
- Shravya, K., Renu, R., & Srinivas, M. (2019). Study on Drying Characteristics of Guava Leaves. J Food Process Technol, 10(4), 1–9. https://doi.org/10.4172/7110.1000785
- Silva, G. M. da, Ferreira, A. G., Coutinho, R. M., & Maia, C. B. (2020). Thermodynamic analysis of a sustainable hybrid dryer. *Solar Energy*, *208*(August), 388–398. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.014
- Simo-Tagne, M., Zoulalian, A., Rémond, R., & Rogaume, Y. (2018). Mathematical modelling and numerical simulation of a simple solar dryer for tropical wood using a collector. *Applied Thermal Engineering*, 131, 356–369. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.014
- Singh, G., Pal, P., Pal, P., Lubana, S., & Singh, K. G. (2006). Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy*, 31, 1541–1560. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.07.011

- Smitabhindu, R., Janjai, S., & Chankong, V. (2008). Optimization of a solarassisted drying system for drying bananas. *Renewable Energy*, 33, 1523– 1531. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.021
- Smolink, J., Dzumbava, L., Schwaz, J., & Kulmala, M. (2001). Evaporation of ventilated water droplet: connection between heat and mass transfer. *Aerosol Sci*, 32, 739–748.
- Tiwari, S., & Tiwari, G. N. (2016). Thermal analysis of photovoltaic-thermal (PVT) single slope roof integrated greenhouse solar dryer. *Solar Energy*, *138*(February), 128–136. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.014
- Toğrul, H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. Journal ofFoodEngineering,77(3),610–619.https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.020
- Togrul, I. T., & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65, 413–425. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001
- Udomkun, P., Romuli, S., Schock, S., Mahayothee, B., Sartas, M., Wossen, T.,
 … Müller, J. (2020). Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa : An innovation landscape approach. *Journal of Environmental Management*, 268, 110730. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730
- Van Straten, G., & Van Henten, E. J. (2010). Optimal Greenhouse Cultivation Control: Survey and Perspectives. *IFAC Proceedings Volumes*, *43*(26), 18– 33. https://doi.org/10.3182/20101206-3-JP-3009.00004
- Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., Henten, E. J. Van, & Visser, P. H. B. De. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems Engineering*, *110*(4), 363–377. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001

- Vásquez, J., Reyes, A., Mahn, A., & Cubillos, F. (2016). Experimental evaluation of fuzzy control solar drying with thermal energy storage system. *Drying Technology*, 3937(March). https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1137001
- Vásquez, J., Reyes, A., & Pailahueque, N. (2019). Modeling, simulation and experimental validation of a solar dryer for agro-products with thermal energy storage system. *Renewable Energy*, *139*, 1375–1390. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.085
- Voinov, A. (2008). Systems Science and Modeling for Ecological Economics (First). London, UK: Elsevier.
- Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., & Hu, X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air predrying. *Journal of Food Engineering*, *80*(2), 536–544. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.019
- Yaldiz, O., Can, E., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, *26*, 457–465.
- Zhou, Z., Fu, L., & Liang, C. (2019). Grey-box Based Sliding Mode Controller for Rice Seed Soaking and Germination Grey-box Based Sliding Mode Controller for Rice Seed Soaking and Germination Device for Rice Seed Soaking and Germination Grey-box Based Sliding Mode Controller. *IFAC PapersOnLine*, *52*(30), 51–55. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.488
- Zhou, Z., Zhang, P., Huai, B., & Huang, L. (2019). System Identification of Wood Drying Process Based on ARMAX Model. *Agricultural Sciences*, *10*, 241– 248. https://doi.org/10.4236/as.2019.103020