

# DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR ACTIVO INDIRECTO APLICADO A DESHIDRATACIÓN DE MANZANAS

**Marcelo Coletto Rola** – [marcelo.coletto@utec.edu.uy](mailto:marcelo.coletto@utec.edu.uy)

Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC- ITRCS), Laboratorio Solar, Uruguay.

**Vitória Olave de Freitas** - [vitoria.olave@utec.edu.uy](mailto:vitoria.olave@utec.edu.uy)

Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC- ITRCS), Laboratorio Solar, Uruguay.

**Agustina Porta** - [agustina.porta@estudiantes.utec.edu.uy](mailto:agustina.porta@estudiantes.utec.edu.uy)

Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC- ITRCS), Uruguay.

**Resumen.** Los procesos de secado de alimentos requieren un elevado consumo de energía y utilizan en general combustibles fósiles. El uso de energías renovables, como la solar térmica, es una alternativa para este fin, siendo considerada atractiva en términos económicos, de eficiencia energética y aplicabilidad rural. El objetivo del presente trabajo es desarrollar un prototipo de secador solar activo del tipo indirecto y evaluar la eficiencia del secado de manzanas a través de la cinética de este proceso y del análisis de las variables monitoreadas (temperaturas, humedad e irradiación solar). El proceso de secado fue realizado con manzanas, las cuales presentaron un porcentaje de humedad inicial de 87% (base húmeda) y ha sido reducido a aproximadamente 11% (base húmeda) después de 19h de ensayo, en los días 06 y 07/12/2021. Con los datos de la variación de la humedad adimensional de los frutos con el tiempo se determinó la cinética de secado. Estos datos fueron ajustados a los modelos de Newton, Page y Henderson-Pabis por medio de análisis de regresión no lineal, utilizando el software MatLab®. El modelo de Page fue el que mejor se ajustó a este proceso. A través del sistema de monitoreo y control de los datos, se registró valores máximos de temperatura ambiente de 30,5 y 30,8°C, en la salida del colector de 61,3 y 66,5°C y en la cámara de secado de 46 y 53°C, para una irradiación solar global en el plan del colector de 938 y 1027 W/m<sup>2</sup>, en el primer y segundo día de secado, respectivamente. Se destaca que los resultados obtenidos en este trabajo son compatibles con los encontrados en la literatura para prototipos de sistemas de secado equivalentes y que esta es una tecnología con potencial para seguir siendo evaluada y optimizada en Uruguay.

**Palabras clave:** Energía Solar, Secador Solar, Deshidratación de Manzanas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un gran porcentaje de los alimentos producidos a nivel mundial se desperdician a lo largo de la cadena de suministro, desde la producción agrícola inicial hasta el consumo final en el hogar (FAO, 2012). En Uruguay, se estima que aproximadamente el 10% de los alimentos disponibles para el consumo humano se pierde o desperdicia, representando 1 millón de toneladas de productos al año. Entre los productos que presentan mayores índices de pérdidas están los cereales, los lácteos, las oleaginosas, frutas y hortalizas. Se estima que un 66% de las pérdidas suceden entre post cosecha y producción, 15% durante el procesamiento, 8% en la distribución y comercialización y 11% en los hogares (Lema et al., 2017).

El uso de técnicas de conservación de alimentos es una de las alternativas para evitar las pérdidas pos-cosecha, siendo el secado uno de los métodos más antiguos utilizados para este fin. El secado es empleado sobre todo para los alimentos considerados perecederos, como por ejemplo frutas y verduras, los cuales presentan porcentajes de humedad alrededor de los 80%. Este proceso ofrece varios beneficios, una vez que al reducir el tenor de humedad a niveles suficientemente bajos puede desacelerar la acción de enzimas, bacterias, levaduras y mohos, extendiendo la vida útil del producto, facilitando su transporte y almacenamiento (Moses et al., 2014). Además de evitar las pérdidas, el secado de frutas, por ejemplo, se emplea para su posterior utilización en la elaboración de productos como masas, yogurt, helados, entre otros (Fioreze, 2004).

El proceso de secado convencional requiere un elevado consumo de energía y utiliza en general combustibles fósiles, llevando a altos costos de proceso y también a un impacto ambiental. Con el avance de la crisis energética a nivel mundial, se impulsa la búsqueda por el uso de energías alternativas en los sectores productivos y la utilización de la energía solar para secar alimentos es una opción atractiva tanto en términos de eficiencia energética, rentabilidad y aplicabilidad rural (Mohana et al., 2020). Debido a ser una solución más sencilla y requerir costes de capital y operativos más bajos comparados al secado convencional, el secado solar es una alternativa para el pequeño y mediano productor, que minimiza las pérdidas posteriores a la cosecha (Días, 2017). Según Iriarte et al. (2013), en Argentina se han desarrollado distintos diseños de secaderos solares principalmente para la producción familiar o semi industrial para el secado de frutas, hortalizas y aromáticas.

En la literatura se encuentran diversos diseños y configuraciones de secadores solares para la deshidratación de alimentos (Mohana et al., 2020). Estos equipos están clasificados según el modo de funcionamiento, siendo considerados pasivos cuando el proceso se da por convección natural y activos cuando es por convección forzada. Según sus dimensiones y geometrías, se dividen en tipo invernadero y tipo cámara de secado. Se clasifican, de acuerdo a la exposición del producto a la radiación solar, como directos, mixtos, indirectos. En el secador indirecto, el aire ingresa en

el colector solar, se calienta para posteriormente ingresar en la cámara de secado, por donde fluye y mediante este flujo retira parte de la humedad del producto (César et al., 2020). El modelo directo está formado por un único recinto que desempeña ambas funciones, es decir, en el mismo lugar en que se calienta el aire por la radiación solar se encuentran los alimentos a deshidratar (Almeida et al., 2016). Por último, está el secador mixto, el cual es una fusión de los dos tipos (César et al., 2020).

Entre algunos de los parámetros a ser evaluados para la caracterización de los secaderos solares están las variaciones de la radiación solar, temperatura, humedad relativa y el flujo másico del aire, cantidad de agua evaporada y la cinética de secado de los productos a ser deshidratados (Iriarte et al., 2013). El monitoreo y control de las propiedades termodinámicas del aire son fundamentales para el análisis energético del sistema y para un funcionamiento óptimo del equipo (Nunes et al., 2020). Las curvas de cinética de secado permiten estudiar el comportamiento de la transferencia de calor y masa entre el producto y el agente de secado. La misma puede describirse mediante modelos matemáticos que permiten predecir el momento del proceso en el que se alcanza el contenido de humedad deseado y obtener así un producto de buena calidad (Araújo et al., 2021). Además, los modelos se pueden usar para optimizar los sistemas de secado existentes, desarrollar nuevos equipos o incluso para el control del proceso (Hernández et al., 2016).

Uruguay presenta una ubicación favorable para la generación de energías renovables, como es la energía solar. En el país, el promedio anual de la irradiación global horizontal (GHI) horaria varía de 4,35 kWh/m<sup>2</sup>/día en el sureste (Rocha) a 4,80 kWh/m<sup>2</sup>/día en el norte del país (Artigas), con una media en territorio de 4,60 kWh/m<sup>2</sup>/día, (Alonso-Suárez, 2017). Países Europeos con menor recurso solar, como Alemania, utilizan esta fuente de energía para diversas aplicaciones, un ejemplo es que 10,5% de la energía eléctrica neta pública en 2020 fue generada a través de la fotovoltaica (Instituto Fraunhofer, 2021a). En el caso de la energía solar térmica, Lauterbach et al. (2012) a través de numerosos estudios y utilizando el software TRNSYS, identificaron el potencial de aplicación de esta energía en procesos industriales en Alemania. Los resultados encontrados por dichos autores facilitaron la priorización de la aplicación de la calefacción solar térmica en el país (Kumar et al., 2019). En comparación con Uruguay, Alemania presenta valores de GHI inferiores, con aproximadamente 2,80 kWh/m<sup>2</sup>/día en el norte del país, 3,20 kWh/m<sup>2</sup>/día en el sur y una media en territorio de 3 kWh/m<sup>2</sup>/día (Instituto Fraunhofer, 2021b).

Considerando lo antes mencionado, el uso de tecnologías que utilicen el recurso solar tienen potencial de aplicación en Uruguay. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es desarrollar un prototipo de secador solar activo del tipo indirecto para la deshidratación de alimentos, el cual presente un sistema de adquisición de datos capaz de monitorear la radiación solar, temperatura y humedad relativa en el exterior e interior del secador y por fin evaluar la cinética de secado de manzanas rojas.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Detalles constructivos y de instalación del prototipo de secador solar

Se desarrolló un prototipo de secador solar del tipo indirecto con convección forzada constituido por un colector solar de aire acoplado a una cámara de secado. El prototipo fue instalado en el Instituto Tecnológico Centro Sur de la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC), ubicado en la ciudad de Durazno, Uruguay.

El colector solar presenta una inclinación de 35°, orientado hacia el norte con dimensiones de 0,80 m de ancho, 1,25 m de largo y 0,14 m de alto. Está construido en chapa aluminizada, con un aislamiento de espuma plast de alta densidad de 2 cm de espesor en las laterales y superficie inferior. Como placa absorbidora se utilizó una chapa metálica ondulada pintada de negro mate y en la superficie superior un vidrio templado de 4 mm de espesor. En la lateral inferior se encuentra la apertura responsable por el ingreso de aire en el colector, mientras que la lateral superior está conectada a la cámara de secado.

La cámara de secado fue construida en chapa aluminizada y acero inoxidable en las superficies externa e interna, respectivamente. Entre las dos superficies se utilizó como aislante térmico espuma plast de alta densidad de 5 cm de espesor. La cámara fue dividida en dos repartimientos de 0,70 m de alto, 0,40 m de ancho y 0,60 m de profundidad, donde en cada uno fueron colocadas 4 bandejas perforadas de acero inoxidable para la disposición de los productos a ser deshidratados. En la parte inferior fueron instalados 4 ventiladores (12 Volts y 0,8 Amperios) responsables por succionar el aire caliente desde el colector hasta la cámara de secado. Tres salidas de aire fueron instaladas en la parte superior de la cámara para la remoción de la humedad durante el secado.

### 2.2 Desarrollo del sistema de monitoreo, adquisición y control de datos del proceso

El sistema de adquisición de datos fue desarrollado utilizando un microcontrolador Arduino® Mega 2560, un módulo RTC 3231, un módulo tarjeta de memoria, un módulo relé, 4 sensores de temperatura DS18B20 y 3 sensores de humedad relativa modelo DHT22. Los sensores de temperatura y humedad fueron instalados en las 2 cámaras de secado ( $T_{Cámara1}$ ,  $H_{Cámara1}$ ,  $T_{Cámara2}$  y  $H_{Cámara2}$ ) y en el exterior del secador ( $T_{ext}$  y  $H_{ext}$ ). El cuarto sensor de temperatura fue colocado en la salida del colector de aire ( $T_{salida}$ ), a fin de monitorear la variación de la temperatura del aire al pasar por el colector. El control de los ventiladores es realizado a través de una comparación entre las temperaturas de salida del colector y de ambas cámaras, siendo accionado solamente cuando  $T_{salida}$  es superior a  $T_{Cámara1}$  y  $T_{Cámara2}$ , evitando la succión de un aire más frío, el cual perjudica el proceso de secado.

Además, se instaló un Piranómetro, modelo Kipp&Zonen-CMP6 Clase B, y un datalogger, modelo LOGBOX SE, para medir la irradiación global incidente en el plan de colector (GTI<sub>35</sub>) y almacenar los datos, respectivamente. Todos los datos se registraron en una frecuencia minuter y fueron guardados en tarjetas de memoria de 16GB. Para el posterior análisis de los mismos fue implementada una rutina utilizando el software MatLab®, empleado para hacer los cálculos y generar las gráficas. Para una mejor visualización de los resultados, los datos fueron promediados en escala horaria.

### 2.3 Cinética del secado solar de manzanas y modelo matemático aplicado

Para la evaluación del proceso de secado solar fueron realizados ensayos con manzanas rojas adquiridas en el mercado local de la ciudad de Durazno, Uruguay. Los frutos fueron cortados en rodajas de aproximadamente 3 mm de espesor y dispuestos en el secador solar. Para la evaluación de la humedad de las muestras se utilizó el método de desecación por estufa a 105°C durante 24h.

El ensayo de secado fue realizado a partir de las 10h del día 06/12/2021 hasta las 18h del día 07/12/2021. Para la construcción de la curva de cinética del secado, muestras de manzanas fueron retiradas del secador en intervalos de tiempo regulares de 1h en el período de 10h - 18h en el primer día y de 07h - 18h en el segundo día y pesadas en una balanza semi-analítica con precisión de 0,01 g para la evaluación de la pérdida de humedad con el tiempo. Este proceso fue realizado hasta que no se observó cambio sustancial en el peso de las muestras en tres análisis consecutivos.

La curva de cinética de secado experimental fue determinada a partir de la humedad adimensional de las muestras de manzana (Ec. 1) en función del tiempo.

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

Los datos experimentales fueron ajustados a los modelos de Newton (Ec. 2), Page (Ec. 3) y Henderon-Pabis (Ec. 4) por medio de análisis de regresión no lineal, utilizando el software MatLab®. La calidad de los ajustes se evaluó mediante los valores de los coeficientes de determinación, R<sup>2</sup>, (Ec. 5) y del desvío cuadrático medio, RMSD, (Ec. 6).

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K_1 t) \quad (2)$$

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K_2 t^n) \quad (3)$$

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = a \cdot \exp(-K_3 t) \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{e,i} - MR_{m,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{e,i} - \overline{MR_{e,i}})^2} \quad (5)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{m,i} - MR_{e,i})^2} \quad (6)$$

Dónde: MR = humedad adimensional, X = contenido de humedad para un tiempo determinado (base seca), X<sub>e</sub> = contenido de humedad en equilibrio (base seca), X<sub>0</sub> = contenido humedad inicial (base seca), t = tiempo de secado en minutos, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, a y k son parámetros de los modelos, N = número de observaciones, MR<sub>m,i</sub> = humedad adimensional de los modelos y MR<sub>e,i</sub> es la humedad adimensional experimental.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del desarrollo del prototipo de secador solar activo del tipo indirecto y de los ensayos realizados en el mismo. En base a los datos registrados en ambos dataloggers (Arduino y LOGBOX SE) se discute y compara el comportamiento de la temperatura y humedad en el interior y exterior del secador, así como la irradiación global en el plan del colector durante los dos días de pruebas. Por último, se evalúa la cinética de secado para los días de ensayos realizados, comparando los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura del área.

### 3.1 Prototipo de secador solar activo del tipo indirecto

En la Fig. 1 se puede observar el prototipo de secador solar activo del tipo indirecto, los elementos que componen el equipo, así como la ubicación de los sensores instalados.



Figura 1 – Prototipo de secado solar activo del tipo indirecto. (A) Cámara de secado; (B) Sensor de temperatura en la salida del colector (C) Piranómetro; (D) Colector solar de aire; (E) Salidas de aire; (F) Sensores de temperatura y humedad ambiente externo y *Dataloggers*; (G) Sensor de temperatura en la cámara de secado; (H) Sensor de humedad; (I) Ventiladores.

El modelo elegido para ser desarrollado tuvo en cuenta algunas recomendaciones encontradas en la literatura para el secado de alimentos (Forson et al., 2007; Melo, 2016; Bejarano Martínez et al., 2018). El interior de las cámaras de secado fue construido en acero inoxidable 304, material recomendado para el uso con estos productos. Se eligió el modelo indirecto, el cual presenta algunas ventajas frente al modelo directo, una vez que preserva la calidad del alimento a ser deshidratado y permite un mejor control de la pérdida de humedad y de la transferencia de calor. Además, se optó por construir un secador del tipo activo, por presentar una eficiencia térmica superior al modelo pasivo (Mohana et al., 2020).

### 3.2 Comportamiento de las variables del proceso de secado

En la Fig. 2 se demuestra el comportamiento de las temperaturas ambiente (externa), en la salida del colector y en las cámaras de secado, así como la irradiación global en el plan de colector registradas en ambos días de ensayo.

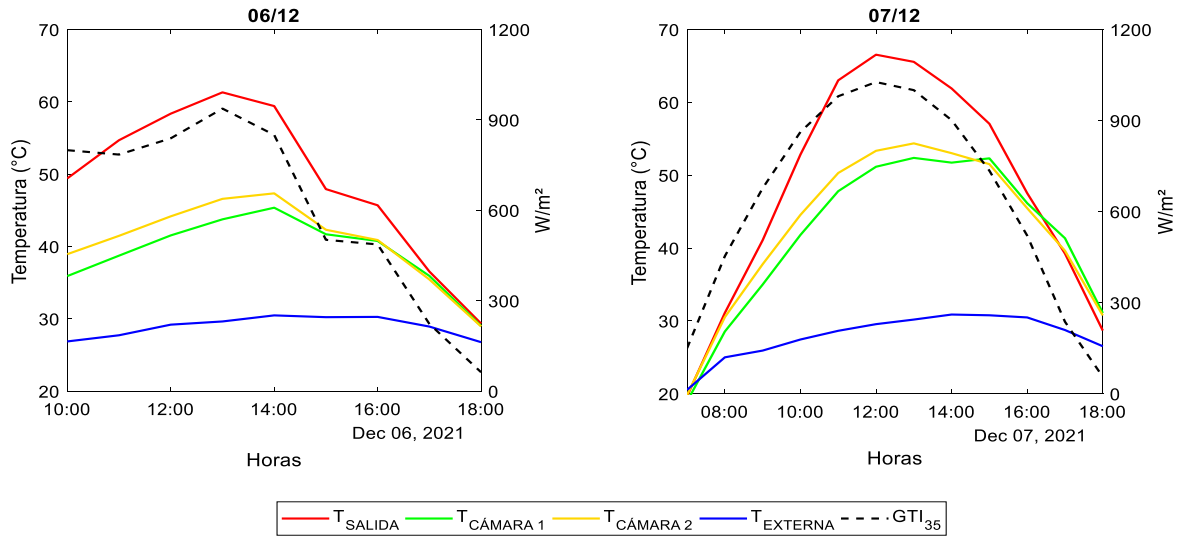


Figura 2 - Temperatura e irradiación solar en ambos días de ensayo

Se puede observar que en el día 06/12 hubo períodos de nubosidad, los cuales repercutieron en las oscilaciones de las temperaturas del colector y cámaras de secado. En ambos días, entre las 13h y 15h, se identifica la inercia térmica generada en el interior de las cámaras, una vez que su temperatura no disminuye en la misma proporción que la irradiación solar y la temperatura de salida del colector. Este comportamiento sugiere una acumulación térmica por parte del secador, el cual puede amortiguar las variaciones bruscas de las condiciones meteorológicas externas (César et al., 2020). Se destaca que, en los días de ensayo, entre las 12 y 13h, la temperatura en la salida del colector y la irradiación solar en el plan del colector alcanzaron sus valores máximos de 61,3°C y 938 W/m<sup>2</sup> en el 06/12 y 66,5°C y 1027 W/m<sup>2</sup> en el 07/12. Este mismo comportamiento fue registrado una hora después en las cámaras de secado, con valores alrededor de 46°C y 53°C en el primer y segundo día respectivamente. En el día 06/12 la temperatura ambiente varió entre 27°C y 30,5°C y el 07/12 la variación fue más significativa, estando entre 20 y 30,5°C, habiendo realizado el ensayo a partir de las 07h.

En la Fig. 3 se puede apreciar el comportamiento de las humedades (cámara 1, 2 y externa) y de la irradiación global inclinada (GTI<sub>35</sub>).

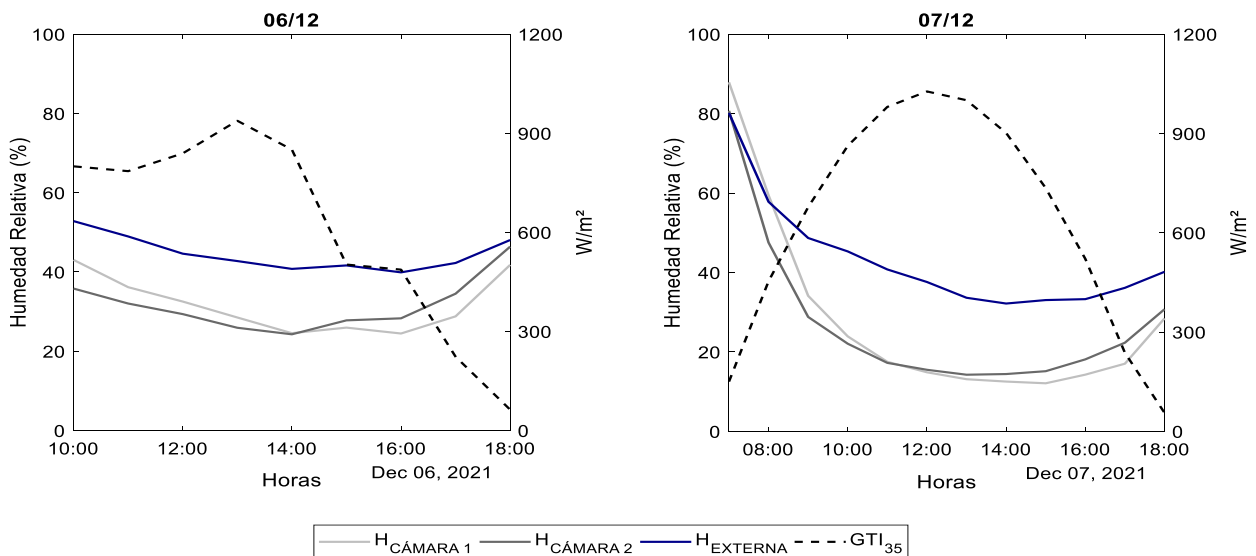


Figura 3 - Comportamiento de la humedad en los dos días de ensayo (06/12 y 07/12)

Analizando la Fig. 3 y 2 se resalta que el comportamiento de la humedad relativa es inversamente proporcional a la temperatura, llegando a sus valores mínimos aproximadamente entre las 11h y 16h en ambos días. Se visualiza que en el primer día de ensayo la humedad relativa dentro de las cámaras presenta un descenso superior a 30% entre las 10h y 14h.

En el inicio del segundo día se percibe que esta variable empieza a descender de manera exponencial en las primeras horas de sol, de 07h hasta 09h, variando de 80% a 30% aproximadamente. Cuando se compara la humedad relativa entre los dos días de secado, en el mismo período (10h - 16h), es posible observar que la misma está alrededor 35% en 06/12 y 15% en el 07/12. Este comportamiento está relacionado con la mayor pérdida de humedad de las manzanas en el primer día de secado, así como las condiciones ambientales de irradiación y temperatura, las cuales también son más elevadas en el segundo día del proceso donde la condición de cielo despejado fue característica.

El-Sebaï et al. (2002) diseñó y construyó un secador solar pasivo del tipo indirecto para la deshidratación de manzanas, uvas, higos, tomates y cebollas. Acoplado al colector del equipo, fue instalado un sistema de acumulación de energía térmica empleando como material arena. En uno de los ensayos realizados los autores utilizaron 1 kg de manzanas cortadas en rodajas y enteras, donde la temperatura promedio registrada en las cámaras de secado fue de 45,5°C. Los autores destacan que la acumulación de energía térmica ha provocado disminuciones significativas del tiempo de secado para todos los cultivos utilizados en la investigación.

Nunes et al. (2019) diseñó y construyó un sistema de secador solar activo del tipo indirecto para el secado de alimentos. En los días de ensayos, realizados con bananas, se registró una temperatura promedio en el interior de la cámara de secado de 45°C, para una radiación solar promedio de 635 W/m<sup>2</sup>. El autor destaca que para alcanzar estas temperaturas en los secaderos de frutas comerciales es necesario el uso intensivo de la energía eléctrica y que la utilización de la energía solar representa un ahorro importante en este proceso, demostrando viabilidad técnica del equipo desarrollado.

César et al. (2020) evaluó la eficiencia energética, la eficiencia de secado y la cinética de secado de tomates en un secador solar pasivo del tipo mixto, el cual tiene la posibilidad de trabajar como un secador solar mixto (MSD) o como un secador solar indirecto (ISD), una vez que la cámara de secado tiene una cubierta opaca móvil. Para el modelo ISD durante el proceso de secado la radiación máxima fue de 1044, 1006 y 1004 W/m<sup>2</sup>. La temperatura ambiente estuvo en un rango de 20 a 29,62°C, con una humedad relativa media de 27,38%. En el interior de la cámara de secado se observó temperaturas máximas entre 60,2 y 65,6°C.

Coelho et al. (2020) desarrolló un prototipo de secador solar de bajo costo y de exposición directa para la deshidratación de guayaba. En los ensayos realizados, se registró una temperatura promedio en el interior del secador de 49,1°C, para valores promedios de temperatura ambiente de 29,3°C y radiación máxima de 776 W/m<sup>2</sup>.

### 3.3 Evaluación del proceso de secado

Durante los ensayos de secado solar de manzanas, los sensores registraron valores promedios de temperaturas en el interior de las cámaras de secado, variando entre 29 y 46,5°C en 06/12 y entre 20 y 53,4°C en 07/12. En este mismo período la humedad relativa ha oscilado entre 24,3 y 46,4% en el primer día y entre 88 y 12% en el segundo día. En este proceso, el calor fluye desde el aire caliente a los alimentos más fríos debido al gradiente de temperatura, mientras que el vapor de agua pasa de los alimentos húmedos al aire seco debido a los efectos del gradiente de presión de vapor (César et al., 2020).

Las manzanas presentaron un porcentaje de humedad inicial de aproximadamente 87% base húmeda (b.h.) y al final del secado alcanzaron valores de 11,2 % y 10,5% (b.h.) para las cámaras de secado 1 y 2, respectivamente. El peso de la muestra fue reducido cerca de siete veces, después de 19h de secado. El tenor de humedad de las manzanas deshidratadas está en conformidad con el Reglamento Bromatológico Nacional del Uruguay (Decreto N° 315/994), el cual considera una fruta deshidratada o desecada, la fruta sana y limpia que, por acción de agentes físicos, naturales o artificiales, ha sufrido pérdida de agua, hasta un contenido final máximo de 25%. Resultados similares fueron encontrados por otros autores. El-Sebaï et al. (2002), lograron reducir el contenido de humedad de manzanas cortadas en rodajas de 82 a 13,5% en cerca de 25h de ensayos, utilizando un secador solar pasivo indirecto. Nunes et al. (2019) obtuvo una disminución del contenido de humedad de bananas de 74 para 25% (b.h.) en un secador solar activo del tipo indirecto después de 14h. César et al. (2020) reportó una reducción de nueve veces en el peso de las muestras de tomates en un secador solar pasivo del tipo indirecto en 26h. Coelho et al. (2020) registró 15h de secado para la guayaba en un secador solar del tipo directo, reduciendo la humedad de los frutos de 85,64 para 12% (b.h.). En la Fig. 4 se puede observar los frutos naturales y deshidratados.



Figura 4 - Frutos naturales y deshidratados

La Fig. 5 muestra la variación de la humedad adimensional de las muestras en función del tiempo de secado.

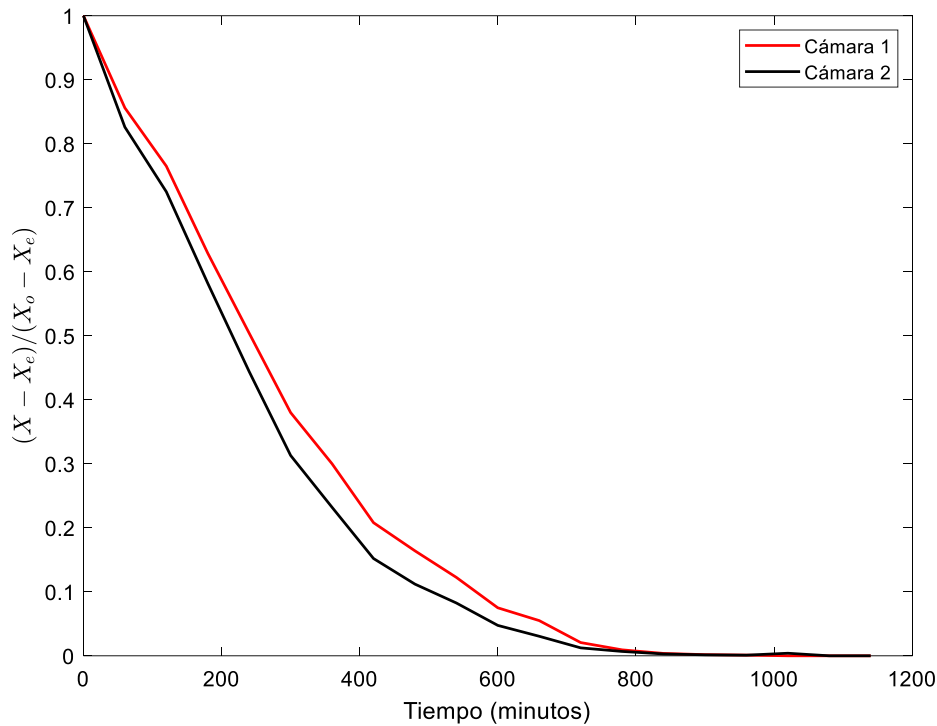


Figura 5 - Cinética de secado

A través de la Fig. 5 se puede deducir, debido al comportamiento lineal en el inicio del secado, que este proceso presenta un período de tasa constante. En esta etapa, la superficie del producto presenta una película de agua no ligada, la cual es rápidamente eliminada del material. Al alcanzar la humedad crítica, se inicia el periodo de tasa decreciente, el cual es caracterizado por una eliminación más lenta del agua, donde los mecanismos de transferencia de calor y masa se producen predominantemente en la estructura interna del material (Geankoplis, 1998).

En la Tab. 1 son presentados los parámetros de los modelos matemáticos de Page, Henderson-Pabis y Newton ajustados a los datos experimentales de la cinética de secado solar de manzanas y sus respectivos coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y el desvío cuadrático medio (RMSD). Los modelos elegidos para este estudio están entre las ecuaciones empíricas más utilizadas para el secado de alimentos (Bontempo et al., 2020).

Tabla 1 - Parámetros ajustados en los modelos,  $R^2$  y RMSD

	Modelos	Parámetros			$R^2$	RMSD
		a	k	n		
<b>Cámara 1</b>	Page	-	0,0032	1,3869	0,9982	0,0135
	Henderson-Pabis	1,0785	0,0037	-	0,9814	0,0431
	Newton	-	0,0034	-	0,9757	0,0493
<b>Cámara 2</b>	Page	-	0,0037	1,3558	0,9979	0,0140
	Henderson-Pabis	1,0665	0,0041	-	0,9840	0,0390
	Newton	-	0,0039	-	0,9800	0,0436

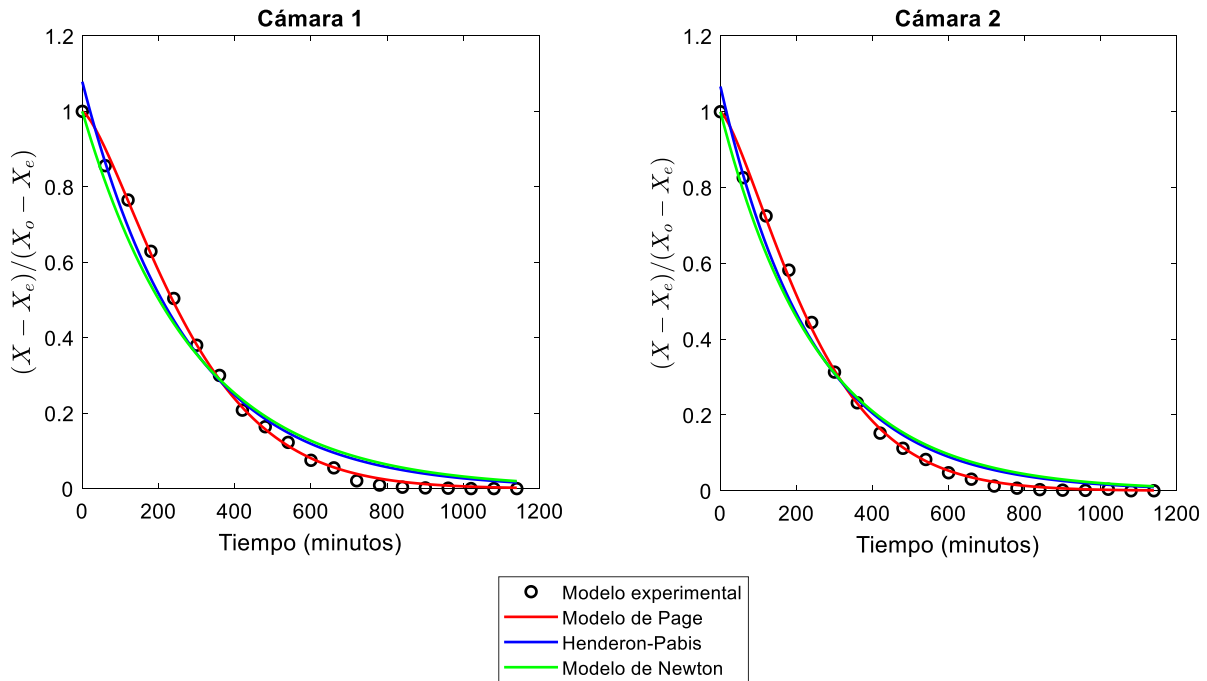


Figura 6 - Ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimental de cinética de secado

A través de la Tabla 1 y de la Fig. 6 es posible observar que los modelos matemáticos evaluados se ajustaron bien a los datos experimentales de secado para los días de ensayos, con  $R^2$  superior a 0,975 y RMDS inferior a 0,05. Entre los modelos evaluados, el que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el de Page, mostrando el mayor coeficiente de determinación y una menor desviación cuadrática media. Estos resultados son una indicación de que este modelo representa el fenómeno de secado solar de manzanas rojas. Todavía, es importante aclarar que más ensayos deben ser realizados para las distintas estaciones del año, buscando evaluar el modelo que describe mejor este proceso de secado. Nunes et al. (2019) también encontró una correlación de 0,99 para el ajuste de los datos experimentales del secado solar de bananas al modelo de Page.

En el secado de alimentos, en lugar de utilizar propiedades de transporte (conductividad térmica, difusividad térmica, coeficientes de transferencia de masa y calor en la interface, etc.), se utilizan parámetros del modelo para la descripción de la cinética, combinando en un solo parámetro todas las propiedades asociadas al fenómeno de transporte (Hernandez, 2016). En los modelos de Page, Henderson-Pabis y Newton, el parámetro "k" representa la constante de secado, la cual está relacionada con la difusividad térmica en el proceso, mientras el parámetro "n" del modelo de Page refleja la resistencia interna del producto al secado (Araújo et al., 2021).

#### 4. CONCLUSIONES

A través del prototipo de secador solar desarrollado en el presente trabajo fue posible realizar el secado de manzanas, reduciendo el contenido de humedad de las muestras de aproximadamente 87 a 11% (b.h.) en 800 minutos de ensayo. Durante el secado, en el período de máxima radiación, la temperatura en la salida del colector fue superior a 30°C en relación a la temperatura ambiente, alcanzando temperaturas de 61 y 66,5°C, mientras que en el interior de la cámara de secado llegaron a 46,5 y 53,4°C, para el primer y segundo día, respectivamente. Estos resultados demuestran la capacidad de conversión energética del prototipo construido y que el mismo es eficiente para este fin. El modelo de cinética de secado que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el de Page, con el mayor coeficiente de determinación y una menor desviación cuadrática media.

Realizando una comparación entre los resultados obtenidos en este trabajo y la literatura citada, es posible concluir que los mismos son similares y que las diferencias identificadas entre las condiciones de secado (temperatura y humedad) y tiempos de proceso están directamente relacionadas con las configuraciones de los prototipos, con las condiciones ambientales de los días de ensayos y con los alimentos deshidratados. Todavía, los resultados encontrados son prometedores y el prototipo tiene potencial para seguir siendo evaluado y optimizado. Futuramente se espera evaluar e incorporar sistemas de almacenamiento de energía térmica para mitigar el gradiente térmico día-noche, aumentando la velocidad del proceso de secado. En suma, este tipo de tecnología puede ser ventajosa para aplicaciones que buscan reducir los tenores de humedad de distintos productos, generando valor agregado al mismo, contribuyendo para el desarrollo sostenible y haciendo el uso de una energía limpia y renovable.



## REFERENCIAS

- Almeida, I. B., Lima, M. A. A., de Souza, L. G. M., 2016. Desenvolvimento de secador solar construído a partir de material reciclável. *Holos*, 4, 197-205.
- Alonso-Suárez, R., 2017. Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales, Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay).
- Araújo, K. T. A., Queiroz, A. J. M., Figueirêdo, R. M. F., Da Silva, R. C., Amadeu, L. T. S., Paiva, Y. F., 2021. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo das polpas de noni e umbu, *Research, Society and Development*, vol. 10, n.4, p. e46710413985-e46710413985.
- Bejarano Martínez, C. A., 2018. Evaluación del efecto del uso de un deshidratador solar pasivo indirecto de flujo turbulento y de un deshidratador solar pasivo en propiedades fisicoquímicas y organolépticas de mango, naranja y mandarina-estudio de caso de Tocaima Cundinamarca, Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Bontempo, L. H. S., Castejon, L. V., Dos Santos, K. G., 2020. Secagem da casca de tangerina:cinética e desempenho do secador solar convectivo, *Research, Society and Development*, vol. 9, n.6, p.e44963458-e44963458.
- César, L. V. E., Lilia, C. M. A., Octavio, G. V., Isaac, P. F., Rogelio, B. O., 2020. Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). *Renewable Energy*, 147, 845-855.
- Coelho, B. S., Nascimento, M. M., Souza, K. S. M., Coelho, C., Machado, N. S., 2020. Cinética de secagem e avaliação físico-química da goiaba desidratada em um protótipo de secador solar, *Nucleus*, v.17, n.2.
- Decreto 315/994. Reglamento Bromatológico Nacional, 4º edición, IMPO, Dirección Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales, R.O.U.
- Días, A. M. S. M. R., 2017. Secagem solar como técnica para reduzir as perdas-pós-colheita dos pequenos produtores. Construção de um secador solar indireto a partir de materiais reutilizados, Tesis de Maestría, Instituto Superior de Agronomía (ISA), Universidade do Porto.
- El-Sebaï, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I., El-Gohary, H. G., 2002. Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy conversion and management*, 43(16), 2251-2266.
- FAO, 2012. Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención, Roma.
- Fioreze, R., 2004. Princípios de secagem de produtos biológicos, UFPB, João Pessoa: Editora Universitária, 229p.
- Forson, F., Nazha, M., Akuffo, F., and Rajakaruna, H., 2007. Design of mixed mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renewable Energy*, 32(14):2306–2319.
- Geankoplis, C. J., 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias, 3 Ed, México, CECOSA.
- Hernández, L. S., Zapata, R. B., Sandoval, A. F. F., 2016. Evaluación de alternativas de secado en el proceso de elaboración de harina de lombriz, *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, vol. 17, no 1, p. 55-71.
- Instituto Fraunhofer, 2021a. Net Public Electricity Generation in Germany in 2020. Disponible en: [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/electricity\\_production\\_germany\\_2020.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/electricity_production_germany_2020.pdf). Accesado el 05 de diciembre de 2021.
- Instituto Fraunhofer, 2021b. Recent facts about photovoltaics in Germany. Disponible en: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>. Accesado el 05 de diciembre de 2021.
- Iriarte, A., Bistoni, B., García V., Luque, V., 2021. Evaluación de un secadero solar tendalero túnel: estudio de secado de manzanas, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, vol. 17, p. 1-8.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K., 2012. The potential of solar heat for industrial processes in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5121-5130.
- Kumar, L., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., 2019. Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review, *Energy conversion and management*, 195, 885-908.
- Lema, P., Acosta, M. J., Barboza, R., Barrios, S., Camaño, G., Crosa, M. J., 2017. Estimación de pérdidas y desperdicio de alimentos en el Uruguay: Alcance y causas, Montevideo, FAO, 116 p.
- Melo, C. T. M. C. B., 2016. Desenvolvimento e estudo experimental de um secador solar aplicado na secagem de banana. Tesis de Maestría, PPGEM, UFCG, Campina Grande.
- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., Anandharamkrishnan, C., 2020. Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances, *Solar Energy*, 208, 321-344.
- Moses, J. A., et al, 2014. Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews*, vol. 6, no 3, p. 43-55.
- Nunes, A. G., Rocha, J. V. M., da Costa Almeida, M. V. L., Chaves Filho, É. F., de Freitas, L. M., Sales, A. Q., 2020. Análise energética da eficiência e do processo de secagem de um secador solar, VII CBENS - VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.

## DESIGN AND EVALUATION OF AN ACTIVE INDIRECT-TYPE SOLAR DRYER APPLIED TO APPLE DEHYDRATION

**Abstract.** *The food drying processes require high amounts of energy that usually are provided by fossil fuels. The use of renewable energies, such as solar thermal, is an alternative for this purpose, being considered attractive in economic*

*terms, energy efficiency and rural applicability. The aim of this work is to develop an active, indirect-type solar dryer prototype and to evaluate the efficiency of apple drying through the kinetics of this process and the analysis of the monitored variables (temperatures, humidity and solar irradiation). The drying process was carried out with apples, which presented an initial moisture content of 87% (wet base) and has been reduced to approximately 11% (wet base) after 19h, on days 06 and 07/12/2021. With the data of moisture ratio of this fruit over time, the drying kinetics were determined. These data were adjusted to the Newton, Page and Henderson-Pabis models using nonlinear regression analysis, through MatLab® software. Page's model was the one that best fit to predict the process. Through the data monitoring and control system, the values recorded as maximum ambient temperature of 30,5°C and 30,8°C, at the collector outlet of 61,3°C and 66,5°C and in the drying chamber of 46 °C and 53°C, for a global solar irradiation in the collector plan of 938 and 1027 W/m<sup>2</sup>, on the first and second day of drying, respectively. It is noted that the results obtained in this work are compatible with those found in the literature for similar solar drying systems and that this is a technology that has the potential to be further evaluated and optimized in Uruguay.*

**Key words:** *Solar Energy, Solar Dryer, Apple Dehydration.*