



<http://opn.to/a/mZYnh>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

# Design and Simulation of a Solar Dryer for Botanical Seeds of Grass and Forage

## *Diseño y simulación de un secador solar para semillas botánicas de pastos y forrajes*

Ing. Yoel Rodríguez Gago<sup>1</sup>, Dr.C. Yanoy Morejón Mesa<sup>11</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciencia Animal (ICA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

<sup>11</sup>Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

**ABSTRACT.** The present investigation is oriented towards the design of a solar dryer for botanical seeds of pastures and forages. For the fulfillment of the proposed objective, the theoretical-methodological bases referred to the subject were established. It was evident that the proposed theoretical foundations allowed carrying out the design and simulation of a prototype for the solar drying of botanical seeds of pastures and forages. With the use of the Solidworks software (2018 version), the prototype design was carried out and with the Flow Simulation tool, the analysis of fluid kinetics and temperatures was carried out, reaching air velocity values of 0,25 m/s and temperatures of 8 °C above room temperature in the drying chamber. On the other hand, with the Simulation tool, a finite element study was carried out to evaluate the structural strength of the prototype, using the von Mises maximum tension criterion, which demonstrated its strength and stability.

**Keywords:** solar drying, grass seed.

**RESUMEN.** La presente investigación se orientó hacia el diseño de un secador solar para semillas botánicas de pastos y forrajes. Para el cumplimiento del objetivo propuesto se establecieron las bases teórico-metodológicas referentes a la temática. Entre los principales resultados obtenidos se evidenció que los fundamentos teóricos planteados permitieron realizar el diseño y la simulación de un prototipo para el secado solar de semillas botánicas de pastos y forrajes. Con la utilización del software Solidworks (versión 2018), se realizó el diseño del prototipo y con las herramienta Flow Simulation, se llevó a cabo el análisis de la cinética del fluido y las temperaturas, alcanzando valores de velocidad del aire 0,25 m/s y temperaturas superiores en 8 a la temperatura ambiente en la cámara de secado. Por otra parte, con la herramienta Simulation, se realizó un estudio por elementos finitos para evaluar la resistencia estructural del prototipo, mediante el criterio de tensión máxima de Von Mises, demostrándose la resistencia y estabilidad de la estructura del prototipo.

**Palabras clave:** secado solar, semilla de pastos.

## INTRODUCTION

The sun is an important source of free and inexhaustible energy for Earth planet. Currently, new technologies have been developed to use solar energy in the generation of electricity and heat. These approaches have already been tested and are widely practiced worldwide as renewable alternatives

## INTRODUCCIÓN

El sol es una fuente importante de energía libre e inagotable para el planeta Tierra. Actualmente, se han desarrollado nuevas tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en la generación de electricidad y calor. Estos enfoques ya han sido probados y se practican ampliamente en todo el mundo

<sup>1</sup> Autor para correspondencia: Yoel Rodríguez Gago, e-mail: [ygago@ica.co.cu](mailto:ygago@ica.co.cu)

Recibido: 25/09/2019.

Aprobado:

to conventional technologies. Almost four million exajoules ( $1\text{EJ} = 10^{18}\text{J}$ ) of solar energy arrive on Earth annually. Despite this enormous potential and increased awareness, the contribution of solar energy to the world's energy supply remains insignificant. Another important perspective regarding solar research is associated with the current momentum towards reducing global carbon emissions, which has been a global environmental, social and economic problem in recent years. Therefore, the adoption of solar technologies would significantly mitigate the problems associated with energy security, climate change and unemployment (Kabir et al., 2018) such as low solar cell efficiencies, low performing balance-of-systems (BOS).

The need for sustainability, food security and for decoupling agricultural production prices from the fluctuating prices of fossil fuels has driven the search for sustainable and adequate processing of agricultural products. A method widely practiced by farmers in developing countries since ancient times is sun drying for the preservation of food, seeds and agricultural crops, but this method has inherent limitations such as: large post-harvest losses caused by drying inadequate; fungal attacks; invasion of insects, birds and rodents; and, unexpected rain and other meteorological phenomena. The limitations described above result in minimum quality standards. In addition, conventional drying methods require longer drying periods, large open areas in which the product can be exposed to the drying process and a large number of working hours. However, artificial drying has proven to be more efficient than other drying methods, which cannot be completely controlled (García-Valladares et al., 2019) food security and to decouple food prices from the fluctuating prices of finite fossil fuels have driven the search for sustainable processing and the adequate storage of agricultural products. For this reason, a hybrid thermo-solar monitoring plant for the dehydration of foods was successfully designed and built in Zacatecas, Mexico. The thermal energy is provided by a solar air heating system with 48 collectors ( $111.1\text{ m}^2$ ).

Although there have been many research papers on solar drying technology that have been published in recent years (Sahuet et al., 2016; Sonthikun et al., 2016; Roche et al., 2017; Teixeira-da Silva and Malpica-Pérez, 2016; Gavhale et al., 2015) direct drying and indirect drying. Open sun drying is drying of product openly in sun but it has some demerits to overcome these, various drying techniques have been proposed in recent years. Direct drying and indirect drying can be done using greenhouse dryer which can further be classified as greenhouse dryer with natural convection (passive mode); the situation remains unchanged, with solar dryers available. The development of solar drying technology follows two lines: (a) simple and economical dryers with low power capacity, low efficiency and a short service life; or (b) more expensive systems, with a correspondingly higher power and efficiency capacity, and a longer service life, but with a more limited availability. Most of the solar dryer designs currently available are mainly used in different subsistence crops or

como alternativas renovables a las tecnologías convencionales. Casi cuatro millones de exajoules ( $1\text{EJ} = 10^{18}\text{J}$ ) de energía solar llegan a la tierra anualmente. A pesar de este enorme potencial y aumento de la conciencia, la contribución de la energía solar al suministro mundial de energía sigue siendo insignificante. Otra perspectiva importante con respecto a la investigación solar está asociada con el impulso actual hacia la reducción de las emisiones globales de carbono, que ha sido un problema ambiental, social y económico mundial en los últimos años. Por lo tanto, la adopción de tecnologías solares mitigaría significativamente los problemas asociados con la seguridad energética, el cambio climático y el desempleo (Kabir et al., 2018) such as low solar cell efficiencies, low performing balance-of-systems (BOS).

La necesidad de sostenibilidad, seguridad alimentaria y de desvincular los precios de las producciones agropecuarias de los precios fluctuantes de los combustibles fósiles ha impulsado la búsqueda de un procesamiento sostenible y adecuado de productos agrícolas. Un método ampliamente practicado por los agricultores en los países en desarrollo desde la antigüedad es el secado al sol para la conservación de alimentos, semillas y cultivos agrícolas, pero este método tiene limitaciones inherentes tales como: grandes pérdidas posteriores a la cosecha causadas por un secado inadecuado; ataques de hongos; invasión de insectos, pájaros y roedores; y, lluvia inesperada y otros fenómenos meteorológicos. Las limitaciones descritas anteriormente dan como resultado estándares mínimos calidad. Además, los métodos de secado convencionales requieren períodos de secado más largos, grandes áreas abiertas en las que el producto puede exponerse al proceso de secado y una gran cantidad de horas de trabajo. Sin embargo, el secado artificial ha demostrado ser más eficiente que otros métodos de secado, que no pueden controlarse por completo (García et al., 2019) food security and to decouple food prices from the fluctuating prices of finite fossil fuels have driven the search for sustainable processing and the adequate storage of agricultural products. For this reason, a hybrid thermo-solar monitoring plant for the dehydration of foods was successfully designed and built in Zacatecas, Mexico. The thermal energy is provided by a solar air heating system with 48 collectors ( $111.1\text{ m}^2$ ).

Aunque han sido muchos los trabajos de investigación sobre tecnología de secado solar que se han publicado en los últimos años (Sahu et al., 2016; Sonthikun et al., 2016; Roche et al., 2017; Teixeira y Malpica, 2016; Gavhale et al., 2015) direct drying and indirect drying. Open sun drying is drying of product openly in sun but it has some demerits to overcome these, various drying techniques have been proposed in recent years. Direct drying and indirect drying can be done using greenhouse dryer which can further be classified as greenhouse dryer with natural convection (passive mode); la situación permanece sin cambios, con los secadores solares disponibles. El desarrollo de la tecnología de secado solar sigue dos líneas: (a) secadores simples y económicos con baja capacidad de potencia, baja eficiencia y una vida útil corta; o (b) sistemas más caros, con una capacidad de potencia y eficiencia correspondientemente más altas, y una vida útil más larga, pero con una disponibilidad más limitada. La mayoría de los diseños de secadores solares actualmente disponibles se utilizan principalmente en diferentes cultivos de subsistencia o en la producción industrializada a pequeña escala. Pocos estudios

in small-scale industrialized production. Few studies have focused on the research and development of high capacity solar drying systems (more than 200 kg)

The use of thermo solar technologies in agricultural production is then an economic alternative for small and medium producers to improve their productive capacities, when compared to traditional dehydration methods, allowing them to achieve sustainable development by producing minimal environmental impacts (Milani and Carvallo, 2013). In recent years, the development of applications for the use of alternative energy has aroused interest in the analysis of forms of efficient and adequate use of renewable energy sources. That has motivated the development of drying systems for agricultural products using solar thermal energy.

There are different types of solar dryers, which are classified as direct, indirect solar dryers and a hybrid of both, according to the way heat is transferred. According to the way in which solar energy is used and the circulation of air within them, they are classified in dryer systems with active and passive solar energy, which are dryers with natural or forced circulation (Roche et al., 2017).

Therefore, the objective of this work is to design an indirect solar dryer with forced air circulation for drying botanical seeds of pastures and forages, which in turn protects the seeds from environmental conditions and contamination that may damage their quality.

## METHODS

In some publications, a simple classification of solar dryers based on the mode of use of solar energy is proposed. Another classification criterion is according to the energy source that activates them. It is said that a dryer is hybrid when it can be activated by more than one power source. Another classification refers to the productive scale (Laborde and Williams, 2016).

The developed solar dehydration technologies are aimed at economic solutions, such as support for small and medium producers, compatible with the environment, seeking energy efficiency and using easily accessible materials. The models are developed according to the needs of the producers, according to the volume of production, availability of connection to the electricity grid, the seasonality of the crops and the drying conditions of the products. The technologies basically consist of active indirect solar drying systems, that is, they are systems where the products do not receive direct sunlight and operate by forced convection. In general, they have a solar air collector, a drying chamber and a fan (Espinoza, 2016).

The following aspects will be taken into account to design the dryer chamber:

1. Analysis of the bibliography, that provided the following information:
  - a) Three geometries (horizontal, inclined and conical) are the most used in drying chambers, in fixed bed dryers and three methods of product support (fixed trays, mobile trays, fixed bed).
  - b) The density of the product.
  - c) The recommended airflow.

se han centrado en la investigación y el desarrollo de sistemas de secado solar de alta capacidad (más de 200 kg).

El uso de tecnologías termo solares en la producción agrícola constituye entonces una alternativa económica para los pequeños y medianos productores de mejorar sus capacidades productivas, si se les compara con los métodos tradicionales de deshidratación, permitiéndoles lograr un desarrollo sustentable al producir mínimos impactos ambientales (Milani y Carvallo, 2013). En los últimos años, el desarrollo de las aplicaciones de aprovechamiento de energías alternativas, ha despertado el interés en los análisis de formas de aprovechamiento eficiente y adecuado de fuentes energéticas renovables. Lo que ha motivado el desarrollo de sistemas de secado de productos agrícolas mediante energía solar térmica.

Existen distintos tipos de secaderos solares, los cuales se clasifican en secadores solares directos, indirectos y un híbrido de ambos, de acuerdo a la forma en que se transfiere el calor; y de acuerdo a la forma en que la energía solar es utilizada y la circulación del aire dentro del mismo se clasifican en sistemas de secadores con energía solar activa y pasiva, que son los secadores con circulación natural o forzada (Roche et al., 2017).

Por lo que el objetivo del presente trabajo consiste en diseñar un secador solar indirecto con circulación forzada de aire para el secado de semillas botánicas de pastos y forrajes, que a su vez proteja a las semillas de las condiciones ambientales y de contaminación que puedan dañar la calidad de las semillas.

## MÉTODOS

En algunas publicaciones, se propone una clasificación simple de secadores solares basada en el modo de utilización de la energía solar. Otro criterio de clasificación es según la fuente de energía que los activa. Se dice que un secador es híbrido cuando puede ser activado por más de una fuente de energía. Otra clasificación está referida a la escala productiva (Laborde y Williams, 2016).

Las tecnologías de deshidratado solar desarrolladas están orientadas a soluciones económicas, como apoyo a pequeños y medianos productores, compatibles con el medio ambiente, buscando la eficiencia energética y utilizando materiales de fácil acceso.

Los modelos se desarrollan según las necesidades de los productores, según el volumen de producción, disponibilidad de conexión a la red eléctrica, la estacionalidad de las cosechas y las condiciones de secado de los productos. Las tecnologías consisten básicamente en sistemas de secado solar indirectos activos, es decir, son sistemas donde los productos no reciben la luz solar directa y funcionan mediante convección forzada. A nivel general, cuentan con un colector solar de aire, una cámara de secado y un ventilador (Espinoza, 2016).

Para el diseño de la cámara de secador se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

1. Análisis de la bibliografía, obteniendo la siguiente información:
  - a) Tres geometrías (horizontal, inclinada y cónica) son las más utilizadas en las cámaras de secado, en los secadores de cama fija y tres métodos de soporte del producto (bandejas fijas, bandejas móviles, lecho fijo).
  - b) La densidad del producto.
  - c) El flujo de aire recomendado.

2. The dimensions of the product bed, for a given load.
3. Simulation of the behavior of the air inside the drying chamber, using the SolidWorks 2018 software for the geometry obtained, considering: a) 2D and 3D, b) constant temperature and speed at the exit, c) The drying chamber is isolated, d) The properties of the air are constant, e) The product is considered as porous medium.
4. The behavior of the velocity field inside the 2D drying chamber.
5. The speeds obtained are analyzed to verify if the air is distributed in uniform way in the product bed.

To carry out the study of the dynamics of computational fluid CFD by its acronym in English, the following steps were followed: Resolution process through CFD; creating the 3D model; defining the type of problem; defining the type of fluid; defining boundary conditions; defining and generating the mesh; setting the calculation parameters; calculating. Obtaining and analyzing the results.

### Drying Chamber Design Considerations

To obtain the dimensions of the drying chamber, the following parameters are considered:

- 1.- The capacity of the product bed;

$$V = \frac{W}{\rho} \tag{1}$$

where: V: volume in m<sup>3</sup>; W: product weight in kg; ρ: volumetric density in kg / m<sup>3</sup>

- 2.- The height of the product bed(FARONI et al., 1993);

$$h = \frac{6}{5} \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{2}$$

where: h: product bed height in m, A: cross-sectional area in m<sup>2</sup>.

- 4.- Regarding the air flow inside a fixed bed drying chamber, several authors recommend a flow between 0,12 and 0,25 m<sup>3</sup>/s / m<sup>2</sup>, where m<sup>3</sup>/s represents the flow of air and m<sup>2</sup> the cross-sectional area, (FARONI et al., 1993);
- 5- It must allow the humid air to escape avoiding the condensation of water;
- 6- The temperature and air flow must be distributed homogeneously;
- 7- The design must be ergonomic, resistant and of easy construction with materials that minimize heat losses.

The proper selection of the materials that will be part of the prototype is essential for its correct operation and durability over time. For this, certain criteria that are shown below must be taken into account:

TABLE 1. Criteria for material selection  
TABLA 1. Criterios de selección de los materiales

Criterion	Description
Resistance	Capacity of the material to resist failures by bending, compression or cutting.
Cost	Material acquisition cost
Corrosion resistance	Capacity of the material to resist corrosion without additives

2. Las dimensiones de la cama del producto, para una carga determinada.
3. Simulación del comportamiento del aire en el interior de la cámara de secado, utilizando el software SolidWorks 2018 para la geometría obtenida, considerando: a) 2D y 3D, b) temperatura y velocidad constante a la salida, c) La cámara de secado está aislada, d) Las propiedades del aire son constantes, e) El producto se considera como medio poroso.
4. Se analiza el comportamiento del campo de velocidades en el interior de la cámara de secado en 2D.
5. Se analizan las velocidades obtenidas para verificar si el aire se distribuye de manera uniforme en la cama del producto.

Para la realización del estudio de la dinámica del fluido computacional CFD por sus siglas en inglés se siguieron los siguientes pasos:

Proceso de resolución mediante CFD; Crear el modelo en 3D; Definir el tipo de problema; Definir el tipo de fluido; Definir las condiciones de frontera; Definir y generar la malla; Establecer los parámetros de cálculo; Calcular; Obtención y análisis de los resultados.

### Consideraciones de diseño de la cámara de secado

Para obtener las dimensiones de la cámara de secado se consideran los siguientes parámetros:

- 1.- La capacidad de la cama del producto;

$$V = \frac{W}{\rho} \tag{1}$$

donde: V: volumen en m<sup>3</sup>; W: masa del producto en kg; densidad volumétrica en kg/m<sup>3</sup>

- 2.- La altura de la cama del producto (Faroni et al., 1993);

$$h = \frac{6}{5} \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{2}$$

donde: h: altura de la cama del producto en m, A: área de la sección transversal en m<sup>2</sup>.

- 4.- Respecto al flujo de aire en el interior de una cámara de secado de cama fija, varios autores recomiendan un flujo entre 0,12 y 0,25 m<sup>3</sup>/s / m<sup>2</sup>, donde m<sup>3</sup>/s representa el flujo de aire y m<sup>2</sup> el área de la sección transversal, (Faroni et al., 1993);
- 5- Debe permitir la salida del aire húmedo evitando la condensación del agua;
- 6- La temperatura y el flujo de aire debe distribuirse de forma homogénea;
- 7- El diseño debe ser de fácil construcción, ergonómico y resistentes, con materiales que minimicen las pérdidas de calor.

La adecuada selección de los materiales que formarán parte del prototipo es fundamental para su correcto funcionamiento y durabilidad en el tiempo. Para ello se deben tener en cuenta



Criterion	Description
Availability	Supply of material in the national market
Conductivity coefficient	Heat conduction resistance
Installation	Ease of installing the material in the equipment
Durability	Capacity of the material not to lose its properties

For the determination of the area of the collector, it is precise to take into consideration that it is directly proportional to the energy demand to perform the dehydration process and inversely proportional to the incident solar radiation and efficiency. Equation 1 allows establishing the required area of the collector (MONTERO et al., 2010)

$$A_c = \frac{Q_u}{I \cdot n} \quad (3)$$

$$Q_u = m_a \cdot c_{pa} (T_2 \cdot T_1) \quad (4)$$

where: Ac: Collector area, m<sup>2</sup>; Qu: Useful heat, kW; I: Global solar radiation (5 kWh / m<sup>2</sup> day); n: Efficiency (80%).

The most favorable placement of the solar radiation capture surfaces will be that which, depending on the application to which the system is destined, captures as much energy as possible. For the sizing of the sensors of the thermal photo systems, it is proposed that the ideal is to tilt them over the horizontal, the latitude of the place plus 10°. In this way, the maximum performance in winter will be obtained. (Ekechukwu and Norton, 1999).

$$\beta = (\phi - \delta) \quad (5)$$

where the declination angle  $\delta$  is given by:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (6)$$

where:  $\beta$ : inclination angle; L: latitude of the place.

To design the drying chamber it is necessary to establish the conditions of its internal structure, where the seed will be deposited on a fixed bed. Initially, determine the volume of the seed to be processed. Equation 6 allows setting the volume of the drying chamber

$$V_{tp} = \frac{M_t}{\rho_{ap}} \quad (7)$$

where: Vtp: Total volume of product to be processed; Mt: Total mass of the product to be processed;  $\rho_{ap}$ : Bulk density of the product to be processed.

The relationship between the cross-sectional area and the height of the product is (Faroni et al., 1993).

$$h = \frac{6}{5} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (8)$$

The cross-sectional area of the drying chamber must have the following relationship (FAO, 1996):

$$L = 1.5 a \quad (9)$$

determinados criterios que se muestran a continuación:

Para la determinación del área del colector es directamente proporcional a la demanda energética para realizar el proceso de deshidratado e inversamente proporcional a la radiación solar incidente y la eficiencia. La ecuación (1) permite establecer el área requerida del colector (Montero et al., 2010)

$$A_c = \frac{Q_u}{I \cdot n} \quad (3)$$

$$Q_u = m_a \cdot c_{pa} (T_2 \cdot T_1) \quad (4)$$

donde: Ac: Área del colector; m<sup>2</sup>, Qu: Calor útil; kW; I: Radiación solar global (5 kWh/m<sup>2</sup> día); n: Eficiencia (80 %).

La colocación más favorable de las superficies captadoras de la radiación solar será aquella que, en función de la aplicación a que se destine el sistema, capta la mayor cantidad de energía posible. Para el dimensionamiento de los captadores de los sistemas foto térmicos se plantea que lo ideal es inclinarlos sobre la horizontal, la latitud del lugar más 10°. De esta forma se obtiene el máximo rendimiento en invierno (Ekechukwu y Norton, 1999).

$$\beta = (\phi - \delta) \quad (5)$$

donde el ángulo de declinación viene dado por:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (6)$$

donde:  $\beta$ : ángulo de inclinación; L: latitud del lugar.

Para el diseño de la cámara de secado es necesario establecer las condiciones de su estructura interna, donde será depositada la semilla sobre un lecho fijo. Inicialmente se determina el volumen que la semilla a procesar. La ecuación (7) permite establecer el volumen de la cámara de secado

$$V_{tp} = \frac{M_t}{\rho_{ap}} \quad (7)$$

donde: Vtp: Volumen total de producto a procesar; m<sup>3</sup>; Mt: masa total producto a procesar, kg;  $\rho_{ap}$ : Densidad aparente producto a procesar, kg/m<sup>3</sup>.

La relación entre el área de la sección transversal y la altura del producto sea (Faroni et al., 1993)

$$h = \frac{6}{5} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (8)$$

El área de la sección transversal de la cámara de secado debe tener la siguiente relación (FAO, 1996):

$$L = 1.5 a \quad (9)$$

For the airflow inside a fixed bed drying chamber, FAO recommends a flow between  $0.12$  and  $0.25 \text{ m}^3 / \text{s m}^2$ . (Dalpasquale et al., 1991).

In order to avoid crushing and consider an adequate space between each tray, the volume of the internal chamber is  $0,054 \text{ m}^3$ . The dimensions of the internal chamber of the drying chamber are  $0,52 \text{ m}$  wide,  $0,315 \text{ m}$  high and  $0,33 \text{ m}$  deep.

## RESULTS AND DISCUSSION

For the determination of the movement kinetics of the fluid (hot air) and the thermal behavior inside the dryer and the seed layer, the incident solar radiation on the thermal system or installation was considered as initial data. For that, it was necessary to determine the optimal location of the solar collector in the installation, in order to obtain the highest possible thermal efficiency. Considering that Cuba is located in the northern hemisphere with respect to the equator, the surface of the collector must be oriented towards the south. Therefore, by means of the expression for the winter season ( $\beta = |\varnothing| + 100$ ), it was determined that the optimal angle of inclination between the surface of the collector and the horizontal should be  $32^\circ$ , based on the geographical latitude of the Institute of Animal Science (ICA) which has a value of  $22^\circ$ .

Taking into account the considerations and the proposed methodology. The following results were obtained:

The mesh of the computational domain and the boundary conditions applied to the model are shown in Figure 1, where the mesh refinement can be seen. From a level of refinement equal to 3, a total of 32 684 cells were obtained, of which 12 426 cells correspond to the fluid, 6 248 cells to the solid and 14 010 to partial cells of solid and fluid.

Flujo de aire en el interior de una cámara de secado de cama fija, la FAO recomienda un flujo entre  $0,12$  y  $0,25 \text{ m}^3/\text{s m}^2$  (Dalpasquale et al., 1991).

Con el propósito de evitar aplastamiento y considerar un espacio adecuado entre cada bandeja, el volumen de la cámara interna es de  $0,054 \text{ m}^3$ . Las dimensiones de la cámara interna de la cámara de secado son  $0,52 \text{ m}$  de ancho,  $0,315 \text{ m}$  de alto y  $0,33 \text{ m}$  de profundidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la determinación de la cinética de movimiento del fluido (aire caliente) y el comportamiento térmico en el interior del secador y la capa de semillas, se consideró como dato inicial la radiación solar incidente sobre el sistema o instalación térmica, para lo cual fue necesario determinar la ubicación óptima del colector solar en dicha instalación, con el propósito de obtener la mayor eficiencia térmica posible. Considerando que Cuba se encuentra localizada en el hemisferio norte respecto al ecuador, la superficie del colector debe estar orientada hacia el sur, por tanto, mediante la expresión para la época de invierno ( $\beta = |\varnothing| + 10^\circ$ ), se determinó que el ángulo óptimo de inclinación entre la superficie del colector y la horizontal debe ser de  $32^\circ$ , basado en la latitud geográfica del Instituto de Ciencia Animal (ICA) la cual tiene un valor de  $22^\circ$ .

Teniendo en cuenta las consideraciones y la metodología propuesta. Se obtuvieron los siguientes resultados:

El mallado del dominio computacional y las condiciones de fronteras aplicadas al modelo se muestran en la figura 1, donde puede apreciarse el refinamiento de malla efectuado. A partir de un nivel de refinamiento igual a 3 se obtuvieron un total de 32 684 celdas, de ellas 12 426 celdas corresponden al fluido, 6 248 celdas al sólido y 14 010 a celdas parciales de sólido y fluido.

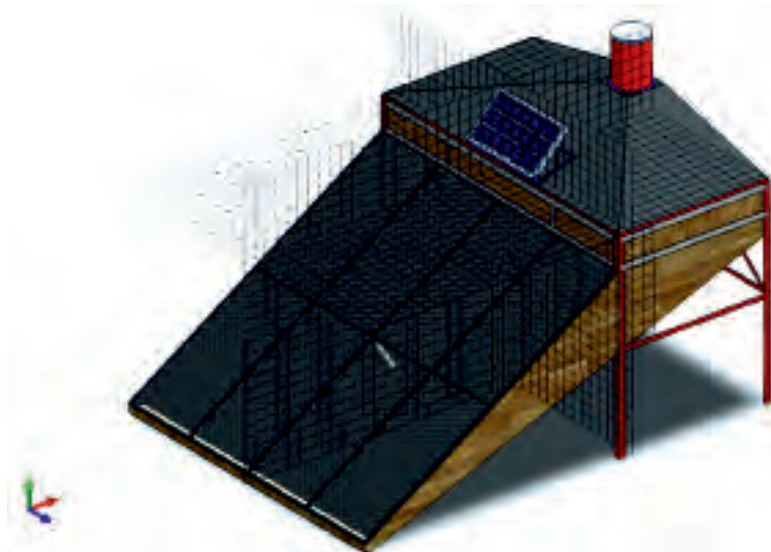


FIGURE 1. Boundary conditions and computational domain meshing.  
FIGURA 1. Condiciones de frontera y mallado del dominio computacional.

The volumetric air flow that moves the air extractor was made to influence the dryer outlet (red arrows) in the normal direction to the X-Z plane with a value equal to  $5 \text{ m s}^{-1}$ . At the entrance, the total pressure is declared having

El flujo volumétrico de aire que mueve el extractor de aire se hizo incidir a la salida del secador (flechas de color rojo) en dirección normal al plano X-Z con valor igual a  $5 \text{ m s}^{-1}$ . A la entrada se declara la presión total teniendo como referencia la

as reference the atmospheric pressure (green arrows). In the simulation of the prototype, the components that have been declared as porous media and perforated mesh have been deactivated. Through the simulation, 333 iterations were carried out to solve the convergence criterion for the engineering goals declared in the software in a time of 1051 s, obtaining a satisfactory level of convergence of the appropriate results. Figure 2 shows the distribution of the temperatures obtained inside the dryer, for a cross section in the YZ plane. A homogeneous temperature in the drying chamber section, that exceeded the ambient temperature by 12 °C, was achieved, with an average temperature of 32 °C. That favors the drying of the seeds since the temperature does not exceed 45 °C, the maximum recommended temperature for the safe drying of seeds.

presión atmosférica (flechas de color verde). En la simulación del prototipo han sido desactivados los componentes que han sido declarados como medio poroso y malla perforada.

Mediante la simulación se obtuvo un total de 333 iteraciones realizadas para darle solución al criterio de convergencia para las metas de ingeniería declaradas en el software en un tiempo de 1051 s, obteniendo un nivel de satisfactorio de convergencia de los resultados adecuado.

En la figura 2 se muestra la distribución de las temperaturas obtenidas en el interior del secador para un corte transversal en el plano Y-Z logrando una temperatura homogénea en la sección de la cámara de secado, superando a la temperatura ambiente en 12 teniendo una temperatura promedio de 32, lo que favorece al secado de las semillas, ya que la temperatura no sobrepasa los 45, temperatura máxima recomendada para el secado seguro de semillas.

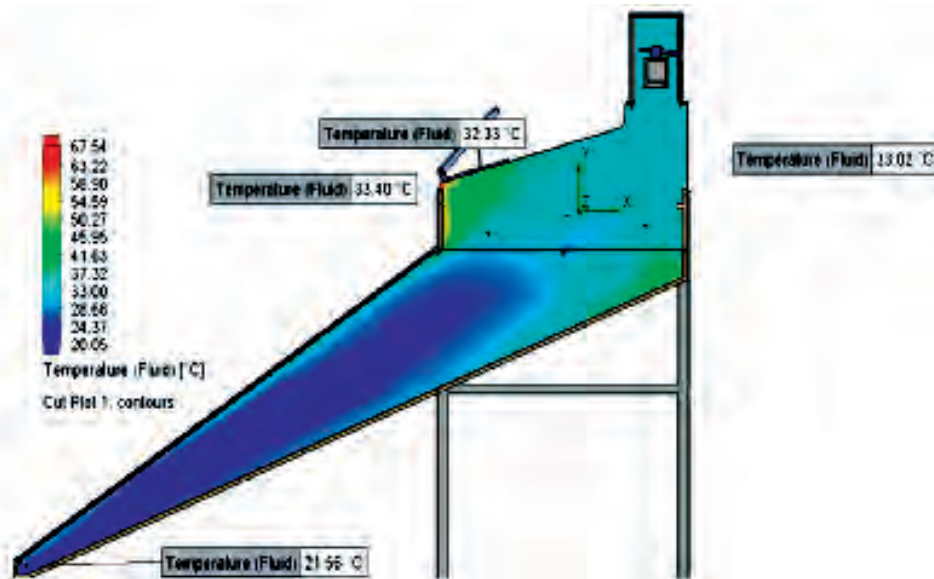


FIGURE 2. Distribution of temperatures inside the dryer.  
 FIGURA 2. Distribución de las temperaturas en el interior del secador.

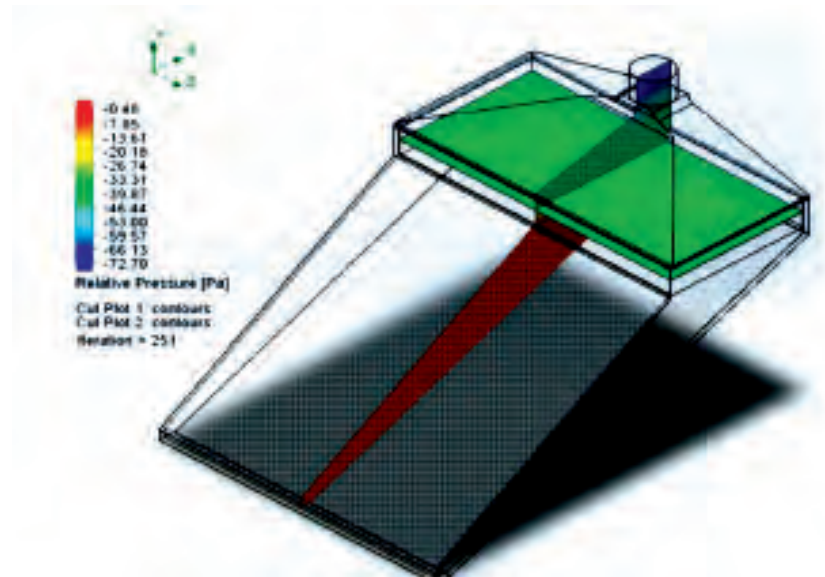


FIGURE 3. Relative pressure behavior (considering the seed layer)  
 FIGURA 3. Comportamiento de la presión relativa (considerando la capa de semillas).

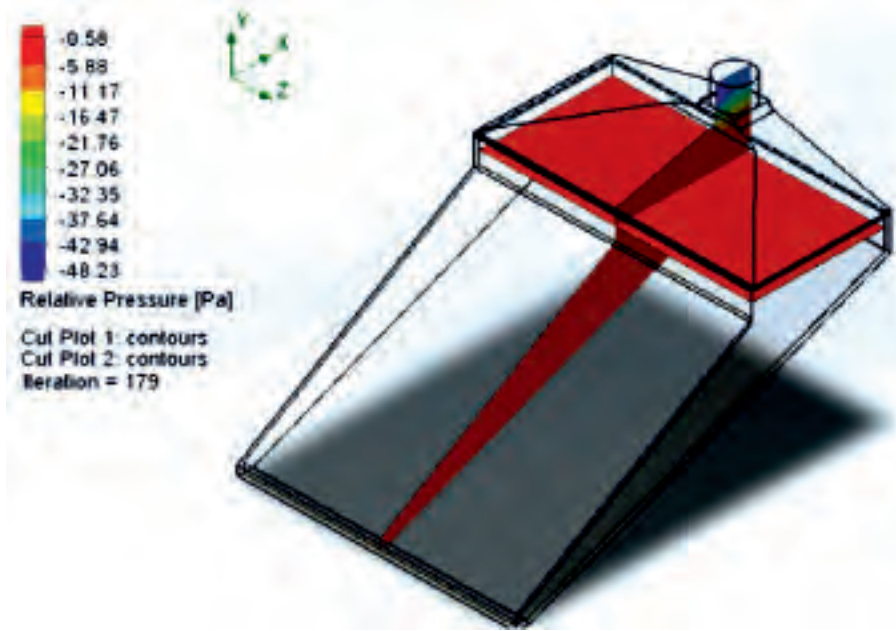


FIGURE 4. Relative pressure behavior (without considering the layer of seeds).  
 FIGURA 4. Comportamiento de la presión relativa (sin considerar la capa de semillas).

When analyzing the behavior of the relative pressure, shown in Figure 3, it is observed that in the specific case of the variant that considers the porous medium, the minimum pressures are reached in the region of the extractor, specifically at the exit of the extractor with a value  $-72,70$  Pa and the maximum pressures are reached in the region of the drying chamber, specifically in the solar collector, having a value of  $-0,48$  Pa. This evidenced that a pressure drop of  $72,22$  Pa occurred. However, as it can be seen in Figure 4, (the variant that does not consider the porous medium), the minimum pressures are also reached in the extractor region, at the outlet of the extractor with a value of  $-48,23$  Pa and maximum pressures are reached in the region of the drying chamber and the collector, with a value of  $-0,58$  Pa. It evidenced that a pressure drop of  $47,56$  Pa occurred.

Al analizarse el comportamiento de la presión relativa, mostrado en la figura 3, se observa que en el caso específico de la variante que considera el medio poroso, las mínimas presiones se alcanzan en la región del extractor, específicamente a la salida del extractor con un valor  $-72,70$  Pa y las máximas presiones se alcanzan en la región de la cámara de secado, específicamente en el colector solar, teniendo un valor de  $-0,48$  Pa, evidenciándose de esta forma que ocurre una caída de presión de  $72,22$  Pa. Sin embargo, como se puede observar en la figura 4. (la variante que no considera el medio poroso), las mínimas presiones se alcanzan igualmente en la región del extractor, específicamente a la salida del extractor con valor de  $-48,23$  Pa y las máximas presiones se alcanzan en la región de la cámara de secado y el colector, teniéndose un valor de  $-0,58$  Pa, evidenciándose de esta forma que ocurre una caída de presión de  $47,56$  Pa.

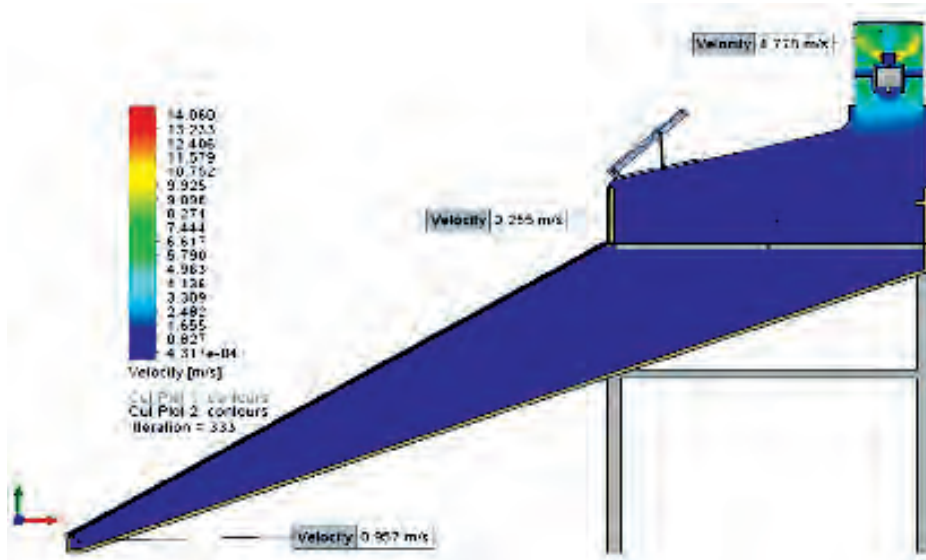


FIGURE 5. Relative pressure behavior (without considering the seed layer).  
 FIGURA 5. Comportamiento de la presión relativa (sin considerar la capa de semillas).



In order to know the behavior of the prototype, a series of simulations were carried out for each month of the year with the meteorological data of the last 12 months prior to the study, considering the meteorological variables of minimum average temperature and relative humidity for each month (Table 2). In these simulations the variables of maximum temperatures inside the dryer were determined taking into account the seed bed inside it (Tmax with MP), without the seed bed inside the dryer (Tmax without MP) and the average temperature in the seed bed (Tmed). These data are shown in the table below. With the annual meteorological variables of Cuba, a simulation of the solar dryer operation was carried out for each month of the year following the CFD resolution method described above. Twenty-four simulation studies were performed. For each month of the year the behavior of the temperatures inside the dryer were measured taking into account the volume of seeds and without it. The months where the highest temperatures were reached within the designed prototype, without the seed layer were July and August reaching values of 43 °C as maximum temperature. The highest temperatures reached inside the dryer, considering in the study the volume of seeds, were in August and September, with maximum values of 45 °C and 46 °C, respectively. When analyzing the temperatures of the fluid that circulates through the volume of seeds in the drying chamber, it was found that during the months of August and September, temperatures of 32 °C were reached for both months, achieving a temperature increase of 8 °C with respect to the ambient temperature set in the CFD analysis. For the months with the lowest average minimum temperature (December, January, February), a temperature increase similar to the warmer months is achieved, with an increase of up to 9 °C.

Con el objetivo de conocer el comportamiento del prototipo se realizaron una serie de simulaciones para cada mes del año con los datos meteorológicos de los últimos 12 meses anteriores al estudio considerando las variables meteorológicas de temperatura mínima media y humedad relativa para cada mes Insmet, (2019) (Tabla 2). En dichas simulaciones se determinaron las variables de temperaturas máximas dentro del secador teniendo en cuenta el lecho de semillas ( $T_{max}$  con MP) y sin el dentro del secador ( $T_{max}$  sin MP) y la temperatura media en el lecho de semillas ( $T_{med}$ ) estos datos se muestran en la tabla a continuación.

Con las variables meteorológicas anuales de Cuba se realizó una simulación del funcionamiento del secador solar para cada mes del año siguiendo el método de resolución mediante CFD descrito anteriormente, realizando un total de 24 estudios de simulación donde para cada mes del año se analizó el comportamiento de las temperaturas dentro del secador teniendo en cuenta el volumen de semillas y sin este. Dichas simulaciones arrojaron como resultados, que los meses donde se alcanzan las mayores temperaturas dentro del prototipo diseñado sin incluir en la simulación la capa de semillas son julio y agosto alcanzando valores de 43 como temperatura máxima. Para el análisis de las temperaturas considerando en el estudio el volumen de semillas, los meses donde se alcanzan las temperaturas más altas dentro del secador son agosto y septiembre con temperaturas máximas de 45 y 46 , respectivamente.

Al realizar el análisis de las temperaturas del fluido que circula a través del volumen de semillas en la cámara de secado se pudo constatar que durante los meses de agosto y septiembre se alcanzaron temperaturas de 32 para ambos meses, logrando un incremento de la temperatura de 8 con respecto a la temperatura ambiente fijada en el análisis de CFD. Para los meses de temperatura mínima media más bajas (diciembre, enero, febrero) se logra un incremento de temperatura similar a los meses más cálidos con aumento de hasta 9.

TABLE 2. Monthly and internal ambient temperature data of the dryer  
 TABLA 2. Datos de temperaturas ambiente mensuales e internas del secador

Year	Month	T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>	HR, %	Tmax without MP	Tmax with MP	Tmed seed bed
2018	J	24	31	78	40,27	46,23	32,79
	F	22	30	78	39,47	44,49	30,89
	M	20	28	75	37,28	41,74	28,76
	A	18	27	74	34,92	39,65	26,71
	M	18	26	75	35,06	39,29	26,49
2019	J	18	26	73	35,5	40,01	27,1
	J	19	28	71	35,79	41,41	27,02
	A	20	29	71	36,51	42,13	28,77
	S	21	30	74	37,62	44,01	28,96
	O	23	31	76	41,11	44,59	30,79
	M	24	32	75	43,6	44,35	31,61
	D	24	32	76	43,3	45,06	32,25

In general, after analyzing the behavior of temperatures within the designed prototype, it is valid to note that they do not exceed the maximum temperature of 45 , recommended for drying seeds.

De forma general después de analizar el comportamiento de las temperaturas dentro del prototipo diseñado, es válido destacar que las mismas no superan la temperatura máxima de 45, recomendada para el secado de semillas.

Another result obtained was the behavior simulation of the temperatures reached by the materials of the prototype component parts and the temperature of the fluid inside the dryer in general and in the drying chamber in particular for 8 hours of work (Table 3). This simulation was carried out for environmental conditions with an average minimum temperature of 17 °C, an average relative humidity of 70% and a solar radiation of 4,2 kW. These average values are ones of the lowest that could exist during the months of the year where it would be more complex to achieve an increase in temperatures in a solar dryer.

Otro resultado obtenido fue la simulación del comportamiento de las temperaturas alcanzadas por los materiales de las partes componentes del prototipo y la temperatura del fluido en el interior del secador en general y en la cámara de secado en particular para 8 horas de trabajo (tabla 3). Esta simulación se realizó para unas condiciones ambientales de temperatura mínima promedio de 17 una humedad relativa del aire promedio de 70% y una radiación solar de 4,2 kW, siendo estos valores promedios unos de los más bajos que podrían existir durante los meses del año donde sería más complejo lograr un incremento de las temperaturas en un secador solar.

**TABLE 3. Behavior of solids and fluid temperatures in 8 working hours**  
**TABLA. 3. Comportamiento de las temperaturas de los sólidos y el fluido en 8 horas de trabajo**

Hour	T <sub>initial</sub> °C	Temperature		Temperature	
		T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>cam d. secado</sub>
8		71,25	15,30	34,26	22,86
9		80,42	18,97	46,08	25,26
10		86,74	20,78	56,95	27,16
11		90,56	22,43	59,20	27,49
12	17	91,07	23,51	61,64	27,50
13		90,06	22,21	58,81	27,17
14		87,37	21,30	57,80	26,94
15		80,41	19,41	45,66	25,45
16		71,24	17,28	36,81	23,50
Average		83,24	20,13	50,80	25,93

As it can be seen in Table 3, the maximum temperatures reached in the prototype materials reach 91,06 °C at 12 hours with an average of 83,24 °C, obtaining the highest values between 10 and 14 hours. Similarly, with the behavior of the temperature of the fluid both, the maximum and the average in the drying chamber, the highest values were obtained at 12 hours, coinciding with the schedule of higher temperature of the solids with values of 61,64 °C and 27,50 °C, respectively. Also, it could be confirmed that the temperature inside the drying chamber was higher between 10 and 14 hours for an average temperature of 27,25 °C with a daily average for the fluid temperature of 25,93 °C, being 8,93 °C above room temperature. The temperature values reached the highest values at solar noon, which is when solar radiation strikes more perpendicularly on the collector surface.

## CONCLUSIONS

- The thermal modeling and kinetics of the design conceived are activated with the use of the SolidWorks computer system, the porous medium (seed layer for drying) and the evidence of an increase in temperature and a pressure drop, within the proposed installation.
- For unfavorable conditions of solar radiation and low temperatures during simulation of fluid kinetics, the prototype designed reached temperatures that exceeded the environment by 8 °C.

Como se puede observar en la Tabla 3, las temperaturas máximas alcanzadas en los materiales del prototipo llegan hasta los 91,07 °C a las 12 horas teniendo como promedio 83,24 °C obteniendo los valores más altos entre las 10 y las 14 horas. De manera similar ocurre con el comportamiento de la temperatura del fluido, tanto la máxima como la media en la cámara de secado, obteniendo los valores más altos a las 12 horas coincidiendo con el horario de mayor temperatura de los sólidos teniendo valores de 61,64 °C y 27,50 °C respectivamente. Igualmente se puede corroborar que la temperatura dentro de la cámara de secado fue mayor entre las 10 y las 14 horas para una temperatura promedio de 27,25 °C con un promedio diario para la temperatura del fluido de 25,93 °C siendo 8,93 °C superior a la temperatura ambiente. Los valores de temperatura alcanzan los valores más altos al mediodía solar, que es cuando la radiación solar incide más perpendicularmente sobre la superficie captadora.

## CONCLUSIONES

- El modelado térmico y la cinética del diseño concebido se realizó con el uso del software informático SolidWorks, considerando el medio poroso (capa de semillas para el secado), evidenciándose un aumento de la temperatura y una caída de presión, dentro de la instalación propuesta.
- Para condiciones desfavorables de radiación solar y bajas temperaturas durante la simulación de la cinética de fluidos, el prototipo diseñado alcanzó temperaturas que excedieron a la temperatura ambiente en 8 °C.

- As for the temperature in the drying bed, the highest values were obtained in the months of July, August and September, with temperature increases of 8 °C throughout the year, which demonstrates the stable operation of the prototype designed.
- En cuanto a la temperatura en el lecho de secado, los valores más altos se obtuvieron en los meses de julio, agosto y septiembre, con aumentos de temperatura de 8 °C durante todo el año, lo que demuestra el funcionamiento estable del prototipo

## REFERENCES/REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DALPASQUALE, V.A.; DE QUEIROZ, D. M; MARQUES, P. J.A. PEREIRA; R. S.: Secado de granos: natural, solar y a bajas temperaturas, [en línea] ser. Tecnología Poscosecha 9, Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe ed., Santiago, Chile, 1991. Disponible en: <http://www.fao.org/3/x5058s/x5058S05.htm#4.%20Secado%20de%20granos%20a%20bajas%20temperaturas> [Consulta: 13 de marzo de 2019].
- EKECHUKWU, O.V.; NORTON, B.: "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology", *Energy Conversion & Management*, 40: 615-655, 1999.
- ESPINOZA, J.: "Innovación en el deshidratado solar", [en línea] *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, DOI-10.4067/S0718-33052016000500010, 24(Especial): 72-80, agosto de 2016. ISSN-0718-3305.
- FARONI, L.R.D.; TEIXEIRA, M.M.; PEREIRA, I.A.M.; PEREIRA, A.L.R.; SILVA, F.A.P.: Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural, [en línea] ser. Pérdidas alimentarias posteriores a la cosecha, Ed. Oficina Regional de la FAO para América latina y El Caribe. Santiago, Chile, pp. 203, Roma, Italia, 1993. Disponible en: <http://www24.brinkster.com/alexweir/>
- GARCÍA, V. O.; ORTIZ, N.M.; PILATOWSKY, I.; MENCHACA, A.C.: "Solar thermal drying plant for agricultural products. Part 1: Direct air heating system", [en línea] *Renewable Energy*, DOI-10.1016/j.renene.2019.10.069, S0960-1481(19)31560-5, October 2019. ISSN-09601481,
- GAVHALE, M.; KAWALE, S.; NAGPURE, R.; MUJBAILE, V.N.; SAWARKAR, N.S.: "Design And Development Of Solar Seed Dryer", *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(4): 1005-1010, 2015. ISSN-2348-7968.
- KABIR, E.; KUMAR, P.; KUMAR, S.; ADELODUN, A.A.; KIM, K.-H.: "Solar energy: Potential and future prospects", [en línea] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, DOI-10.1016/j.rser.2017.09.094, 82: 894-900, febrero de 2018. ISSN-13640321.
- LABORDE, M. A.; WILLIAMS, J. R.: *Energía Solar*, ser. Publicación Científica N. 10, Ed. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, III ed., pp. 161, Buenos Aires, Argentina, 2016. ISBN-978-987-41-1100-5.
- MILANI, M.C.M.; CARVALLO, D.A.: Diseño de un secador solar prototipo de placas planas para pruebas en laboratorio, 181pp., Tesis (en opción al título de Ingeniería Mecánica), Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2013.
- MONTERO, I.; BLANCO, J.; MIRANDA, T.; ROJAS, S.; CELMA, A.R.: "Design, construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products", [en línea] *Energy Conversion and Management*, DOI-10.1016/j.enconman.2010.02.009, 51(7): 1510-1521, 2010. ISSN-01968904.
- ROCHE, L.D.; HERNÁNDEZ, J.P.; GARCÍA, A.: "Conceptual design of pilot scale solar dryer for seaweeds", Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas. Cuba., 17, 2017.
- SAHU, T.K.; GUPTA, D.V.; SINGH, A.K.: "A Review on Solar Drying Techniques and Solar Greenhouse Dryer", 3, 13: 31-37, 2016. ISSN-320-334X.
- SONTHIKUN, S.; CHAIRAT, P.; FARDSIN, K.; KIRIRAT, P.; KUMAR, A.; TEKASAKUL, P.: "Computational fluid dynamic analysis of innovative design of solarbiomass hybrid dryer: An experimental validation", [en línea] *Renewable Energy*, DOI-<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.095>, (92): 185-192, 2016. ISSN-0960-1481.
- TEIXEIRA-DA SILVA, J. M.; MALPICA, P.F.A.: "Desarrollo de un modelo matemático para dimensionar un deshidratador solar directo de cacao", *Ingeniería Mecánica*, ISSN-19(1): 30-39, abril de 2016. ISSN-1815-5944.

Yoel Rodríguez Gago, Investigador, Instituto de Ciencia Animal (ICA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: [ygago@ica.co.cu](mailto:ygago@ica.co.cu)

Yanoy Morejón Mesa, Profesor Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuarias, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: [yymm@unah.edu.cu](mailto:yymm@unah.edu.cu)

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.