

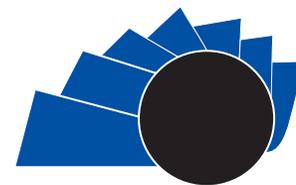


UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## Visión Electrónica

### Más que un estado sólido

<https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728>



VISIÓN ELECTRONICA

Visión Investigadora

## Metodología diseño de secadores híbridos solar- biomasa para frutas

*Methodology design of hybrid dryers solar- biomass for fruits*

Maickol Eduardo Rachen Soler<sup>1</sup>, Edwin Blasnilo Rúa Ramírez<sup>2</sup>, Jersson Xavier León Medina<sup>3</sup>,  
Edwin Torres Díaz<sup>4</sup>

### INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historia del artículo  
Enviado: 02/12/2017  
Recibido: 20/03/2018  
Aceptado: 09/08/2018

### Palabras clave:

Biomasa  
Deshidratación de alimentos  
Energía solar  
Energías renovables  
Metodología de Diseño  
Secador de frutas

### Keywords:

Biomass  
Food dehydration  
Solar energy  
Renewable energies  
Design methodology  
Fruit dryer

### RESUMEN

El artículo presenta los resultados del proyecto que tuvo como objetivo crear una alternativa de solución al desperdicio de fruta, asunto que se vive a nivel mundial, y al de emisiones de  $CO_2$  por causa de combustibles fósiles que actualmente se queman. Por lo anterior, se realiza una metodología para el diseño y construcción de un secador híbrido solarbiomasa planteándose una simulación con herramientas computacionales utilizando métodos numéricos, y dinámica computacional de fluidos CFD (computational fluid dynamics). Como perspectiva de investigación se proponen comparaciones de los perfiles de velocidad y temperatura con y sin producto de secado simulados, contra mediciones experimentales.

### ABSTRACT:

This project aims to create a solution to the waste of fruit that exists worldwide, in addition, it aims to reduce the  $CO_2$  emissions emitted by the fossil fuels that are currently burning. To carry out the analysis of the hybrid solar biomass dryer, we propose a simulation with simulation tools using computational fluid dynamics - CFD. As results of the simulations, we seek to compare the velocity and temperature profiles within the dryer with and without product, against experimental measurements.

1Ingeniero Mecánico, Universidad Santo Tomás de Tunja, Tunja, Colombia. Correo electrónico: [maickol.rachen@usantoto.edu.co](mailto:maickol.rachen@usantoto.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3050-2031>.

2Ingeniero Mecánico, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. MSc. En Termodinámica de fluidos, Universidad Rovira I Virgili - España. Ph.D.(c) En proyectos, Universidad Internacional Iberoamericana, México. Docente Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. Correo electrónico: [edwin.rua@usantoto.edu.co](mailto:edwin.rua@usantoto.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2028-3282>.

3Ingeniero Electromecánico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. MSc. En Ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Docente Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. Correo electrónico: [jersson.león@usantoto.edu.co](mailto:jersson.león@usantoto.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9198-1996>.

4Ingeniero Electromecánico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. Especialista en Gestión en Integridad y Corrosión, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. Docente Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. Correo electrónico: [edwin.torres@usantoto.edu.co](mailto:edwin.torres@usantoto.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6193-1798>.

Citar este artículo como: M. E. Rachen-Soler, E. B. Rúa-Ramírez, J. X. León-Medina y E. Torres-Díaz, "Metodología diseño de secadores híbridos solar-biomasa para frutas", *Visión electrónica, algo más que un estado sólido*, vol. 1, no. 1, Edición especial, enero-junio 2018. DOI revista: <https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728>.

## 1. Introducción

Disminuir la pérdida y el desperdicio de alimentos se convirtió en un propósito mundial a partir de la aprobación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible suscritos por 193 países en la Asamblea General de Naciones Unidas el pasado 25 de septiembre de 2015. Dicho objetivo quedó plasmado como una de las 169 metas que estas naciones se comprometieron a alcanzar para el año 2030. Específicamente en este tema, el compromiso establece la obligación de “reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha”, [1].

En el anterior sentido, el secado de frutas es un proceso en el cual, se disminuye la cantidad de humedad de las frutas, en este caso manzanas. En este proceso se busca prolongar la vida de las frutas, y así disminuir el desperdicio de las mismas. Según los estándares nacionales, en Colombia se pierde y desperdicia el 58 % de las frutas y las verduras (6,1 millones de toneladas), mientras que en el mundo el promedio está en 45%, [2]. En Colombia, la región que tiene el mayor nivel de participación en la pérdida nacional es la Centro-oriental (Cundinamarca, Santander, Norte de Santander y Boyacá) con una participación del 1 millón de toneladas.

De otro lado, las causas de las pérdidas y el desperdicio de alimentos en los países de ingresos bajos están principalmente relacionadas con las limitaciones económicas, técnicas y de gestión de las técnicas de aprovechamiento, las instalaciones para el almacenamiento y la refrigeración en condiciones climáticas difíciles, la infraestructura, el envasado y los sistemas de comercialización, [3].

Es por lo expuesto que el presente estudio considera los secadores solares como alternativas tecnológicas. Pero las características internas de funcionamiento de estos, particularmente de los secadores tipo híbrido solar-biomasa, son desconocidas para condiciones específicas. Por lo tanto, se requiere de un análisis experimental en el que se pueda determinar la transferencia de calor y masa a lo largo del secador que muestre el comportamiento de los flujos dentro del colector y la cámara de secado. El primero, si opera con energía solar, se determina la temperatura y variación del flujo de aire del colector y la cámara de secado. El segundo, si opera con biomasa, se determina la eficiencia de la cámara de secado y el ángulo de entrada del flujo de aire al secador, [4].

El artículo se estructura así: inicialmente se establece un estado de arte sobre la literatura en secado de frutas; luego se describe un marco teórico sobre modelos de equilibrio de productos agrícolas; posteriormente se plantea la metodología para el diseño y construcción de un secador híbrido Solar-Biomasa para manzanas en el municipio de Nuevo Colón –Boyacá, Colombia–; se presentan los resultados y discusión; y finalmente los resultados.

## 2. Estado de arte

Para realizar la búsqueda de literatura, se seleccionaron las bases de datos: Science Direct y Scopus, tomando en cuenta el carácter internacional y multidisciplinar de estas bases. Science es una base de datos completa que publica artículos de más de 2.800 revistas científicas indexadas, y más de 11.000 libros. Por su parte Scopus es la mayor base de datos de citas de la literatura, contiene más de 20.000 títulos y 5.000 editoriales del mundo, ofrece 100% de cobertura de Medline.

En las figura 1 y 2 se presenta la dinámica de publicación en los últimos 40 años de artículos científicos de “secado de frutas”, las áreas de estudio, y los países que más han publicado sobre el tema.

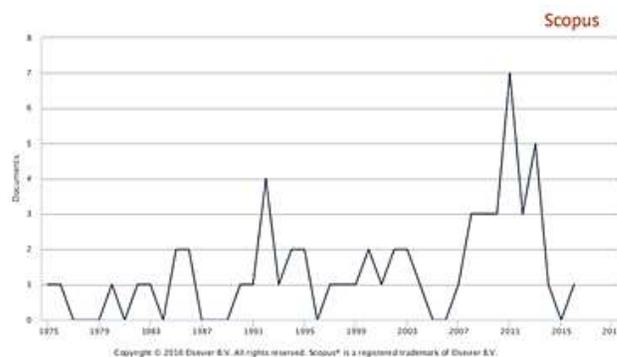


Figura 1. Documentos publicados sobre sistemas de secado de frutas [10].

Se puede observar un crecimiento, en los últimos seis años, en materia de publicaciones sobre el tema, lo que demuestra la preocupación por encontrar métodos viables de conservación de frutas utilizando la operación de secado.

Los estudios de caso que han recibido mayor atención en la literatura incluyen manzanas, zanahorias, naranjas, tomates y espinaca. Enfocado a pérdidas post-cosecha, y a discusión sobre los factores que afectan la pérdida de nutrientes en frutas y vegetales. Cuyas conclusiones citan la necesidad de investigación para evaluar avances en los métodos y procesos de secado, [5].

En los principales países agrícolas del mundo, China, India y Brasil, se concentra la investigación sobre el tema, sin embargo, es notable la falta de publicaciones e investigaciones en Colombia.

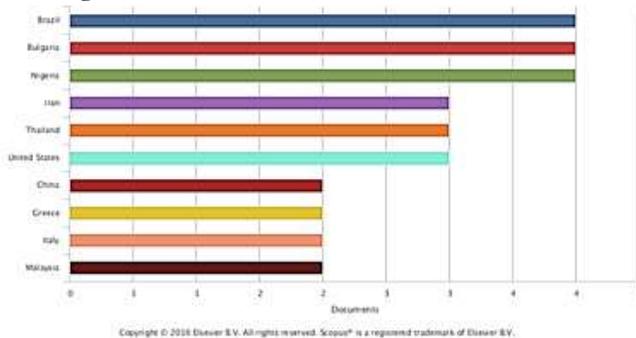


Figura 2. Países del mundo que están publicando investigaciones sobre secado de frutas [10].

### 3. Marco Teórico

La conservación de alimentos por reducción de su actividad de agua lleva consigo la alteración de la calidad original del producto tratado. Diferentes métodos físicos, matemáticos y numéricos se han propuesto para describir el cambio en el contenido de humedad del producto en las aplicaciones de secadores térmicos. El objetivo de describir el proceso de secado mediante modelos matemáticos es predecir las condiciones del producto y los requerimientos del proceso. En la mayoría de los casos la descripción se basa en el planteamiento del estado higroscópico del producto en relación con el aire de secado. Esta relación termodinámica se describe mediante la relación de Isoterma de Sorción, [6].

Se han desarrollado más de 200 modelos teóricos, semi-teóricos y empíricos que describen la relación encontrada experimentalmente según los parámetros establecidos. Sin embargo, ninguna de estas ecuaciones puede describir matemáticamente el proceso de absorción para todos los valores de humedad relativa del aire, [6]. Algunos de estos modelos se presentan en la Tabla 1, [6].

Nombre del Modelo	Modelo
Oswin	$M_{eq} = A \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$
Halsey	$M_{eq} = X_m \left( \frac{-A}{\log_{10}(a_w)} \right)^{\frac{1}{n}}$
Brunauer Emmer Tetter (BET lineal)	$M_{eq} = \frac{a_w X_m C}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)}$
Langmuir	$M_{eq} = \frac{X_m C a_w}{1 + C a_w}$
Guggenheim Anderson de Boer (GAB)	$M_{eq} = \frac{a_w X_m C K}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)}$

Tabla 1. Modelos de equilibrio de productos agrícolas. Fuente: elaboración propia

### 4. Metodología

En el proceso de secado de frutas intervienen diversas variables físicas, como la temperatura, la velocidad del aire, la humedad de la fruta, el tiempo de secado y para garantizar una calidad óptima en la fruta se deben controlar dichas variables, los fenómenos de transferencia de calor a utilizar son: la convección de calor producida en el aire con los sólidos, la radiación del sol, y la conducción entre los sólidos que componen la estructura de un equipo secador.

La complejidad en el entendimiento de las propiedades termodinámicas su comportamiento y relación, conllevan a buscar métodos o modelos de aprendizaje apoyados en las TIC, [7]. La solución de las ecuaciones que simulan el comportamiento termo-fluido del secador es implícita por lo tanto se deben buscar métodos que faciliten la convergencia y disminuyan el tiempo de simulación. Los métodos de solución de dinámica computacional de fluidos (CFD) utilizan esquemas de discretización conservativos, entre ellos, las diferencias finitas (Ruiz-López, 2008) y/o volúmenes de control (Ateeque et al., 2014), de ahí que se deberá seleccionar uno de los dos para realizar la simulación e interpretar los resultados de la misma.

Para la realización del diseño y construcción de un secador híbrido Solar-Biomasa para manzanas en el municipio de nuevo colón Boyacá se planea la consecución de las siguientes etapas:

4.1. Obtener, estudiar y analizar información relacionada con secadores solares y secadores basados en biomasa, identificar las variables que intervienen en el proceso de secado, sus componentes y modelos numéricos que muestren el comportamiento del proceso.

4.1.1. Concepción del sistema: En esta parte se hace una conceptualización sobre el proceso de secado y se establecen las principales variables o parámetros que intervienen en la calidad de un producto. Se señalan las variables independientes, las dependientes, los parámetros constantes y la precisión necesaria en la medición de las variables. Para esto se hace una revisión bibliográfica, se consulta con expertos, se organiza y sintetiza la información.

4.1.2. Revisión bibliográfica preliminar de investigaciones que se han realizado sobre los tipos de secadores solares y sus aplicaciones.

4.1.3. Revisión de literatura sobre la modelación numérica e implementación computacional, revisión de aplicaciones realizadas referentes al fenómeno de secado. Descripción del fenómeno de secado de

manzanas y búsqueda de modelos numéricos que muestran el comportamiento del fenómeno.

**4.1.4.** Valoración de la influencia de diferentes variables que intervienen en el proceso de secado como: temperatura, humedad, flujo másico de aire, radiación solar, tipo, cantidad y espesor de producto, etc.

**4.2.** Diseñar un modelo a escala de secador híbrido Solar-Biomasa, que describa con ingeniería de detalle los componentes y configuración de la cámara de secado y los sistemas de expulsión de gases.

El diseño propuesto tiene en cuenta las recomendaciones respecto a la aplicación de metodologías de diseño para ensamblaje (Design For Assembly-DFA) (Chen et al., 1998) y diseño para manufactura (Design For Manufacturing -DFM). Y el diseño concurrente de componentes mecánicos, diseño paramétrico de geometrías, [8]. describen algunos objetivos de diseño de un producto entre los cuales se encuentra el que sea fácil y económicamente manufacturado, para ello se establece una serie de recomendaciones tales como: minimizar el número de partes, desarrollar un diseño modular, usar componentes estándar, establecer componentes multifuncionales, seleccionar materiales y procesos de manufactura óptimos, establecer una ruta de ensamble de las piezas y asumir tolerancias apropiadas, [9]. Todo lo anterior es tenido en cuenta a la hora de realizar los diseños mecánicos del secador.

**4.2.1.** Diseño Mecánico: contempla las diferentes estructuras y mecanismos para el análisis del Secador

**4.2.2.** Seleccionar los materiales a utilizar teniendo en cuenta: la temperatura de operación, corrosión, costos, resistencia de materiales, entre otros.

**4.2.3.** Diseñar la estructura soporte: Perfilaría de la estructura, planos, manufactura

**4.2.4.** Elaborar un prototipo virtual en un software CAD, especificando el ensamble de cada una de sus partes.

**4.2.5.** Comprobación de los diseños realizados, mediante el apoyo en software especializado para diseños estructurales de análisis por elementos finitos

**4.2.6.** Utilizar herramientas de simulación en ingeniería como dinámica computacional de fluidos (CFD), que permitan determinar la distribución de temperatura y velocidades de flujo de aire en un secador híbrido Solar-Biomasa.

**4.2.7.** Simulación computacional del modelo matemático que integre las partes térmicas y del fluido. Ésta seguirá los siguientes pasos: 1) Selección de modelo numérico, 2) Análisis de geometría del secador,

3) Enmallado adaptado al modelo real, 4) Selección del método de acoplamiento entre ecuaciones, 5) Determinar la independencia de malla y 6) Presentación de resultados.

**4.2.8.** Análisis de resultados obtenidos de la simulación. Éstos se validan por medio de comparaciones con los valores experimentales. Los perfiles de temperatura y los flujos hallados son usados para determinar la eficiencia del secador y colector. La sensibilidad del secador se simula con distintos valores de entrada.

**4.3.** Validar experimentalmente el modelo propuesto, por medio de pruebas piloto en un modelo a escala que permita realizar análisis de sensibilidad de las variables bajo diferentes escenarios de operación y ajustar las variables de diseño definitivas.

**4.3.1.** Revisión de técnicas para realizar la toma de datos que se han hecho en secadores solares

**4.3.2.** Definir estrategias de muestreo de los parámetros a medir y variables de respuesta, las técnicas, el esquema espacial y temporal de muestreo a fin de reducir el tiempo durante el proceso de muestreo.

**4.3.3.** Diseño de experimentos. Se diseñan los experimentos para probar diferentes escenarios planteados en el modelo de manera que, mediante su ejecución, y análisis de resultados experimentales permitan establecer la validez de los resultados teóricos entregados por el modelo global de proceso.

**4.3.4.** Determinación de los puntos de medida del secador de las variables identificadas.

**4.3.5.** Revisión del equipo necesario para la toma de información en Laboratorio como termocuplas: tipo K, piranómetro, termómetro digital, termo anemómetro, balanza electrónica, pinza amperimétrica y demás instrumentos necesarios para realizar la medición.

**4.3.6.** Selección de sistema electrónico de adquisición de datos e instrumentos de medición faltantes de acuerdo con criterios técnicos y económicos.

**4.3.7.** Pruebas de funcionamiento de equipos disponibles

**4.3.8.** Construir un modelo a escala de secador híbrido Solar-Biomasa

**4.3.9.** Prueba de funcionamiento y toma de datos en el secador solar.

**4.3.10.** Análisis estadístico de resultados experimentales.

**4.3.11.** Comparación de los ratios de secado con los obtenidos en el secado natural.

**4.3.12.** Caracterizar el proceso de deshidratación a través de curvas de secado obtenidas de forma experimental ajustándolas con diferentes ecuaciones de

relación de humedad reportadas en la literatura.

**4.4.** Construcción y puesta en marcha de un equipo secador híbrido Solar-Biomasa, para comprobar su funcionamiento y evaluar su rendimiento en campo.

**4.4.1.** Construcción: se inicia la fabricación del equipo mediante técnicas de procesos de manufactura para procesar los distintos materiales mediante la utilización de equipos de corte, doblado y soldado y así dar inicio al ensamble de las partes.

**4.4.2.** Pre-comisionamiento: una vez que el equipo este construido se da inicio a esta etapa donde se busca la verificación de acuerdo a las especificaciones planteadas por el diseño y los estándares de fabricación, con una variedad de pruebas que se realizarán para asegurar la integridad del equipo. Estas pruebas cobijan la inspección de soldaduras mediante ensayos no destructivos como líquidos penetrantes, verificación del dimensionamiento, medición de las variables de temperatura, velocidades de flujo entre otros. Durante esta etapa se buscan fallas que puedan incurrir más adelante en el proceso de operación por las cuales deben ser reparadas para seguir en el proceso de comisionamiento.

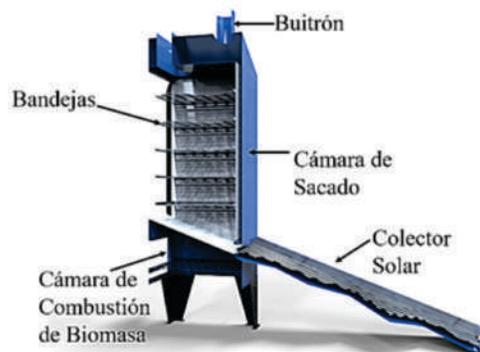
**4.4.3.** Comisionamiento: en esta fase se busca dar inicio al equipo y así verificar las variables de operación del sistema de manera que se pueda garantizar un correcto funcionamiento del equipo.

## 5. Resultados y discusión

En el proceso de diseño del prototipo secador se contemplan diferentes etapas entre ellas la construcción de un modelo matemático que describa el fenómeno físico interviene, esta solución a ecuaciones puede realizarse en una dos o tres dimensiones complicando cada vez más la solución, existe diversos software que facilitan la elaboración de esta simulación como: MatLab®, o spider (Python) sin embargo estos desarrollos llevan tiempo y los investigadores se pueden apoyar en el uso de herramientas de simulación (CDF) en las que por elementos finitos o volúmenes finitos se puede determinar el comportamiento de las variables involucradas.

Ya en una etapa experimental, se contemplaría medir la temperatura y velocidad del aire a partir de la adquisición de datos electrónicamente; la temperatura al ser una variable escalar necesita un tratamiento adecuado para llevarla a un sistema digital y saber su comportamiento. En contraste la velocidad, se mide a través del uso de una cámara de alta velocidad y partículas sólidas que puedan ser grabadas en video

para definir su trayectoria y así obtener su velocidad.



**Figura 3.** Diseño de secador híbrido solar – Biomasa para frutas. Fuente: elaboración propia.

Dependiendo las variables, se puede controlar el secado de frutas, según cálculos matemáticos, y tablas estandarizadas se pueden apreciar estas variables, según las gráficas y de acuerdo a estas se hacen los cálculos y conclusiones de las prácticas y experimentos a realizar.

## 6. Conclusiones

Claramente, un diseño del secador híbrido solar-biomasa será accesible, tanto ambiental como socialmente, ya que ayudará al productor a tener mayores ganancias y obtener una mejor remuneración a su trabajo. La innovación del diseño radica en obtener frutos deshidratados homogéneamente y reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

Además, ante el auge de nuevos combustibles, por el agotamiento de combustibles fósiles, se busca tener un recurso sustentable y de menor precio que el común combustible fósil; por tanto, se busca trabajar con energía solar y con ayuda de una biomasa, siendo así aún más sustentable para el campesino y poder disminuir esa gran cantidad de desperdicio que se viene viviendo en nuestro país y en el mundo; si se desea para una mayor economía se puede realizar con materiales totalmente reciclables y así ayudando aún más al medio ambiente y a nuestro productor.

## 7. Reconocimientos

Los autores reconocen al Semillero de Energía y Mecánica Computacional de la Universidad Santo Tomás- Sede Tunja por su colaboración. Por facilitar las primeras versiones del secador híbrido solar-biomasa para frutas.

## Referencias

- [1] DANE Y DNP, “Pobreza monetaria en Colombia: Nueva metodología y cifras”, Bogotá, D. C.: DNP Y DANE, 2010.
- [2] DNP, “Informe Desperdicio de Alimentos en Colombia”, Bogotá, D. C.: DNP, 2016.
- [3] J. Gustavsson, C. Cederberg, U. Sonesson, R. Otterdijk y A. Meybeck, “Food balance sheets”, Düsseldorf: FAO, 2012.
- [4] B. K. Bala, “Modeling of Energy and Environment for Sustainable Development”, pp. 2011, 2011.
- [5] D. M. Barrett y B. Lloyd, “Advanced preservation methods and nutrient retention in fruits and vegetables”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 92, no. 1, 2012, pp. 7-22. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.4718>.
- [6] C.A. Bayona, “Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas”, tesis MSc., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., Colombia, 2011.
- [7] E. Rua, “Aprendizaje interactivo de termodinámica de fluidos apoyado en las tecnologías de la información y comunicación”, *Revista respuestas*, vol. 19, 2014, pp. 41-50.
- [8] T. Chang, A. Wysk y H. Wang, “Computer-Aided Manufacturing”, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [9] J. Leon, E. Barahona, “Herramienta para el diseño de sistemas de posicionamiento tridimensional usados en fabricación digital”, *Desarrollo e Innovación*, vol. 6, no. 2, 2015, pp. 155-167.
- [10] Scopus, “Scopus 2018”. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/home.uri>