

Implementación del secador solar de túnel tipo Hohenheim en productos agrícolas: Revisión de literatura

Implementation of the solar tunnel dryer Hohenheim type in agricultural products: Literature Review

Pedro Julián García Guarín¹ Sonia Lucía Rincón Prat² Sandra Patricia Cuervo Andrade³

¹Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador del Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos – BIOT, pjgarcia@unal.edu.co

²Doctora en Ingeniería de la Universidad de Kassel – Alemania. Profesora Asociada Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Universidad Nacional de Colombia. Directora Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos – BIOT, slrincomp@unal.edu.co

³Doctora en Ciencias de la Agricultura de la Universidad de Kassel – Alemania. Profesora Universidad Pontificia Bolivariana – Bucaramanga, sandra.cuervo@upb.edu.co

Recibido: Mayo 26 de 2016 - Aceptado: Agosto 19 de 2016

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v10n1.a01>

Resumen- El secador de túnel tipo Hohenheim fué desarrollado en la Universidad de Hohenheim (Alemania) a mediados de los años 1980. Gracias a su facilidad de construcción y operación este secador ha sido usado de manera exitosa para el secado de gran variedad de productos agrícolas en países ubicados en zonas tropicales. El presente artículo presenta una revisión bibliográfica de trabajos experimentales publicados sobre la implementación de estos secadores. Se presentan las características principales del secador en relación a sus componentes, su configuración geométrica y materiales así como las modificaciones realizadas al diseño original. Así mismo, se presentan los parámetros de operación utilizados en el secado de una gran variedad de productos agrícolas y los valores de eficiencia para el secador y sus componentes individuales. Los valores reportados se organizan de manera tabular con el propósito de facilitar la comparación y evaluación del desempeño de estos secadores en diferentes productos agrícolas. La información presentada constituye una herramienta para la planeación y diseño de nuevos secadores de este tipo y para la evaluación del desempeño térmico de secadores existentes.

Palabras claves: Secador solar de túnel, energía solar, eficiencia térmica, secado, productos agrícolas.

Abstract- The Hohenheim-type solar dryer was developed in the University of Hohenheim (Germany) in the mid – 1980s. Thanks to its ease of construction and operation, the drier has

been successfully used for drying a great variety of agricultural products in countries located in tropical areas. This article presents a literature review of published experimental work on the implementation of this kind of dryers. The main features of the dryer in relation to its components, their geometric configuration and materials as well as changes made to the original design are presented. The operating parameters used in drying a variety of agricultural products and the efficiency values for the dryer and its individual components are presented as well. The values are organized in tabular form in order to facilitate the comparison and evaluation of performance of this dryer in different agricultural products. The information presented is a tool for planning and designing new dryers of this type and for evaluating the thermal performance of existing dryers.

Keywords: Tunnel solar dryer, solar energy, thermal efficiency, drying, agricultural products

I. INTRODUCCIÓN

El secado de productos agrícolas es un proceso de gran importancia ya que por medio de éste se preserva la calidad y se da valor agregado a los productos. Este proceso, es el de mayor requerimiento energético en la cadena productiva de productos agrícolas y si se realiza bajo condiciones inadecuadas afecta negativamente las

propiedades de los productos a secar. En países en vías de desarrollo y de economías emergentes, debido a la falta de desarrollo del sector de pos-procesamiento, la comercialización de productos agrícolas se realiza principalmente con productos en fresco lo cual conlleva a que el producto que no se comercializa se pierda o se venda a precios no competitivos. Adicionalmente los procesos de secado son altamente ineficientes y los productos obtenidos no cumplen con parámetros de calidad para su comercialización, principalmente a nivel internacional. Tradicionalmente, el secado con energía solar es uno de los procedimientos técnicos más usados en la conservación de alimentos, ya que debido a su disponibilidad se disminuyen costos por consumo de energía. Diferentes configuraciones de secadores solares se han implementado con éxito en países ubicados en zonas tropicales en donde se cuenta con amplia disponibilidad de la radiación solar [1], [2].

De acuerdo a su modo de operación los secadores solares se dividen en tres grupos: secadores en modo directo, indirecto y mixto [3][4]. En el modo directo, la cámara de secado (lugar donde se aloja el producto) recibe la radiación solar, en el modo indirecto el aire es precalentado en un colector y la cámara de secado no recibe la radiación solar, este modo es recomendable cuando la radiación solar afecta propiedades tales como color [5], [6], valor nutricional, aromas característicos [7] y presencia de volátiles de interés. En el modo mixto se combinan los modos de operación directo e indirecto de tal manera que tanto la cámara de secado como el colector reciben radiación solar [1]-[3]. Este tipo de secadores presentan una eficiencia más alta ya que hace un mejor aprovechamiento de la energía solar disponible. El secador de túnel tipo Hohenheim puede operar en los modos indirecto o mixto. Este está compuesto de un colector solar que tiene una placa negra que se calienta por absorción de radiación solar y posteriormente calienta el aire usado para el secado de productos agrícolas por convección, una cámara de secado en la cual el producto se deshidrata, y en la mayoría de los casos un sistema que impulsa el aire exterior dentro del secador. Este último está constituido por un conjunto de paneles fotovoltaicos que generan la potencia eléctrica necesaria para la operación de uno a cinco de ventiladores.

Revisiones de literatura sobre secadores solares incluyen un resumen de las principales características del secador de túnel tipo Hohenheim y el peso, contenido de humedad y tiempo de secado del producto [3], [4], [9]-[12]. Se destacan los trabajos de Bala y Janjai [13] y Bala, Marshad y Janjai [14] quienes presentan una revisión amplia sobre secadores solares en la que incluyen resultados de sus propias investigaciones. Patil y Gawande [15] incluyen en su revisión sobre secadores una comparación de experiencias presentadas en 10 investigaciones dentro de las que incluye las de Bala y colaboradores.

El presente trabajo presenta una revisión de experiencias en la implementación del secador solar tipo Hohenheim para el secado de productos agrícolas. Se presentan los rangos de operación usados, se hace una descripción de los sistemas

utilizados junto con las modificaciones implementadas con respecto a la configuración original, se presentan los parámetros del proceso de secado de diferentes productos agrícolas, la energía utilizada en el proceso de secado y los valores de eficiencia reportados en las diferentes investigaciones. La información acá presentada constituye una herramienta que permite apoyar procesos de toma de decisión para la implementación, diseño y operación de este tipo de secadores así como para la evaluación del desempeño en secadores existentes.

II. CONFIGURACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE SECADORES DE TUNEL TIPO HOHENHEIM

A. Componentes principales

El secador de túnel tipo Hohenheim fue desarrollado a mediados de los 80's en el Instituto de Ingeniería Agrícola en el trópico y sub-trópico en la Universidad de Hohenheim en Alemania [16], [17]. Este secador ha sido probado exitosamente en más de 60 países [11], [18] en el secado de gran variedad de productos. La literatura reporta investigaciones de secadores de túnel Hohenheim construidos en Alemania [16], [19]-[21]; Arabia Saudita [20],[21]; Australia [16][22]; Bangladesh [5], [8], [14], [23][26]; Colombia [27]-[31]; Egipto[16][20][21]; España[16]; Etiopia [20], [21]; Grecia [21]; India [32]; Indonesia [20]; Nigeria [33]; Corea del Norte [21]; Mali [20],[34]; Omán [35],[36]; Pakistán [37]; Sri Lanka [16][22],[38]; Sur Corea [20]; Rumania [39]; Tailandia [16],[40]-[43]; Turquía [16]; Uganda [16]; Vietnam [43]; Yugoslavia [20],[21] y Zimbabue [44].

En la Figura 1 se presenta un esquema del secador con sus diferentes componentes. El secador consta de un colector y una cámara de secado que se ubican en serie en la misma estructura del túnel y en algunos casos un sistema de movimiento del aire. En la Tabla 1 se presentan las principales características de secadores de este tipo utilizados en el secado de diferentes productos agrícolas.

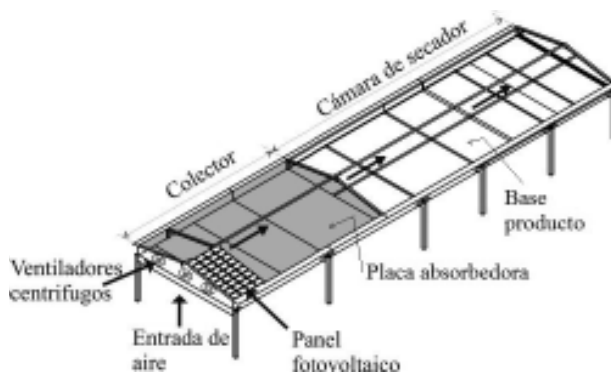


Fig. 1. Componentes del secador de túnel tipo Hohenheim
Fuente: Autores.

El colector está compuesto por una cubierta transparente y una placa absorbidora de la radiación. La cubierta

transparente puede ser de vidrio [37], polietileno [5], [22], [25], [26], [44], polyester [20], policarbonato [42] o plástico [14][24][34], [[36]], [[39]] [[41]], [[45]] con o sin estabilización de los rayos UV. Las dimensiones tales como la altura y el ancho del espacio vacío en el secador de túnel dependen de la cantidad de aire mínima que debe pasar por el secador para que éste absorba la humedad requerida y a la velocidad máxima realizable sin que el producto sea impulsado por este. La placa está generalmente pintada de negro para que absorba la radiación solar. Los espesores reportados de la pintura del colector son de 0,15 mm [35] y 3 mm [40]. Las referencias citadas no muestran el criterio de selección de la pintura del colector. Para su selección debe tenerse en cuenta la radiación solar esperada, la temperatura, la humedad relativa, el tiempo de operación y el tipo de material, entre otros. La placa es generalmente un sándwich compuesto de dos láminas metálicas y madera contrachapada [11], [[49]] en los laterales y aislamiento en la parte central. Los aislamientos encontrados en literatura son corcho [11], madera contrachapada [49], espuma de poliestireno [43], lana de vidrio [46] y fibra de vidrio [21],[[48]],[[50]]. Weiss y Buchinger [11] indican adicionalmente que para el aislamiento se puede utilizar poliuretano, aislamiento para edificios, lino, paja, fibras de coco y hojas.

La cámara de secado está compuesta por una cubierta, una base para albergar el producto y un aislamiento. El producto puede ubicarse directamente sobre la base del secador o sobre una malla a corta distancia por encima de la base de tal manera que se posibilite el flujo de aire tanto por encima como por debajo del secador [19], [[22]], [[31]].

Como se observa en la Tabla 1 el colector y el secador tienen típicamente la misma área con un valor de 2 m x 10 m, siendo éstos los secadores más grandes encontrados. El secador más pequeño corresponde al reportado por Senadeera y Kalugalage [22] con un área de 1,8 m x 0,9 m.

En la mayoría de los casos el aire es direccionado hacia el secador por medio de un sistema de convección forzada compuesto por un panel fotovoltaico y un set de ventiladores ubicados en la base horizontal a la entrada del túnel. Basunia et al. [35] y Banout et al. [43] presentan configuraciones con los ventiladores ubicados en la tapa lateral. De las referencias consultadas solamente cinco utilizan sistemas con convección natural [22], [[25]][[33]], [[49]]. Dong [51] presenta una detallada descripción de las dimensiones, materiales y formas constructivas de un secador de 1,2 m x 4,9 m (longitud total incluyendo colector y secador) de cubierta circular y convección libre que puede ser construido con materiales disponibles en zonas rurales alejadas.

Para el caso de los secadores que trabajan con convección forzada los ventiladores se accionan por medio de la energía eléctrica generada por el panel fotovoltaico. La conexión en directo de los ventiladores al panel fotovoltaico produce el efecto de estabilizar la temperatura ya que en los periodos de alta radiación el panel fotovoltaico produce una mayor

potencia eléctrica que se traduce en mayor velocidad en los ventiladores. Consecuentemente, el flujo de aire aumenta e impide que la temperatura en el colector aumente demasiado. En el caso contrario a menor radiación solar, la cantidad de flujo que entra el colector es más bajo permitiendo que la temperatura no disminuya demasiado [14]. El número de ventiladores varía entre 1 y 5 y la potencia suministrada por los paneles fotovoltaicos entre 14,4 y 180 W. Los valores específicos utilizados para los diferentes secadores se pueden ver en el Tabla 1.

B. Modificaciones con respecto a la configuración inicial

Con el objetivo de mejorar el desempeño del secador y posibilitar su uso bajo condiciones específicas de operación el diseño original de la Universidad de Hohenheim ha sido modificado en numerosas ocasiones. Los cambios se pueden agrupar en cinco categorías que se presentan a continuación:

1) Modificaciones orientadas a aumentar la captación de energía solar:

- Instalación de cubiertas semi-circulares [35], [[36]], [[44]], [[51]], planas con un ángulo de inclinación lateral de 6° [49] y parabólicas [42].
- Cambio de la superficie lisa del colector por una corrugada [48], [[49]] o con aletas [43].

2) Modificaciones orientadas a mejorar las condiciones de flujo de aire de secado en el secador:

- Instalación de un ventilador a la salida del secador para permitir que el aire salga por succión [40]. Adicionalmente, al estar la salida cerrada al ambiente, en los momentos en que el secador no está funcionando, el aire frío no ingresa al secador de tal manera que se disminuyen las pérdidas de calor.
- Cambio de la fuente de potencia del ventilador de voltaje DC a AC [16] o uso de un potenciómetro [19] que permiten realizar el control del flujo de aire independientemente de la radiación solar.
- Cambio de la pendiente longitudinal del colector para mejorar el flujo de aire para el caso de secadores operando en convección natural. Gard y Kumar [52] estudiaron un secador operando con circulación natural. Este secador incrementaba su flujo de aire para una pendiente de 15°.
- Instalación de una chimenea en secadores que trabajan en convección natural. La chimenea genera un efecto de succión que incrementa el flujo de aire de secado aumentando la eficiencia del secador [22], [[49]]. En la Fig. 3 se presenta la modificación al secador realizada por Berinyuy et al. [49].
- Instalación de una unidad direccionadora de flujo. Senadeera et al. [22] utilizan un sistema ubicado entre el colector y el secador que consiste en dos láminas metálicas usadas para controlar el flujo de aire que va por debajo y por encima del producto. En la referencia no se presentan detalles ni especificaciones de diseño del sistema.

3) Modificaciones orientadas a posibilitar el uso del secador con limitada o nula disponibilidad de radiación solar:

- Adición de un quemador de biomasa [20], [27], [39] o uno de gas [16], [17] para que el secador opere en modo continuo en el día y la noche. En la Fig. 2 se puede observar un esquema del secador con el quemador incorporado. El aire caliente proveniente del quemador ingresa al secador por la interfase entre el colector y la cámara de secado. Para evitar que el flujo de aire se dirija hacia el colector se instala una placa separadora que es accionada durante la operación con el quemador.

- Instalación de un sistema de doble paso en modo horizontal con un sistema de almacenamiento de calor debajo del colector. Esta modificación consiste en conectar el colector en paralelo con el sistema de almacenamiento de calor. Berinyuy [49] utilizó rocas de basalto triturado como medio de almacenamiento de calor que cubrió por dos capas de hojas de polietileno (ver Fig. 3).

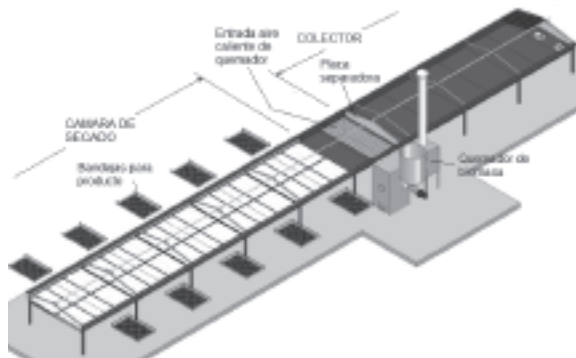


Fig. 2. Secador de túnel tipo Hohenheim con quemador de biomasa incorporado [Autores].

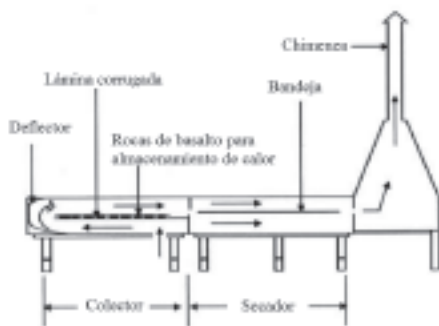


Fig. 3. Secador de túnel tipo Hohenheim modificado con sistema de almacenamiento de energía y chimenea a la salida. Adaptado de [49].

4) Modificaciones en la configuración interna del secador:

- Implementación sistemas de doble paso en modo vertical [43] o en modo horizontal [20], [21]. En modo vertical el colector se ubica encima de la cámara de secado. El aire fluye a través del colector y retorna a través de la cámara de secado. En modo horizontal el colector y la cámara de secado se localizan uno al lado del otro. En la Fig. 4 se presenta la

configuración de doble paso vertical implementada por Banout et al. [43] y en la Fig. 5 la configuración de doble paso horizontal implementada por Amir et al. [20]. En las dos configuraciones se usan ventiladores para forzar el aire a fluir por el secador. El desempeño de estos secadores se compara con el de secadores convencionales trabajando en convección natural encontrando un aumento en la eficiencia. Una comparación con la disposición original del secador de tipo Hohenheim no se realiza.

- Instalación de bandejas para posicionar el producto en la mitad del secador para que el aire pase más fácilmente por arriba y abajo del producto suspendido [49] y para mejorar las condiciones de manipulación en las etapas de carga y descarga del producto [27] (Ver Fig 2, Fig. 3 y Fig. 4).

- Instalación de dos hileras de bandejas de modo que se aprovecha el espacio superior del túnel [42].

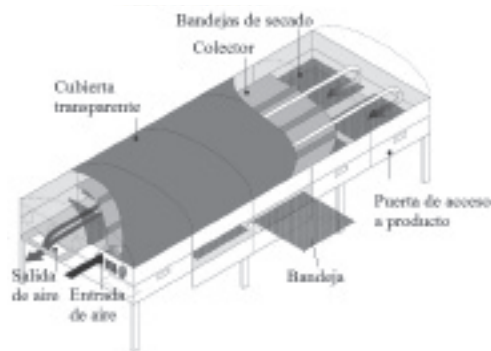


Fig. 4. Secador de túnel tipo Hohenheim modificado con sistema de doble paso vertical. Adaptado de [43].

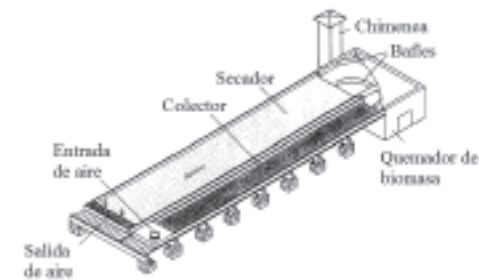


Fig. 5. Secador de túnel tipo Hohenheim modificado con sistema de doble paso horizontal y quemador de biomasa. Adaptado de [20].

5) Modificaciones en la configuración externa del secador:

- Instalación de una barrera contra vientos alrededor del secador de túnel para evitar las pérdidas de calor causadas por los factores ambientales [31].

- Adición de un filtro en los ventiladores para evitar la entrada de partículas de polvo y otras partículas del aire [16].

- Adición de un sistema de patas metálicas ajustables para permitir que el secador se ajuste a terrenos no uniformes.

III. ANÁLISIS EXPERIMENTALES

El análisis experimental del secador de túnel se basa en la determinación de los parámetros de trabajo y su influencia en las características del producto final. A partir de mediciones experimentales durante la operación del secador se determinan propiedades del aire como la temperatura, la humedad relativa, la presión y la velocidad, el voltaje y la corriente DC generados por el panel fotovoltaico y el cambio en la humedad y el tiempo de secado del material a secar.

Las investigaciones experimentales encontradas en literatura del secador de túnel tipo Hohenheim pueden dividirse en aquellas que hacen una descripción exhaustiva de los distintos componentes del secador, junto con las dimensiones, materiales y técnicas de construcción [[37], [51] los trabajos que estudian el desempeño térmico del secador en su configuración original [23]]-[26]][33], [[39], [[44] [[45]], [[50] como en secadores modificados [20], [22][33], [[34]][37]], [[38] [[43]][46]], [[49] y aquellos que se centran en el estudio de los cambios en las características de calidad del producto [5]][32]], [[37]. Adicionalmente se encuentran investigaciones de análisis de energía y exergía [8], [[25] y la optimización del secador [32].

En la Tabla 2 se presentan los principales parámetros de operación durante el secado de diferentes productos en secadores tipo Hohenheim. Se presentan las condiciones ambientales, los rangos de radiación incidente, la velocidad en el secador, la masa de producto inicial, la humedad inicial y final del producto y la temperatura y tiempo de secado. Como se puede observar en la tabla los rangos de operación son muy variados. Las temperaturas de secado alcanzan temperaturas máximas de 75 °C y velocidades de hasta 1,47 m/s. La humedad inicial de los productos a secar varía entre 95,2 y 45,0 %, la humedad final entre 57,91 y 2,9 % y los tiempos de secado entre 2,5 y 336 h. La masa inicial varía entre 0,6 y 120 kg. Amir et al. [20] reportan valores máximos de 600 y 750 kg para cacao y coco respectivamente y Lutz et al. [38] reporta un valor de 1000 kg para uva sultana. Ya que la masa inicial es dependiente tanto de las propiedades del producto como del tamaño del secador un mejor estándar de comparación lo constituye la densidad de carga o cantidad de producto por metro cuadrado de secador. Los valores calculados incluidos en la Tabla 2 presentan una variación entre 1,5 y 15,0 kg/m². Se destaca el valor utilizado por Lutz et al. [21] de 25 kg/m² para el secado de uva sultana.

IV. DESEMPEÑO TÉRMICO

El desempeño térmico de secadores solares se evalúa por medio de la determinación de las eficiencias térmicas del colector, el secador y la eficiencia térmica total. En términos generales la eficiencia térmica se puede definir como la relación entre la energía aprovechada o útil y la energía que entra al sistema.

Para el caso del colector la energía térmica aprovechada

($\dot{Q}_{u,sal}$) corresponde al cambio en la energía del aire de secado a su paso por el colector y la energía térmica que entra corresponde a la energía de radiación absorbida por el colector ($I_{col}A_{col}$) más energía de radiación absorbida por el panel fotovoltaico ($I_{panel}A_{panel}$). En las Ecuaciones (1) a (4) se presentan las expresiones matemáticas utilizadas para el cálculo de la eficiencia del colector [14]][25]][40].

$$\eta_{col} = \frac{\dot{Q}_{u,sal}}{I_{col}A_{col} + I_{panel}A_{panel}} \quad (1)$$

$$I_{col}A_{col} = \frac{A_{col} \int Sr(t) dt}{\Delta t} \quad (2)$$

$$I_{panel}A_{panel} = \frac{A_{panel} \int Sr(t) dt}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{u,sal} = \frac{\rho V c_p (T_{col,sal} - T_{col,ent})}{\Delta t} \quad (4)$$

Para la determinación de la eficiencia térmica de la cámara de secado la energía útil corresponde a la energía utilizada para evaporar el agua removida del producto ($\dot{Q}_{T,sal}$) y la energía de entrada corresponde a la suma de la potencia de salida del colector ($\dot{Q}_{u,sal}$) más la recibida por medio de radiación solar en el secador ($I_{sec}A_{sec}$). La ecuaciones (5) a (8) presentan las expresiones matemáticas utilizadas para el cálculo de ésta eficiencia [14]][25]][40].

$$\eta_{sec} = \frac{\dot{Q}_{T,sal}}{I_{sec}A_{sec} + \dot{Q}_{u,sal}} \quad (5)$$

$$I_{sec}A_{sec} = \frac{A_{sec} \int Sr(t) dt}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\dot{m}_r = \frac{m_{pr}(U_i - U_f)}{t_{sec}(100\% - U_f)} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{T,sal} = \dot{m}_r \lambda \quad (8)$$

Finalmente la eficiencia térmica total relaciona la energía final aprovechada que corresponde a la energía útil en el secador ($\dot{Q}_{T,sal}$) y la energía total a la entrada, la cual incluye la energía externa que entra en el colector y la que entra al secador. Ésta eficiencia se calcula como se presenta en la Eq. (9) [14]][25]][40].

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_{T,sal}}{I_{sec}A_{sec} + I_{panel}A_{panel} + I_{col}A_{col}} \quad (9)$$

En la Tabla 2 se presentan los valores de la cantidad total de energía aprovechada (calculada con los datos publicados por los diferentes autores utilizando las ecuaciones (7) y (8)) junto con la eficiencia del colector, el secador y total reportadas. De la misma manera que se encuentra una gran variedad en las configuraciones y condiciones de trabajo de estos secadores los valores obtenidos presentan una alta dispersión. La energía total aprovechada es un indicativo de la cantidad de humedad evaporada en el secador, ésta varía

entre 28 y 15584 W. Su comparación se dificulta ya que el valor es proporcional a la cantidad de material secado y el tamaño del secador, sin embargo da un indicativo de la amplia capacidad de secado de un secador solar tipo Hohenheim.

La eficiencia térmica del colector varía entre 23,5 y 54,5 %, la eficiencia térmica de la cámara de secado varía entre 20,9 y 65,3 % y la eficiencia térmica total varía entre 6,4 y 48,13 %. Para la Hierbabuena [31] se presentan valores atípicos de eficiencia en el secador de 0,3 % y total de 0,2 %.

Aghbashlo et al. [8] incluyen en su revisión sobre análisis exergético de procesos y sistemas de secado una sección sobre secado solar donde reportan resultados de 17 estudios que realizan análisis exergético en secadores solares. De estos solamente el de Chowdhury et al. [25] corresponde a secador solar tipo Hohenheim. La exergía es una medida de la calidad de energía disponible en un sistema. Chowdhry [25] realiza un análisis energético y exergético detallado de un secador tipo Hohenheim convencional. Las características del secador y los parámetros utilizados se presentan en las Tablas 1 y 2 para pasta de yaca (producto número 40). La eficiencia exergética del colector varía entre 32 y 69 % y la del secador es de 41,42 %.

Reza et al. [32] y Cuervo-Andrade [19] realizan variación de parámetros y evaluación de propiedades de calidad de los productos con el objetivo de optimizar las condiciones de trabajo en el secador. Las condiciones experimentales de estos trabajos se presentan en las Tablas 1 y 2 para pescado (producto número 21) y toronjil (producto número 37 y 38) respectivamente.

CONCLUSIONES

El secador de túnel tipo Hohenheim ha sido evaluado en más de 60 países y ha probado ser exitoso en el secado de más de 50 productos. Los secadores se han implementado en una gran variedad de tamaños con el uso de diferentes parámetros de trabajo. Las dimensiones típicas del secador son de 10 m x 2 m para secador y colector respectivamente. La temperatura de secado alcanza valores de 75 °C con velocidades de hasta 1,47 m/s. La humedad inicial de los productos a secar varía entre 95,2 y 45,0 %, la humedad final entre 57,91 y 2,9 % y los tiempos de secado entre 2,5 y 336 h. La densidad de carga varía entre 1,5 y 15 kg/m².

Se han realizado diversas modificaciones al secador que se agrupan en: modificaciones orientadas a mejorar la captación de energía solar, modificaciones que buscan mejorar el flujo de aire en el interior del túnel, modificaciones que posibilitan el uso continuo del secador, modificaciones en la configuración interna y aquellas en la configuración externa.

Los valores de eficiencia térmica obtenidos para el colector (23,5 - 54,5 %), el secador (20,9 - 65,3 %) y la eficiencia térmica total (6,4 - 48,13 %) indican que existe un potencial importante de mejora en el desempeño de estos secadores.

V. NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidad SI
A	Área	m ²
c_p	Calor específico	J kg ⁻¹ K ⁻¹
HR	Humedad relativa	%
I	Radiación solar promedio en el tiempo t	W m ⁻²
L_g	Calor latente de vaporización	J kg ⁻¹
M	Masa	kg
\dot{m}	Flujo de masa de aire	kg s ⁻¹
\dot{m}_v	Vapor de agua removido	kg s ⁻¹
$\dot{Q}_{u,sat}$	Potencia a la salida del colector	W
$\dot{Q}_{t,sat}$	Potencia a la salida del secador	W
$Sr(t)$	Radiación solar	W m ⁻²
T	Temperatura	K
t	Tiempo	s
U	Contenido de humedad (base húmeda)	%
u	Velocidad del aire	m/s
η	Eficiencia	%

Sub-índices			
Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
A	Ambiente	Panel	Pánel fotovoltaico
col	Colector	pr	Producto
ent	Entrada	sal	Salida
f	Final	sec	secador
i	Inicial		

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico brindado a través del proyecto “Diseño, construcción y puesta a punto de un secador híbrido solar – biomasa para plantas aromáticas” código Hermes 19926.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS SECADORES TIPO HOHENHEIM

No.	Producto	Area del colector	Area del secador	Observaciones	Operación	Panel fotovolta.	Ventiladores
1	Amaranto ² [49]	4 m x 1 m	4m x 1 m	Colector: dos cámaras una sobre la otra. En el medio se ubica una placa corrugada y una capa de rocas. El flujo en la cámara de secado se da por encima y debajo del producto.	CL	n.a.	n.a.
2	Andrographis paniculata [42]	6,1 m x 1,22 m	6,1 m x 1,22 m	Cubierta curva	CF	50 W	3
3	Cacao [20]	20 m x 1 m	20 m x 2 m	Secador de dos pasos en modo horizontal (el colector y el secador se ubican uno al lado del otro). Incluye quemador de	CF	n.a.	1
4	Café [20]						
5	Calabacín (Rodajas 0,5 cm) [39]	8 m x 2 m	10 m x 2 m	Ninguna	CF	20 - 40 W	n.r.
6	Calabacín (Rodajas 1 cm) [39]	8 m x 2 m	10 m x 2 m	Ninguna	CF	20 - 40 W	n.r.
7	Calabacín [33]	n.r.	n.r.	Secador pasivo con sistema de acumulación de energía con piedras	CL	n.a.	n.a.
8	Champañón [14]	10 m x 2 m	10 m x 2 m	Ninguna	n.r.	n.r.	n.r.
9	Chile [5]	10 m x 2 m	10 m x 2 m	Realiza análisis de calidad del producto.	CF	40 W	2
10	Chile [22]	1,8 m x 0,9 m	1,8 m x 0,9 m	Chimenea a la salida. Direccionamiento del aire en el secador con láminas metálicas.	CL	n.a.	n.a.
11	Chile ¹ [43]	2 m x 5 m	2 m x 5 m	Secador de dos pasos modo vertical (colector encima, secador debajo)	CF	n.r.	5
12	Chile ² [46]	4 m x 1,8 m	4,25 m x 1,8 m	Quemador de briquetas de cascarilla de café con capacidad 79,4 W y cinco ventiladores AC de 14 W c/u	CF	n.r.	2
13	Chile [37]	4 m x 1,22 m	6 m x 1,22m	Cubierta de vidrio, Descripción detallada de materiales y dimensiones y calidad del producto	CF	n.r.	2
14	Coco [20]	Ver descripción en café y cacao					
15	Col verde(rodajas) [49]	Ver descripción en amaranto					
16	Hierbabuena [31]	8 m x 2 m	10 m x 2 m	Incluye quemador de cascarilla de café y sistema de bandejas para cargue y descargue del producto.	CF	180 W	3
17	Hoja de amargo rebanado [49]	Ver descripción en amaranto					
18	Lima [36]	6 m x 2 m	10 m x 2 m	Cubierta circular	CF	40 W	1
19	Pescado [26]	10 m x 2 m	10 m x 2 m	Ninguna	CF	2 Mód	4
20	Pescado [50]	10 m x 2 m	10 m x 2 m	Ninguna	CF	2 Mód 40 W c/u	4
21	Pescado [32]	10 m x 2 m	10 m x 2 m	Optimización con base en propiedades organolépticas y capacidad de rehidratación. Características del secador iguales a Bala [25]	CF	n.r.	4
22	Pescado [33]	n.r.	n.r.	Ninguna	CF	n.r.	n.r.

n.r. = no reporta ; n.a. = no aplica

C.F.= Convección forzada ; C.L. = Convección libre

¹ Calculado a partir de valor reportado en MJ/m² asumiendo ² Calculado a partir de valor reportado en MJ/m² asumiendo 8 h de radiación

TABLA I. CARACTERÍSTICAS SECADORES TIPO HOHENHEIM (CONTINUACIÓN)

No.	Producto	Area del colector	Area del secador	Observaciones	Operación	Panel fotovolta.	Ventiladores
23	Pescado [35]	3 m x 1,25 m	7,5 m x 1,25 m	Cubierta parabólica	CF	1 Mód	1
24							
25							
26	Piña en rodajas [38]	8 m x 2 m	6 m x 2 m	Incorpora un quemador de aserrín de madera entre el colector y el secador.	CF	n.r.	2
27	Pimiento amarillo africano [49]	Ver descripción en amaranto					
28	Pimiento rojo africano [49]	Ver descripción en amaranto					
29	Pimienta [33]	n.r.	n.r.	Ninguna	n.r.	n.r.	n.r.
30	Piña [24, 45]	10 m x 2 m	10 m x 2 m	Ninguna	CF	14,4 W	1
31	Plátano maduro en rodajas [49]	Ver descripción en amaranto					
32	Pulpa de gusano de seda [40]	3,7 m x 1,8 m	2,5 m x 1,8 m	Ventilador ubicado a la salida del secador, el producto se carga en bandejas	CF	n.r.	1
33	Sardinias de pescado [34]	6 m x 2 m	6 m x 2 m	Cubierta circular, se ubican piedras en la base como medio de acumulación de calor	CF	40 W	1
34	Setas ² [46]	4 m x 1,8 m	4,25 m x 1,8 m	Ver descripción en Chili	CF	n.r.	4
35	Tomates [44]	7,2 m ²	8,1 m ²	Ninguna	CF	n.r.	1
36	Tomates [33]	n.r.	n.r.	Valor de humedad calculado a partir de la masa de agua evaporada reportada en el artículo	CF	n.r.	n.r.
37	Toronjil [19] (cubierta transparente en secador)	8 m x 2 m	10 m x 2 m	En la exp. el flujo de aire se mantiene constante. Incluye malla en secador que posibilita flujo de aire por encima y debajo del producto. Usa cubierta de plástico negro en el secador para evitar fotodegradación del producto. Evalúa calidad del toronjil.	CF	41,6 W	2
38	Toronjil [19] (cubierta negra en secador)						
39	Uva sultana ² [21]	20 m x 1 m	20 m x 2 m	Secador de dos pasos en modo horizontal (el colector y el secador se ubican uno al lado del otro)	CF	n.r.	1
40	Yaca (Pasta) [25]	10 m x 2 m	10 m x 2 m	Eficiencia exergética colector 32 - 69 % y del secador 41,42 %	CL	40 W	2
41	Yaca (Pulpa) [23]	10 m x 2 m	10 m x 2 m	Valores de experimento 1	CF	n.r.	1
42	Yaca (Pasta) [23]			Valores de experimento 8			
43	Yuca fermentada [49]	Ver descripción en amaranto					

n.r. = no reporta ; n.a. = no aplica

¹ Calculado a partir de valor reportado en MJ/m² asumiendo ² Calculado a partir de valor reportado en MJ/m² asumiendo 8 h de radiación

TABLA II. CONDICIONES DE OPERACIÓN SECADORES TIPO HOHENHEIM

No.	Producto	$T_A / ^\circ\text{C} /$ $HR_A / \%$	$I / \text{W/m}^2$	Velocidad m/s	$M_{\text{inicial}} / \text{kg}$	Carga / kg/m^2	$U_1 / \%$	$U_f / \%$	$T_{\text{sec}} / ^\circ\text{C}$	$t_{\text{sec}} / \text{h}$	$\dot{Q}_{\text{Total}} / \text{W}$	$\eta_{\text{conf}} / \%$	$\eta_{\text{sec}} / \%$	$\eta_T / \%$
1	Amaranto [49]	19 - 25 °C	456	9,68 m ³ /h	17	4,3	87,9	2,9	19-75	30	330	n.r.	n.r.	n.r.
2	Andrographis paniculata [42]	20-35	300 - 1050	n.r.	100	13,4	75	7	35-75	12	4013	n.r.	n.r.	n.r.
3	Cacao [20]	21 - 38 °C	300 - 1000	400 - 900 m ³ /h	500 - 600	13,8	48	8	68	40	3876	23,5 - 36	n.r.	n.r.
4	Café [20]				200 - 600	10,0	45	7	68	30	3532			
5	Calabacín (Rodajas 0,5 cm) [39]	30 - 45 °C/ 30 %	100 - 700	n.r.	200	10,0	95,2	15,36	35-70	8	15584	n.r.	n.r.	n.r.
6	Calabacín (Rodajas 1 cm) [39]	30 - 45 °C/ 30 %	100 - 700	n.r.	200	10,0	95,2	31,52	35-70	11	11173	n.r.	n.r.	n.r.
7	Calabacín [33]	25 - 30 °C / 42 %	773,8	n.r.	0,6		58,3	0	29-43	3	78	60	33	n.r.
8	Champiñón [14]	n.r.	273 - 885	0,02 - 0,2	30	1,5	89,41	6,14	37-65	8	2202	33,73	51,64	34,6
9	Chile ¹ [5]	29 - 39 °C / 40 - 60 %	200 - 500	n.r.	80	4,0	71	4,7	40 - 65	20	1839	n.r.	n.r.	n.r.
10	Chile [22]	n.r.	670	n.r.	7	4,3	78 - 80	5 - 6	(0,25 - 0,82) ⁵	6	n.i.	30	n.r.	11 % Fijo arriba y abajo 16 % Flujo arriba
11	Chile [43]	34,65 °C / 51,89 %	880	648,65 m ³ /h	38,4	3,8	90,21	10	64,3	32	697	61,62	n.r.	24,04
12	Chile [46]	n.r.	600	n.r.	19,5	2,5	76	6,6	60-70	12	787	n.r.	n.r.	6,1 Solar, 17,8 y 3,6 Biomasa, 8,8 Global
13	Chile [37]	34,5 - 40,5 °C	630 - 690	0,2 - 0,4	n.r.		n.r.	n.r.	48,5 - 55,5	n.r.	n.i.	n.r.	n.r.	42
14	Coco [20]	21 - 38 °C	300 - 1000	400 - 900 m ³ /h	100 - 750	10,6	45	5	68	60	1933	23,5 - 36	n.r.	n.r.
15	Col verde (rodajas) [49]	Ver descripción en amaranto			17	4,3	95	9	19-61,9	130	83	n.r.	n.r.	n.r.
16	Hierbabuena [31]	20-27 °C / 35-45 %	50 - 800	0,35 - 0,86	45	2,3	85	12	18-52	12	2090	22,45 - 35,44	0,3 - 9,5	0,2 - 6,4
17	Hoja de amargo rebanado [49]	Ver descripción en amaranto			17	4,3	84,3	1,2	19-75	30	316	n.r.	n.r.	n.r.
18	Lima [36]	42 °C	1000		300	15,0	86	10	29-74	70	2395	n.r.	n.r.	n.r.
19	Pescado [26]	28 - 32,83 °C / 58,83 - 74 %	n.r.	n.r.	40	2,0	78,7-85,47	14,05-19,19	31,3 - 47,78	31	676	n.r.	n.r.	n.r.
20	Pescado [50]	28 - 33 °C / 65 - 75 %	180 - 660	0,4 - 0,7	150	7,5	66	16,23	45 - 55	37	1594	n.r.	n.r.	n.r.
21	Pescado [32]	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.i.	70 - 90	16	45 - 55	32 - 36	n.i.	n.r.	n.r.	n.r.
22	Pescado [33]	49%	532,8	n.r.	0,25	n.i.	68	0	28 - 32	10	11	60	19,3	n.r.

¹ Se asume la misma cantidad de producto inicial para todas las pruebas reportadas

² U calculado a partir de valores de humedad en base seca.

³ Humedad inicial asumida, humedad final calculada de pérdida de masa.

⁴ Calculado

⁵ Diferencia temperatura total / diferencia temperatura en colector

⁶ Resultados condiciones de carga y velocidad máxima y mínima utilizadas

n.r. = no reporta; n.i. = no existe información para el cálculo

TABLA II. CONDICIONES DE OPERACIÓN SECADORES TIPO HOHENHEIM (CONTINUACIÓN)

No.	Producto	$T_A / ^\circ C /$ $HR_A / \%$	$I / W/m^2$	Velocidad m/s	M_{inicia} / kg	Carga / kg/m ²	$U_i / \%$	$U_f / \%$	$T_{sec} / ^\circ C$	t_{sec} / h	$\dot{Q}_{T, sal} / W$	$\eta_{col} / \%$	$\eta_{sec} / \%$	$\eta_T / \%$
23					29	3.1	80	50,85	27 - 57	20	573			
24	Pescado ³ [35]	n.r.	n.r.	n.r.	33	3.5	80	28,27	30 - 40	12	1332	n.r.	n.r.	n.r.
25					56	6.0	80	57,91	30 - 60	17	1150			
26	Piña en rodajas [38]	30 °C / 95 %	1000 - 2800	0,2 - 0,9	n.r.	n.i.	80	5	70 (día), 40 (noche)	14,5	n.i.	n.r.	n.r.	n.r.
27	Pimiento amarillo africano ¹ [49]	Ver descripción en amaranto			17	4,3	86,8	13,4	19-75	336	28	n.r.	n.r.	17,68
28	Pimiento rojo africano [49]	Ver descripción en amaranto			17	4,3	80,9	10,8	19-75	96	92	n.r.	n.r.	n.r.
29	Pimentita [33]	25 - 30 °C / 41 %	802	n.r.	0,3	n.i.	93,3	0	25 - 55	2,5	75	60	19,3	n.r.
30	Piña [24, 45]	n.r.	210 - 430	0,02 - 0,4	150	7,5	87,32	14,13	40 - 50	20	4252	n.r.	n.r.	n.r.
31	Plátano maduro en rodajas ¹ [49]	Ver descripción en amaranto			17	4,3	75,3	20,8	19-75	100	78	n.r.	n.r.	n.r.
32	Pulpa de gusano de seda [40]	30,9 - 34,8 °C / 46,2 - 54,7 %	815 - 878	0,2 - 0,5	30	6,7	79	4,3	40-70	9,5	1623	42,7 - 54,2	20,9 - 30,1	14,0 - 16,8
33	Sardinias de pescado [34]	39,9	0 - 850	0,2	51,5	4,3	66,5	15,5	30-69	30	686	n.r.	n.r.	29,5
34	Setas ⁴ [46]	n.r.	456	n.r.	21	n.i.	90 - 92	9,8	60 - 70	12	1027	n.r.	n.r.	17,2 Solar, 16,8 y 0,75 Biomasa.
35	Tomates [44]	32,6 - 56 °C / 29 %	558,3	0,77	50	6,2	93,7	6,29	32,6-56	15	2068	n.r.	n.r.	n.r.
36	Tomates [33]	25 - 30 °C / 41 %	802	n.r.	0,3	n.i.	93,3	0	25 - 55	2,5	75	60	6,6	n.r.
37	Toronjil ⁶ [19] (cubierta transparente en secador)	17 - 22 °C	760	0,8	18	0,9	76	10	55	8,2	1076			
38	Toronjil ⁶ [19] (cubierta negra en secador)			0,4	36	1,8	76	10	55	13	1358	44,65	n.r.	n.r.
				0,4	18	0,9	76	10	55	12,5	706			
				0,4	36	1,8	76	10	55	18	981			
39	Uva sultana ⁴ [21]	15 - 35 °C / 15 - 99 %	940	1,5 - 3,5	1000	25,0	75	15	40 - 65	11,5	4056	23,5 - 36	n.r.	n.r.
40	Yaca (Pasto) [25]	30 - 36 °C	100 - 600	n.r.	50	2,5	76	11,88	43 - 58	12	2007	27,45 - 42,5	32,34 - 65,3	39,18 - 48,13
41	Yaca (Pulpa) [23]	n.r.	50 - 120	0 - 1,47	120	6,0	80,94	11,75	22,2 - 27,9	21	3025	n.r.	n.r.	n.r.
42	Yaca (Pasto) [23]	n.r.	170 - 200	0,03 - 1,47	120	6,0	82,44	9,99	23,2 - 39,0	19	3429	n.r.	n.r.	n.r.
43	Yuca fermentada ¹ [49]	Ver descripción en amaranto			17	4,3	60	10	19-75	168	37	n.r.	n.r.	n.r.

¹ Se asume la misma cantidad de producto inicial para todas las pruebas reportadas

² U calculado a partir de valores de humedad en base seca.

³ Humedad inicial asumida, humedad final calculada a partir de pérdida de ma

⁴ Calculado

⁵ Diferencia temperatura total / diferencia temperatura en colector

⁶ Resultados condiciones de carga y velocidad máxima y mínima utilizadas

n.r. = no reporta; n.i. = no existe información para el cálculo

REFERENCIAS

- [1] M. V. R. Murthy, "A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no 4, pp. 835-844, 2009.
- [2] S. VijayaVenkataRaman, S. Iniyar y R. Goic, "A review of solar drying technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no 4, pp. 835-844, 2009.
- [3] A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Ruslan, M. A. Alghoul and M. Y. Sulaiman, "Review of solar dryers for agricultural and marine products," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no 1, pp. 1-30, 2010.
- [4] A. Sharma, C. R. Chen and N. Vu Lan, "Solar-energy drying systems: A review," *Renewable and Sustainable energy Reviews*, vol. 16, no 5, pp. 2652-2670, 2012.
- [5] M. A. Hossain and B. K. Bala, "Drying of hot chilli using solar tunnel drier," *Solar Energy*, vol. 81, no 1, pp. 85-92, 2007.
- [6] M. A. Hossain, J. L. Woods and B. K. Bala, "Optimisation of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss," *Renewable Energy*, vol. 30, no 5, pp. 729-742, 2005.
- [7] D. R. Pangavhane and R. L. Sawhney, "Review of research and development work on solar dryers for grape drying," *Energy conversion and management*, vol. 43, no 1, pp. 45-61, 2002.
- [8] M. Aghbashlo, H. Mobli, S. Rafiee and Madadlou A, "A review on exergy analysis of drying processes and systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 1-22, 2013.
- [9] A. Esper and W. Muhlbaue, "Solar drying - An effective means of food preservation," *Renewable Energy*, vol. 15, no 1, pp. 95-100, 1998.
- [10] M. Kumar, S. Sansaniwal and P. Khatak, "Progress in solar dryers for drying various commodities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, p. 346-360, 2016.
- [11] W. Weiss and J. Buchinger. (2015, Nov.). Establishment of a production, sales and consulting infrastructure for solar thermal plants in Zimbabwe. AEE INTEC Institute for Sustainable Technologies, Austria. [Online]. Available: <http://www.aee-intec.at>
- [12] A. Kumar, S. C. Moses and K. Khan, "A Survey on the Design, Fabrication and Utilization of Different Types of Foods and Vegetables Dryer," *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)*, vol. 8, pp. 2319-72, 2015.
- [13] B. K. Bala and S. Janjai, "Solar drying technology: Potentials and developments," in *Energy environment and Sustainable Development*, Springer Vienna, 2012, pp. 69-98.
- [14] B. K. Bala, M. A. Morshed and M. Rahman, "Solar drying of mushroom using solar tunnel dryer," in *Proceedings of the International Solar Food Processing Conference*, Indore (India), 2009, pp. 1-11.
- [15] R. Patil and Gawande R, "A review on solar tunnel greenhouse drying system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 196-214, 2016.
- [16] J. O. Donoghue and R. J. Fuller, "Experiences with the Australian Version of the Hohenheim solar tunnel dryer," in *Proceedings of the 37th Annual Conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society*, Melbourne (Australia) 1999, p. 1-7.
- [17] K. P. Jose and C. M. Joy, "Solar tunnel drying of turmeric (*Curcuma Longa* Linn. Syn. C. *Domestica* Val.) for quality improvement," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 33, pp. 121-135, 2009.
- [18] Hensel, O and Esper, A, "The Hohenheim solar tunnel dryer – 20 years of success," *Food Chain: The International Journal of Small Scale Food Processing*, vol. 31, pp 20 – 22, 2001.
- [19] S. Cuervo-Andrade. "Quality oriented drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.)," Ph.D. dissertation, Dept. Ing. Agr., Universidad de Kassel, Kassel, Alemania, 2011.
- [20] E. J. Amir, K. Grandegger, A. Esper, M. Sumarsono, C. Djaya and W. Mühlbauer, "Development of a multi-purpose solar tunnel dryer for use in humid tropics," *Renewable Energy*, vol. 1, no 2, pp. 167-176, 1991.
- [21] K. Lutz, W. Mühlbauer, J. Müller and G. Reisinger, "Development of a multi-purpose solar crop dryer for arid zones," *Solar & wind technology*, vol. 4, no 4, pp. 417-424, 1987.
- [22] W. Senadeera and I. Kalugalage, "Performance evaluation of an affordable solar dryer for crops," in *Biennial Conference for the Society for Engineering in Agriculture*, Dubbo (Australia) 2004, pp. 1 – 7.
- [23] B. K. Bala, M. A. Ashraf, M. A. Uddin and S. Janjai, "Experimental and neural network prediction of the performance of a solar tunnel drier for drying jackfruit bulbs and leather," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 28, no 6, p. 552-566, 2005.
- [24] B. K. Bala, M. R. A. Mondol, B. K. Biswas, B. L. Das Chowdury and S. Janjai, "Solar drying of pineapple using solar tunnel drier," *Renewable Energy*, vol. 28, no 2, pp. 183-190, 2003.
- [25] M. M. I. Chowdhury, B. K. Bala and M. A. Haque, "Energy and exergy analysis of the solar drying of jackfruit leather," *Biosystems Engineering*, vol. 110, no 2, p. 222-229, 2011.
- [26] S. Sultana, F. Shikha, M. Islam and M. Kamal, "Drying Performance of Rotating and Solar Tunnel Dryer for Production of Quality Dried Fish," *Progressive Agriculture*, vol. 20, pp. 173-81, 2013.
- [27] P. Cuervo-Andrade, S. Rincón Prat and W. Martinez Olarte, "Diseño, construcción y puesta a punto de un secador dual solar – biomasa para plantas aromáticas," in *Memorias del Seminario Internacional Secado de Productos Agrícolas*, Bogotá (Colombia), 2012, pp. 162-168.
- [28] P. J. García Guarín, S. L. Rincón Prat and P. Cuervo Andrade. "Modeling of a Hybrid Solar - Biomass Tunnel Dryer Type "Hohenheim" for Aromatic Plants," in *Memorias de la Conferencia Internacional en Ciencia y Tecnología de secado del secado*, Bogotá (Colombia), 2014, pp. 91-102.
- [29] P. J. García Guarín, S. L. Rincón Prat, P. Cuervo Andrade. "Modelación matemática de secador de túnel tipo Hohenheim solar-biomasa para plantas aromáticas," in *Memorias del VII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, V Congreso Ingeniería Mecatrónica, y V Congreso Internacional de Materiales Energía y Medio Ambiente (CIMM 2015)*, 2015, pp. 1-4.
- [30] P. J. García Guarín, S. L. Rincón Prat and P. Cuervo Andrade, "Experimental Analysis of the Thermal Behaviour of a Dual Solar - Biomass Tunnel Dryer Type "Hohenheim" for Aromatic Plants," in *Proceedings of the Tropentag 2015 International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development*, Berlin (Alemania), 2015, pp. 628.
- [31] P. J. García Guarín, "Caracterización del comportamiento térmico de un secador híbrido solar-biomasa de túnel tipo Hohenheim con base en experimentación y simulación computacional," M.S. thesis, Dept. Ing. Mec., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2016.
- [32] M.S. Reza, M. A. J. Bapary, M. N. Islam and M. Kamal, "Optimization of marine fish drying using solar tunnel dryer," *Journal of food processing and preservation*, vol. 33, no. 1, pp. 47 - 59, 2009.
- [33] D. Dasin, N. Godi and O. Kingsley, "Experimental Investigations of the Performance of Passive Solar Food Dryer

- Tested in Yola–Nigeria,” *International Journal of Energy Engineering*, vol. 5, no 1, pp. 9-15, 2015.
- [34] C. Heilporn, B. Haut, F. Debaste, F. Pol van der, C. Boey and A. Nonclercq, “Implementation of a rational drying process for fish conservation,” *Food Security*, vol. 2, no, 1, pp. 71 – 80, 2010.
- [35] M. A. Basunia, H. H. Al-Handali, M. I. Al-Balushi, M. S. Rahman and O. Mahgoub, “Drying of fish sardines in Oman using solar tunnel dryers,” *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 1, p. 108-114, 2011.
- [36] M. A. Basunia, “Drying of Limes in Oman Using Solar Tunnel Dryers,” *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 4, no 6, p. 658 – 661, 2013.
- [37] S.N. Husnain, A. Munir, S. F. Hussain and M. Faheem, “Quality Drying of Ripened Chilies Using a Glass Solar Tunnel Dryer,” *Journal of Global Innovation in Agricultural and Social Sciences*, vol. 2, No. 1, pp. 16–22, 2014. <
- [38] P. N. R. J. Amunugoda, N. S. Senanayake, R. S. W. Wijeratnam and K. D. G. Kulatunga, “Quality enhancement of dehydrated products through the modification of solar tunnel dryer for continuous operation in rural communities,” in *Proceedings of the Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE)*, Pattaya (Tailandia) 2011, pp. 1-7.
- [39] A. Derbala, N. A. Udroui, A. Mitroi and C. Iacomi, “Drying of squash using solar tunnel dryer with photovoltaic,” *Misr Journal of Agricultural Engineering*. vol. 26, no. 2, pp. 22–934, 2009.
- [40] T. Usub, C. Lertsatitthanakorn, N. Poomsa-ad, L. Wiset, L. Yang and S. Siriamornpun, “Experimental performance of a solar tunnel dryer for drying silkworm pupae,”. *Biosystems engineering*, vol. 101, no. 2, pp. 209-216, 2008.
- [41] P. Schirmer, S. Janjai, A. Esper, R. Smitabhindu and W. Mühlbaue., “Experimental investigation of the performance of a solar tunnel dryer for drying bananas,” *Renewable Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 119-129, 1996.
- [42] N. Srisittipokakun, K. Kirdsiri and J. Kaewkhao, “Solar drying of *Andrographis paniculata* using a parabolic shaped solar tunnel dryer,” *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 839-846, 2012.
- [43] J. Banout, P. Ehl, J. Havlik, B. Lojka, Z. Polesny and V. Verner, “Design and performance evaluation of a Double-pass solar dryer for drying of red chilli (*Capsicum annum L.*),” *Solar Energy*, vol. 85, no. 3, pp. 506-515, 2011.
- [44] L. Kagande, S. Musoni and J. Madzore, “Design and performance evaluation of solar tunnel dryer for tomato fruit drying in Zimbabwe,” *IOSR Journal of Engineering*, vol. 2, no. 12, pp. 1 – 7, 2012.
- [45] B. K. Bala, M. R. A. Mondol and B. Biswas, “Solar drying of pineapple using solar tunnel drier,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Mechanical Engineering*, Dhaka (Bangladesh), 2001, pp. 47–51.
- [46] G . Mastekbayeva and C. Bhatta, “Experimental studies on a hybrid dryer,” in *Proceedings of the ISES Solar World Congress*, Jerusalem (Israel), 1999, pp. 4-9.
- [47] S. Janjai and P. Tung, “Performance of a solar dryer using hot air from roof-integrated solar collectors for drying herbs and spices,” *Renewable Energy*, vol. 30, no. 14, pp. 2085 – 2095, 2005.
- [48] M. A. Wazed, M. T. Islam and N. Uddin, “Solar Tunnel Fish Dryer for Seasonal Application in the Perspective of Bangladesh” *Engineering e-Transaction*, vol. 4, no. 2, pp. 73 – 80, 2009.
- [49] J. Berinyuy, J. Tangka and G. Fotso, “Enhancing natural convection solar drying of high moisture vegetables with heat storage,” *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 14, no 1, pp 141-148, 2012.
- [50] B. K. Bala and M. R. A. Mondol, “Experimental Investigation on Solar Drying of Fish Using Solar tunnel dryer,” *Drying Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 427-436, 2001.
- [51] A. Dong, “Solar tunnel food dryer,” *College of Agricultural and Environmental Sciences*, vol. 7, no. 3, p. 1–15, 2014.
- [52] H. P. Garg, R. Kumar. “Studies on semi-cylindrical solar tunnel dryers: thermal performance of collector,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 115-131, 2000.
- [53] S. W. Pixton, “Moisture content - Its significance and measurement in stored products,” *Journal of Stored Products Research*, 1967, vol. 3, no 1, p. 35-47.
- [54] INNOTECH Drying Technology. (2016 Apr.) [Online]. Available: <http://www.innotech.de/Innotech/english/Products.html>

BIOGRAFIA



Pedro Julián García Guarín.

Ingeniero Electromecánico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Magister en Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia. Entre las líneas de investigación que maneja se encuentran diseño de sistemas con transferencia de calor y masa, diseño de secadores solares, modelado matemático de procesos, automatización de sistemas y control, y gestión en la eficiencia de recursos energéticos. Ha presentado 5 ponencias internacionales en el secado de productos agrícolas. Laboralmente se ha desempeñado como profesor ocasional de la UNAL, Ingeniero Coordinador de Proyectos Electromecánicos, Ingeniero residente de Obras Electromecánicas e Ingeniero Gestor de Eficiencia Energética. Entre los reconocimientos que ha recibido se encuentran la beca de las dependencias administrativas de la UPTC, reconocimiento a las mejores ponencias en CIMM 2015 y beca auxiliar docente de la UNAL.



Sonia Lucía Rincón Prat.

Ingeniera Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia y Doctora en Ingeniería de la Universidad de Kassel – Alemania. Sus áreas de trabajo se centran en el uso eficiente y sostenible de energía y el uso de biomasa como fuente de energía. Ha realizado trabajos en el área de la diseño de equipos y optimización del proceso de secado y en el aprovechamiento de biomasa residual sólida mediante procesos de pirólisis y gasificación. La profesora Rincón cuenta con gran número de publicaciones en revistas científicas y la participación en conferencias especializadas. Ha realizado proyectos de investigación conjuntos con los Departamentos de Ingeniería Agrícola y de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Kassel - Alemania, el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de

Karlsruhe y las Universidades Politécnicas de Madrid y de Cataluña. Actualmente se desempeña como Profesora Asociada del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia y es directora del Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos – BIOT.



Sandra Patricia Cuervo Andrade.

Doctora en Agrociencias de la Universidad de Kassel en Alemania, Ingeniera Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá y especialista en Gerencia de Recursos Naturales de la Universidad Distrital de Bogotá, actualmente es profesora de la Universidad Pontificia Bolivariana en Bucaramanga en la cual está vinculada a la Facultad de Ingeniería Mecánica desde el año 2014. Sus áreas de interés son termofluidos, procesos agroindustriales, energías renovables. Está vinculada a los grupos de investigación BIOT (Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos) de la Universidad Nacional de Colombia y al Grupo GiDeTechMa (Grupo de investigación en desarrollo tecnológico, mecatrónica y agroindustria) de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga.