

IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS EN UN SECADERO SOLAR INDIRECTO DE HIERBAS, DESTINADAS A AUMENTARLA CAPACIDAD DE SECADO

Jorge Morsetto¹, Pablo Galimberti¹, María Milanesio¹, Alba Lema¹

¹Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería – Grupo de Energía Solar
Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto
Tel./Fax: (0358) 4676246 - e-mail: alema@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se describen y analizan un conjunto de reformas diseñadas y realizadas sobre un prototipo de secadero indirecto con recirculación de aire. El mismo utiliza la energía solar como única fuente de energía para cubrir los requerimientos térmicos y eléctricos demandados en la operación de secado. Las reformas realizadas sobre el equipo existente, se diseñaron con el propósito de mejorar el desempeño del secadero y se orientaron a incrementar la temperatura del aire para el secado y a disminuir las pérdidas térmicas en el equipo. La evaluación de las modificaciones realizadas en el secadero, se realizó a través de la determinación de parámetros y del análisis de los datos obtenidos en la experimentación efectuada. Los resultados se presentan en tablas y gráficos. Se determina también la curva de secado para el perejil fresco en las condiciones de operación del secadero, obteniéndose una humedad final en base húmeda del 11 % al cabo de 8 horas. Se alcanza una temperatura máxima para el aire en el secadero de 54 °C y prácticamente toda la operación de secado transcurre con temperaturas del aire de secado por encima de la temperatura ambiente en más de 20 °C.

Palabras clave: energía solar, secado solar indirecto, calentamiento de aire, secado de hierbas.

INTRODUCCIÓN

Las hierbas aromáticas y medicinales pueden ser consumidas frescas o secas. Al momento de la cosecha es común encontrar niveles de humedad superiores al 70 % y para conservar el material cosechado es indispensable reducir el contenido acuoso.

El secado puede definirse como la operación unitaria responsable de la reducción del contenido de humedad de cierto producto hasta el nivel requerido. Cuando se aplica a hierbas aromáticas o alimentos en general, el secado es un método de estabilización de los mismos, que se basa en la reducción de la actividad del agua para ralentizar los procesos de deterioro a los que se ven sometidos estos productos, de modo que el almacenamiento resulte seguro. El proceso de secado se debe seleccionar de modo tal, que no perjudique la calidad del vegetal, su color y aspecto, ni reduzca el contenido de componentes volátiles presentes en el mismo (Rahman y Perera, 1999). Para el secado de hierbas, la humedad final del sólido varía con la especie, abarcando un rango comprendido entre 10 % y 14 % de humedad expresada en base húmeda (Banchero et al, 2008).

En los secaderos solares indirectos, el producto a secar no se expone directamente a la radiación solar, se evita entonces la decoloración y el posible agrietamiento en la superficie del mismo. Estos equipos poseen una cámara de secado donde se almacena el producto a secar e ingresa el aire caliente. El calor necesario para la evaporación se transfiere de forma convectiva desde el aire caliente hacia el material húmedo y presentan la ventaja de permitir controlar parcialmente el proceso (Maldonado y Pacheco Delahaye, 2003).

Integrantes del Grupo de Energía Solar (GES) de la U.N.R.C., han desarrollado un prototipo de secadero indirecto para hierbas, con recirculación de aire, que utiliza la energía solar como única fuente de energía para cubrir los requerimientos térmicos y eléctricos demandados en la operación de secado, la descripción del mismo puede consultarse en Lema y Morsetto, (2020). Si bien los ensayos realizados sobre este equipo, daban cuenta de un producto final de alta calidad, la operación de secado requería en días soleados de invierno, al menos dos jornadas de trabajo para secar un kg de perejil fresco sin tallos. Con el propósito de aumentar la capacidad de secado, se diseñaron reformas sobre el equipo orientadas a incrementar la capacidad de secado del aire, mejorando la transferencia de calor en el intercambiador de calor agua-aire y se buscó también disminuir las pérdidas térmicas del secadero.

Para mejorar la transferencia de calor en el intercambiador de calor agua-aire, donde se calienta el aire antes de ingresar a la cámara de secado, se reemplazó el anterior flujo termosifónico del agua por un flujo forzado, mediante la incorporación de una bomba solar de 12 voltios. En relación al circuito del aire, se modificó la entrada conjunta de aire fresco y aire recirculado al equipo, sustituyéndola por dos entradas independientes, una para cada corriente de aire, lo que permitió un mejor aprovechamiento del aire recirculado. El aire recirculado y el aire fresco, luego de mezclarse y pasar por el intercambiador de calor, ingresan a la cámara de secado, la cual se aisló térmicamente a los efectos de disminuir las pérdidas de energía.

Con respecto al producto a secar, se utilizó perejil (*Petrosilenum sativum*), que es una planta aromática originaria del Mediterráneo oriental europeo, aunque actualmente se cultiva en todo el mundo. Posee propiedades antioxidantes y un importante valor nutricional, caracterizándose por tener un alto contenido de vitamina C, tiamina, β -caroteno, vitamina E y riboflavina, por eso al momento de secarlo es importante que la temperatura del aire no supere los 60 °C (DíazMaroto et al., 2002). Actualmente el perejil es utilizado ampliamente como condimento en diversos tipos de alimentos y como ingredientes activos en la farmacología.(Reyes Munguía et al., 2012).

Evaluar el rendimiento de un secadero, no es tarea sencilla, ya que son numerosas las variables que intervienen en el desarrollo de la operación de secado: las propiedades físicas del producto (tamaño, densidad, etc.), el contenido de humedad inicial, las propiedades de transporte y las características del aire de secado (temperatura, humedad y caudal) (Vargas y Camacho, 1996). A diferencia de los componentes y sistemas solares, tales como: colectores, calentadores solares de aire y agua, para los cuales existen procedimientos estandarizados de prueba para evaluar rendimientos, para el caso de los secaderos, no están disponibles. Esto se debe en gran medida a la versatilidad de diseños de los secadores. AugustusLeon et al. (2002), han realizado una revisión detallada de los parámetros y/o índices generalmente utilizados para evaluar diferentes tipos de secadores solares de alimentos y se han seleccionados algunos de estos parámetros para evaluar las modificaciones efectuadas en el secadero.

En este trabajo se presentan resultados del desempeño de un secadero solar indirecto de hierbas sometido a reformas, destinadas a aumentar la eficiencia global de la operación de secado. Se detallan los cambios introducidos sobre el prototipo, se explican las características y objetivos de la experimentación realizada, describiéndose los parámetros evaluados durante la operación de secado. Se analizan los resultados obtenidos.

DESCRIPCIÓN DE LAS MEJORAS INTRODUCIDAS EN EL EQUIPO DE SECADO

El prototipo de secado desarrollado y construido por miembros del GES y sobre el cual se realizaron las mejoras, se muestra en la figura 1. Está compuesto básicamente por un colector solar de agua, un sistema fotovoltaico que provee la energía eléctrica requerida y un monovolumen conformado por tres secciones: la de ingreso del aire para el secado (fresco y recirculado), la ocupada por el intercambiador de calor aire-agua y posteriormente la cámara de secado. En esta última, se disponen cuatro bandejas giratorias, de 0,21 m² cada una, donde es colocado el producto a secar. La descripción detallada del mismo puede consultarse en Lema y Morsetto, 2020.

Las modificaciones introducidas en el equipo, estuvieron orientadas a mejorar el desempeño del secadero. Se trabajó en incrementar la transferencia de calor en el intercambiador de calor (mediante la incorporación de una bomba de agua), en conseguir un mejor aprovechamiento del aire recirculado (modificando la entrada de aire al equipo) y en disminuir las pérdidas de energía del monovolumen (aislándolo térmicamente). La ubicación de las reformas mencionadas, se indican con líneas de puntos en la figura 1.

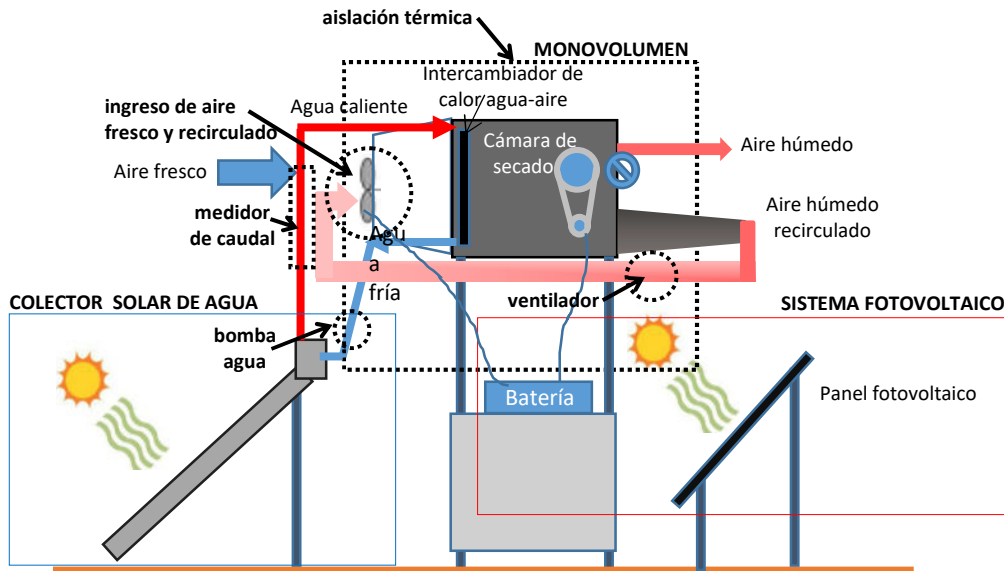


Figura 1. Disposición de las reformas realizadas en el prototipo de secadero solar indirecto con recirculación de aire

Incorporación de una bomba de agua y de un flotámetro en el circuito del agua en el intercambiador de calor agua-aire

El aire que ingresa a la cámara de secado, es calentado previamente mediante un sistema indirecto de calefacción solar térmica de aire. El aire aumenta su temperatura al pasar por un intercambiador de calor aire-agua, cuyos detalles pueden consultarse en Morsetto et al. (2018). El fluido caloportador es el agua que, al pasar por un colector solar, incrementa su energía cediéndola parcialmente al aire en el intercambiador de calor. El colector solar utilizado es uno de tubos evacuados (Fig. 2), del tipo water-in-glass, conocido como “manifold” y en las condiciones de operación tiene un rendimiento aproximado del 50% (Barral et al., 2017).



Figura 2. Vista parcial del circuito del agua. Flotámetro, bomba de agua y colector solar.

Con el fin de aumentar la velocidad del agua en el intercambiador de calor, favoreciendo de este modo la transferencia de calor, se incorporó una bomba solar para circulación de agua caliente en sistemas de calefacción, con las siguientes características comerciales: caudal máximo de 10 litros/minutos ($16,67 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$), temperatura máxima de $110 \text{ }^\circ\text{C}$, 12 voltios el voltaje de trabajo y bajo consumo. Si bien la bomba puede operar directamente con el panel solar, fue conectada a una batería para mantener un caudal constante y evitar la incidencia de la variabilidad del recurso solar. La bomba se ubicó en la cañería de agua fría a la entrada del colector solar (Fig. 1 y 2) y se fijó en la parte superior del mismo bajo un protector plástico que se muestra en la figura 2.

Al incorporar la bomba de agua y dejar de lado el flujo termosifónico, fue posible agregar un medidor de caudal. Se trata de un flotámetro para condiciones severas, marca Bruno Schillig, que mide el caudal a través de un seguidor magnético sobre una escala externa en un rango de 1 a 8 litros/minutos y admite fluidos a altas temperaturas. Esta incorporación dotó de versatilidad al equipo al habilitarlo para poder operar con diferentes caudales conocidos de agua. El caudalímetro se ubicó a continuación de la bomba de agua (Fig. 1 y 2).

Modificación del ingreso del aire recirculado y aire fresco

En el diseño anterior, que se muestra en la figura 3a, el aire requerido para la operación de secado (mezcla de aire fresco y recirculado) era impulsado hacia el interior del equipo por un electroventilador de uso automotriz que funciona con 12 voltios de corriente continua. Una desventaja que presentaba este diseño es la imposibilidad de medir el flujo másico de aire fresco y de aire recirculado que ingresan al equipo y no menos importante, es la marcada incidencia que tienen los efectos de las ráfagas de viento sobre el sistema de calentamiento del aire.

Para salvar los inconvenientes comentados anteriormente, se realizó una modificación en el ingreso del aire al equipo, los flujos de aire fresco y recirculado tienen entradas independientes, como se puede observar en la figura 3b. El aire fresco ingresa ahora, sin mezclarse por una tubería que, por su diseño, es menos sensible al alcance de las ráfagas de viento, ya que tiene una apertura de entrada de menor área y orientada hacia abajo. Al final de este ducto, en el ingreso a la cámara de mezcla, se dispone un ventilador más pequeño que el anterior, tipo cooler turbina (Fig. 3c), habitualmente utilizado en las computadoras que, conectado a una batería de 12 voltios, impulsa el aire fresco al interior de la cámara de mezcla. Este diseño permite, mediante un anemómetro de paletas, medir la velocidad del aire en el ducto y de este modo determinar el flujo de aire fresco que ingresa al equipo.

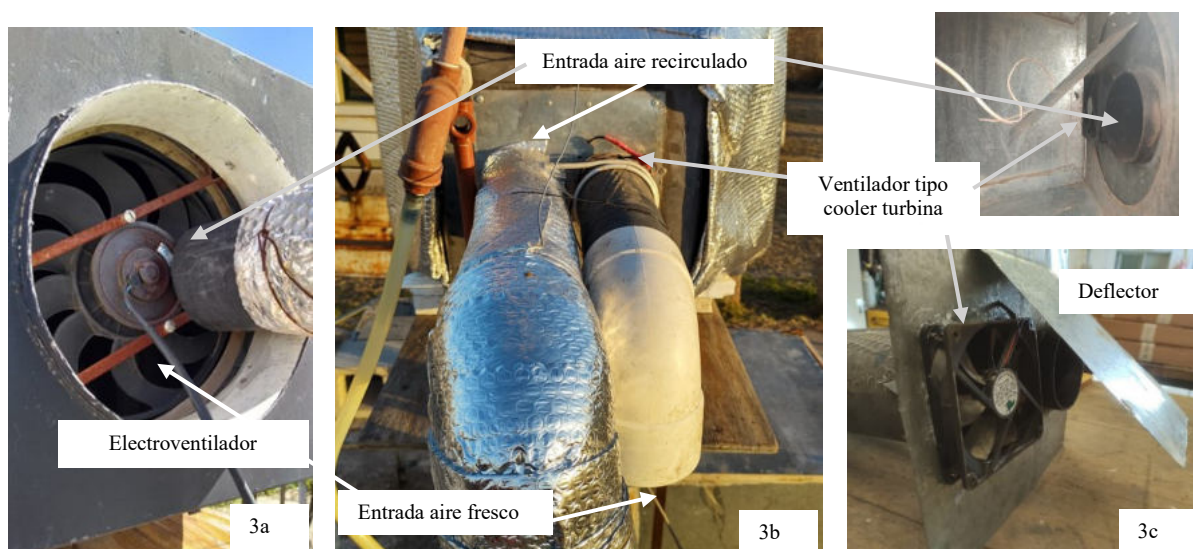


Figura 3. Entrada de aire fresco y recirculado al equipo. a. diseño anterior b. y c. diseño nuevo

En el diseño anterior tanto el aire fresco como el recirculado, ingresaban por la apertura donde se encontraba el electroventilador (Fig. 3a), siendo impulsada la mezcla de proporciones desconocidas al interior del equipo. La modificación realizada (Fig. 3b) permite asegurar que todo el aire recirculado

ingresa fehacientemente al equipo. La presencia de un deflector, en lo que llamamos cámara de mezcla (Fig. 3c), promueve la homogeneización del aire fresco con el aire recirculado.

A los fines de propiciar la recirculación del aire que abandona la cámara de secado, se colocó un segundo ventilador tipo cooler turbina de 12 voltios, en el ducto que conecta la salida de la cámara de secado con la cámara de mezcla, como se observa en la figura 4a. Un detalle de la ubicación e inserción del ventilador en el ducto, puede verse en las figuras 4b y 4c.

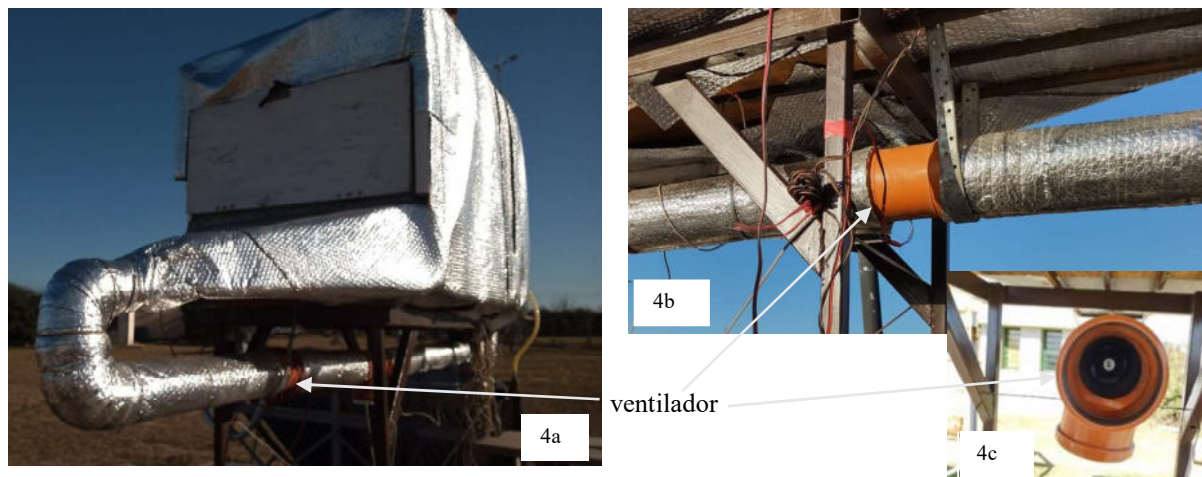


Figura 4. a. Ducto de recirculación del aire -b. y c. Detalle del ventilador inserto en el ducto.

Aislación térmica del monovolumen

En el diseño anterior, la superficie exterior del monovolumen fue pintada de color negro mate, como puede verse en la figura 5a. Esta elección, presentaba la ventaja de conseguir incrementar la temperatura del aire en la cámara de secado algunos grados más, como consecuencia del calentamiento producido por la radiación solar incidente en el mono volumen. Este hecho, pudo evidenciarse en las curvas de secado obtenidas a partir de muestras ubicadas al este, centro y oeste de las bandejas en la cámara de secado. Las curvas obtenidas, presentaban una marcada diferencia en la cinética de secado dependiendo de su orientación en las bandejas (Morsetto et al., 2018). Además, los días ventosos contribuían notoriamente a un enfriamiento del equipo en su conjunto.



Figura 5. Superficie del monovolumen
a. Diseño anterior, pintado negro mate -b. Diseño actual, aislado

Con el propósito de eliminar la incidencia de la posición del sol en la cinética de secado, de aminorar los efectos del viento y disminuir las pérdidas térmicas en general, se procedió a aislar el monovolumen y la porción del equipo que recoge el aire a la salida de la cámara de secado y que tiene forma de pirámide truncada irregular (Fig. 5b). Se utilizó para la aislación espuma de polietileno de 5 mm con película aluminizada en forma de lámina.

DETALLE DE LA EXPERIMENTACIÓN REALIZADA

Para obtener información que permitiera evaluar el desempeño del equipo de secado con las mejoras incorporadas, se realizó una experiencia de secado de perejil, a partir de la cual se determinó la curva de secado y se midieron variables de operación. El ensayo se realizó el 11/08/2022, en la Ciudad de Río Cuarto (Latitud: 33° 06' 27" S, Longitud: 64° 17' 50" O), en la República Argentina.

Producto a secar

Se utilizó perejil fresco de cosecha propia (*Petrosilenum sativum*), con una humedad del 85 % en base húmeda. Se recogió el día anterior al ensayo y se acondicionó, lavándolo con agua y dejándolo escurrir. Antes de comenzar el ensayo fue desprovisto de los tallos con una tijera y se seleccionó 1 kg de material húmedo a secar.

El perejil fresco se distribuyó sobre 4 bandejas y se dispusieron 3 muestras por cada bandeja, como puede observarse en la figura 6a. El recipiente contenedor de cada muestra fue realizado con una malla de aluminio (Fig. 6b).

La carga promedio de la secadora fue de 1,2 kg/m² de producto fresco por área de superficie de bandeja, garantizando un buen contacto entre la superficie del producto con el aire de secado, lo que resulta en un producto seco de calidad homogénea (Augustus Leon et al, 2002).



Figura 6. a. Distribución del perejil en las bandejas – b. Muestra testigo en la bandeja

Procedimiento del ensayo

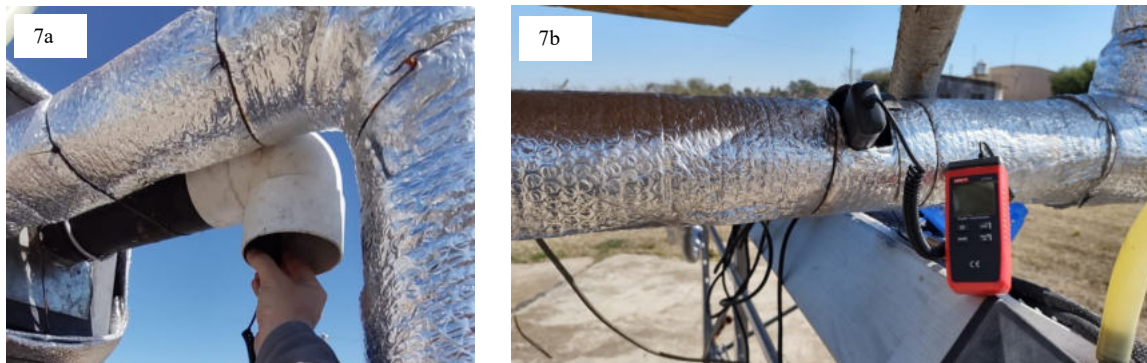
El registro de datos y la descripción de la instrumentación empleada durante la experiencia, se relata a continuación.

Se utilizaron cinco registradores Data Loggers HOBO U12-012 inalámbricos, para medir temperatura y humedad relativa del aire en diferentes puntos del equipo de secado, a saber: entrada de aire fresco, ambiente exterior, cámara de secado, salida de la cámara de secado y ducto de recirculación.

Se instalaron también termocuplas tipo T, en la cañería de agua, a la entrada y salida del intercambiador de calor agua-aire, en el interior de la cámara de mezcla de aire fresco y aire recirculado, en nueve puntos del intercambiador de calor del lado de la cámara de secado para evaluar la transferencia de calor en ese componente, en tres puntos interiores a la cámara de secado, en el ambiente exterior y en la porción del equipo que está a la salida de la cámara de secado, con forma de pirámide rectangular truncada irregular (Fig. 5b). Los registros se obtuvieron a intervalos de 1 minuto mediante un adquisidor de datos marca Agilent, al cual se le conectó también un piranómetro de alta precisión marca EKO modelo SBP 801, ubicado sobre el plano inclinado del colector.

La velocidad del aire, se midió con un anemómetro de paletas (Termo anemómetro UT 363S), colocado perpendicularmente al área de flujo, mostradas en la figura 7a. Cada registro correspondió a mediciones promediadas en un intervalo de un minuto que se realizaban en instantes previo a producirse la apertura de la puerta de la cámara de secado, para retiro de las muestras. Se midieron velocidades en el ducto de recirculación y en la entrada de aire fresco al equipo (Fig. 7a y 7b).

El secadero comenzó a operar a las 10:00 hs., tomándose esta hora como tiempo de inicio de la experiencia. A las 18:00 hs., se cerró el ingreso de aire seco, y el secadero continuó operando en estas condiciones, solo con el aire recirculado, hasta las 22:00 hs. que se detuvo el proceso.



*Figura 7 a. Medición de la velocidad de entrada del aire fresco
b. Medición de velocidad del aire en el ducto de recirculación*

Curvas de secado

El seguimiento del proceso de secado se realizó a partir de muestras testigos (Fig. 6b), colocadas sobre las cuatro bandejas (Fig. 6a), para las cuales se registró la pérdida de humedad en intervalos de una hora. La toma de datos se realizó desde las 10:00 hs. hasta las 22:00 hs. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos, puede considerarse que la operación de secado, concluyó a las 18 hs. Finalizada la experiencia, las bandejas fueron retiradas de la cámara de secado y las muestras llevadas a estufa a 104°C durante 24 hs. a los fines de determinar la masa seca.

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SECADO DEL SECADERO SOLAR MODIFICADO

Una de las características principales del prototipo de secadero bajo estudio, es la utilización del agua como fluido caloportador, la cual aumenta su energía en un calefón solar tipo water-in-glass que tiene una gran inercia térmica dependiendo de la masa de agua (Barral et al., 2017). El circuito completo del agua (cañerías, intercambiador y colector solar), requiere 90 litros, por lo tanto, los rendimientos calculados en el secadero deberán tener en cuenta esta característica. A diferencia de lo que ocurre con los secaderos que utilizan aire como fluido caloportador, la inercia térmica del agua, dificulta el análisis del desempeño de este secadero mediante rendimientos instantáneos. Por otro lado, los rendimientos en el sistema de secado, calculados en base al aprovechamiento de la energía solar, estarán afectados directamente por el rendimiento del colector solar de agua, que para las condiciones de operación del secadero es de aproximadamente un 50%. Se propone entonces, evaluar la incidencia de las mejoras en el desempeño del secadero, a partir de la información provista por la curva de secado y de parámetros propuestos por Augustus León et al. (2002), los cuales se describen a continuación.

Tiempo de secado

Un parámetro importante en la evaluación del desempeño de los secaderos solares de alimentos es el tiempo de secado, que se puede utilizar para comparar diferentes equipos (para el mismo producto y condiciones de prueba similares). Se estima desde el momento en que el equipo se carga con producto fresco hasta que el producto adquiere el nivel de humedad requerido, generalmente expresado en horas o días. El período de tiempo en que la radiación solar no está disponible también suele incluirse en el tiempo de secado.

Temperatura máxima de secado con carga

Se recomiendan temperaturas en el rango de 50 a 60 °C para secar productos sensibles a la temperatura, como las hierbas aromáticas (Bandoni, 2000). Al menos, durante la última hora del período de secado, la temperatura no debe exceder los 55°C. Cualquier temperatura más alta

probablemente afectará la calidad del producto. Por lo tanto, en el secado de hierbas, es importante considerar la temperatura máxima de secado de una secadora en condiciones de carga.

Duración de la temperatura del aire de secado 10 (o 15) °C por encima de la temperatura ambiente

Cuando se evalúa el calor útil ganado por el aire en secadores de convección forzada, es difícil reconocer si el secado estuvo influenciado por grandes flujos de aire con un pequeño aumento de temperatura o viceversa. Dado que se requiere una elevación de la temperatura de al menos 10 a 15 °C con respecto al ambiente para que se produzca un secado efectivo, la duración de la temperatura del aire de secado por encima de la temperatura ambiente, es una indicación útil en el rendimiento del sistema de secado y puede indicar indirectamente la eficiencia de recolección de calor de la secadora.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos recolectados durante el ensayo, se exponen a continuación.

En la Tabla 1, se presentan los registros de las variables de operación obtenidos mediante instrumentos manuales, en intervalos de tiempo de 1 hora. Las variables medidas son: velocidad del aire en el conducto de recirculación, en la entrada de aire fresco, la lectura del flotámetro, y se muestran también datos horarios de velocidad del viento publicados por el Servicio Meteorológico Nacional para la ciudad de Río Cuarto.

Tabla 1: Variables de operación medidas manualmente

Tiempo [h]	10	11	12	13	14	15	16	17	18	22
Caudal de agua [l/min]	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5
Vel. aire recirculado [m/s]	1.9	2.2	2.0	2.3	2.14	2.08	2.07	2.2	2.1	2.0
Vel. aire fresco entrada [m/s]	1.8	2.0	2.3	2.3	2.07	2.18	2.1	2.2	2.1	0.0
Vel. viento [km/h]	5.5	7.1	4.5	5.0	3.5	3.8	4.6	1.5	4.2	4.0

La figura 8a, muestra los valores registrados de temperaturas del aire en el ambiente exterior y en distintos puntos del equipo, como así también las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del intercambiador de calor. Es posible observar que a las 16:30 hs., el aire en la cámara de secado alcanza su temperatura máxima, siendo este valor de 54°C. Se advierte también, que la temperatura del aire recirculado permanece durante todo el tiempo de operación del equipo, aproximadamente 7° C por debajo de la temperatura del aire en la cámara de secado. Teniendo en cuenta que la salida del aire en la cámara de secado está en la parte inferior de la misma, esta diferencia evidencia una estratificación del aire de acuerdo a la temperatura que el movimiento giratorio de las bandejas no logra romper.

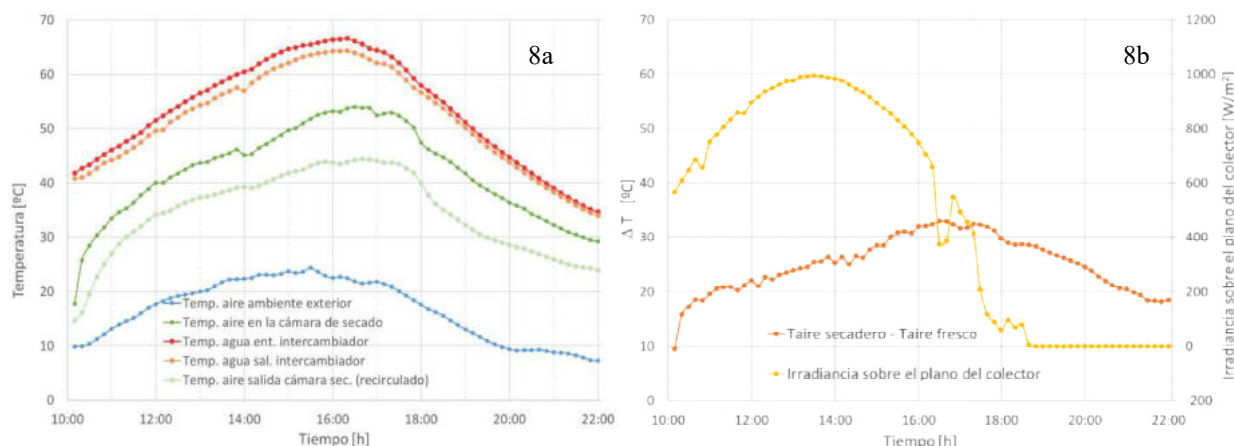


Figura 8 a. Registros de temperaturas del agua y del aire. b. Registros de radiación solar y diferencia entre la temperatura del aire fresco y del aire en el secadero

La figura 8b, presenta la distribución de radiación solar incidente sobre el plano inclinado del colector solar y el aumento de temperatura del aire fresco en su paso por el equipo de secado. Se observa que entre las 16:00 y las 18:00 hs., la radiación solar no es significativa, sin embargo, tiene lugar el período de mayor salto térmico entre la temperatura del aire en la cámara de secado y la temperatura del aire fresco. Esto ocurre debido a la gran inercia térmica del agua, que se mantiene por encima de los 60°C, permitiendo que el intercambiador siga transfiriendo calor al aire.

A partir de las 18:00 hs. y hasta las 21:00 hs., cuando el secadero opera sin entrada de aire fresco, y la radiación solar es imperceptible, la diferencia entre la temperatura del aire en el secadero y el aire exterior, supera los 20°C, por lo tanto, en relación al parámetro “Duración de la temperatura del aire de secado 10 (o 15) °C por encima de la temperatura ambiente”, puede inferirse que a partir de las 10:30 hs. y hasta la finalización de la operación, la temperatura en el secadero se mantiene siempre por encima de los 15°C con respecto a la temperatura exterior. En el secadero anterior, esta diferencia era cercana a los 7 °C durante el primer día, mientras que el segundo día el salto térmico alcanzaba los 9 °C (Lema y Morsetto, 2020).

En la figura 9, se presentan los datos de humedades relativas en diferentes puntos del equipo de secado, recolectados durante la experiencia y la curva de secado promediada para el perejil, en las condiciones de operación del secadero modificado. Puede observarse que, en la cámara de secado, el aire aumenta sustancialmente su capacidad para retener humedad, al disminuir significativamente la humedad relativa, llegando a valores cercanos al 10 % entre las 16:00hs. y las 18:00 hs., período en el cual, la temperatura del aire en la cámara de secado supera los 50°C (Fig. 8a). A partir de las 18:00 hs., cuando la humedad relativa del aire exterior comienza a aumentar rápidamente, se cierra el ingreso de aire fresco, recirculándose el 100% del aire. Crapiste y Rotstein, (1997) señalan que la fracción de aire recirculado a menudo puede ser alta, en el rango de 80 a 95%, siendo el potencial de secado del aire que recircula significativo. Esta capacidad de secado residual disponible después de las 18:00, no se percibe en la curva de secado para el perejil, porque el producto a partir de las 18:00 hs. ya está prácticamente seco.

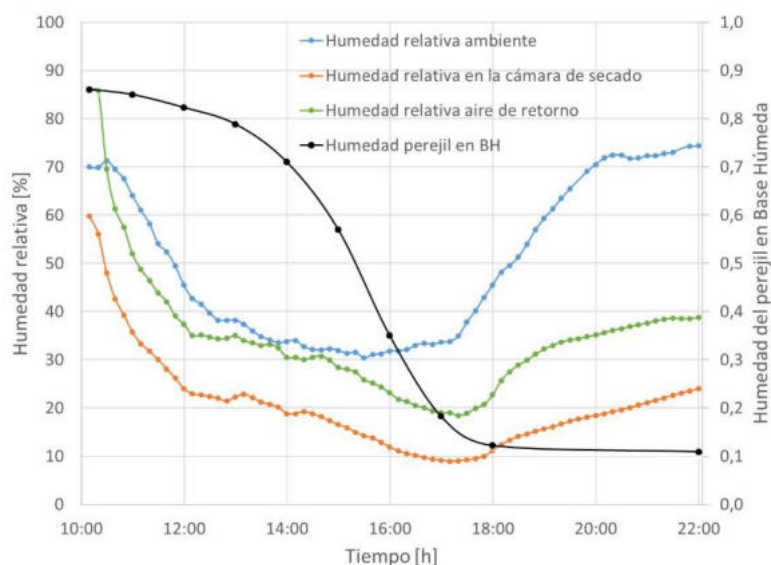


Figura 9. Registros de humedad del perejil en base húmeda y humedades relativas del aire en distintos puntos del equipo de secado

La figura 10, muestra la cinética de secado para cada una de las muestras y la curva correspondiente a los valores promediados, en la cual cada punto corresponde al promedio de los 12 valores correspondientes a cada tiempo (4 bandejas y 3 muestras por cada bandeja). Puede observarse que la dispersión entre las humedades obtenidas para cada hora, es mayor durante el período de secado comprendido entre las 15:00 hs. y las 17:00hs. Puede decirse, que se consigue un secado completo, a las 18:00 hs., cuando la humedad está alrededor del 11%.

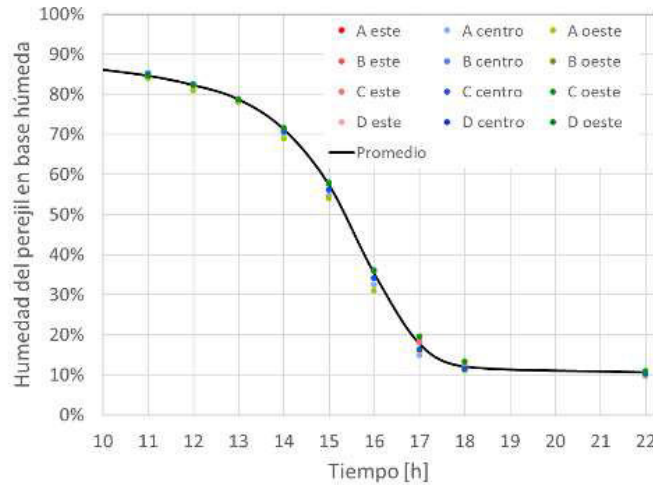


Figura 10. Curva de secado de perejil

En las figuras 11, se muestran valores de la humedad en base húmeda del perejil para cada hora, los cuales han sido promediados de acuerdo a la ubicación de las muestras en cada bandeja (este, centro y oeste) (Fig. 11a) y respecto a cada bandeja (A, B, C y D) (Fig. 11b). No se evidencia ninguna tendencia en relación a la ubicación de las muestras en cada bandeja, ni tampoco respecto a cada bandeja. Se confirma, entonces un secado homogéneo y uniforme, cuando se seca perejil desprovisto de los tallos en el secadero modificado. Esto no pasaba en el secadero sin recirculación y sin las reformas incorporadas, donde la incidencia de la ubicación de las muestras en las bandejas (este, centro, oeste) presentaba una notable variabilidad con la ubicación del sol (Morsetto et al, 2018).

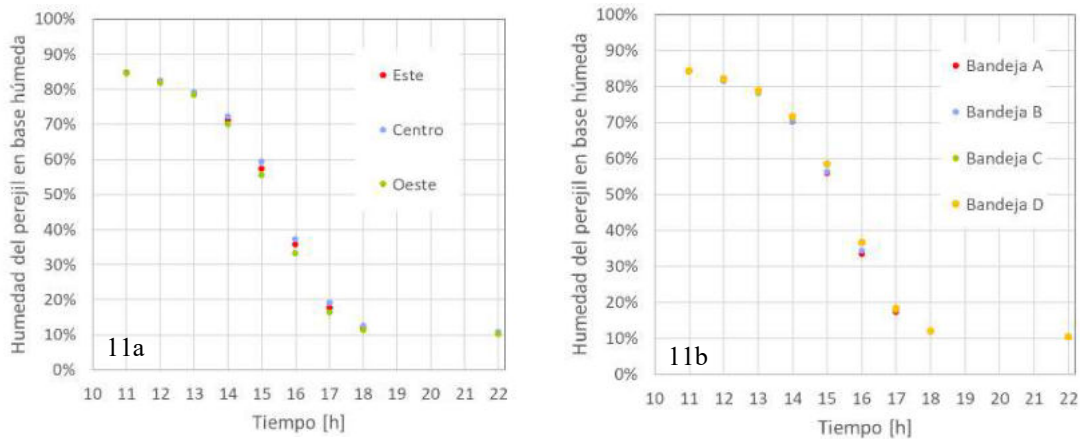


Figura 11. Humedad del perejil para cada hora. a. De acuerdo a la ubicación en la bandeja. b. En cada bandeja

El aspecto del perejil seco era excelente, destacándose por su color, tal como se observa en la figura 12.



Figura 12. Aspecto del perejil seco

En cuanto a los parámetros propuestos para evaluar el desempeño del secadero con mejoras, los resultados se resumen en la siguiente tabla

Tabla 2: Evaluación de los parámetros propuestos

	Secadero sin reformas (Lema y Morsetto, 2020)	Secadero con reformas
<i>Tiempo de secado para 1 kg. de perejil hasta obtener una humedad final de 11%</i>	16hs	8 hs
<i>Temperatura máxima de secado con carga</i>	43°C	54°C
<i>Duración de la temperatura del aire de secado 10 (o 15) °C por encima de la temperatura ambiente</i>	0 hora. Diferencia máxima alcanzada 9°C	95% del tiempo que dura la operación de secado, con diferencias entre 15°C y 33°C

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos de la experimentación, es posible obtener las conclusiones que se detallan.

La utilización de la bomba, en los valores de caudales con los que se realizó la experiencia, mejora significativamente la transferencia de calor en el intercambiador de calor agua-aire, y se consigue una temperatura del agua de entrada al intercambiador superior a los 60°C.

El análisis de los resultados también da cuenta de la existencia de una estratificación del aire en la cámara de secado. Si bien esto no interfiere en la calidad del producto obtenido, es de esperar que una temperatura homogénea en la cámara de secado repercuta en una mayor temperatura del aire recirculado aumentando la capacidad de secado del equipo.

De la Tabla 2, es posible afirmar que las reformas propuestas y realizadas sobre el prototipo de secadero indirecto aumentaron la capacidad de secado del equipo, reduciendo el tiempo de secado a la mitad, con respecto al secadero sin modificar.

REFERENCIAS

- Augustus Leon, M., Kumar S. y Bhattacharya, S.C. (2002) A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 367–393
- Banchero, L., Carballo, S., Telesca, J. (2008) Manual de Secado Solar de especies medicinales y aromáticas para predios familiares. INIA - DIGEGRA – MGAP.
- Bandoni, A. (2000) Los Recursos Vegetales Aromáticos en Latinoamérica. Ed. UNLP. 410 pp.
- Barral, J., Lucchini, J. y Garnica, J. (2017) Cálculo de sistemas de calentamiento de agua activos que utilizan colectores de tubos evacuados del tipo water-in-glass. *Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 5, pp. 03.69-03.80, 2017.
- Crapiste, G. y Rotstein, E. (1997). Design and performance evaluation of dryers. *Handbook of Food Engineering Practice*. Valentas Kenneth J, Rotstein Enrique, Singh Paul, editors. CRC Press: Boca Raton, FL, USA. pp. 121–162.
- DíazMaroto, M. C., PérezCoello, M. S. y Cabezudo, M.D. (2002). Effect of different drying methods on the volatile components of parsley (*Petroselinum crispum* L.). *European Food Research and Technology* 215: 227-230.
- Lema A. y Morsetto J. (2020) Secadero sustentado íntegramente con energía solar y con recirculación de aire, aplicado a la deshidratación de perejil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 24, pp 109-117.

- Maldonado, R. y Pacheco Delahaye E. (2003). Curvas de deshidratación de brócoli (*Brassica oleracea* L var. *Italica* Plenck) y coliflor (*Brassica oleracea* L var. *Botrytis* L). *Revista Facultad de Agronomía* 20(3): 306-319.
- Morsetto J., Lema A., Pontin M. y Lucchini, J. (2018) Implementación de un sistema de calefacción térmica de aire, aplicado al secado de hierbas. Secadero solar indirecto para el secado de hierbas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 22, pp. 02.49-02.59.
- Rahman, M.S. y Perera C.O. (1999). *Drying and food preservation*. pp. 173-216. In: Rahman, M.S. (ed.). *Handbook of food preservation*. Marcel Dekker, New York, NY.
- ReyesMunguía, A., ZavalaCuevas, D., Alonso Martínez, A. (2012) Perejil (*Petroselinum crispum*) Compuestos químicos y aplicaciones. *Tlatemoani: revista académica de investigación, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México*. N°. 11
- Vargas T. y Camacho S. *Drying of fruits and vegetables—experiences in Bolivia*. Publication of Energetica (Bolivia) and FAKT (Germany), 1996.

IMPROVEMENTS OBER AN HERBS INDIRECT SOLAR DRYER LOOKING FOR AUGMENTATION ONITS DRYER CAPACITY

ABSTRACT: This article describes and analyzes a combination of modifications that have been designed and performed over a dryer prototype that works indirectly recirculating air and using solar energy as a source for their thermal and electric operating demands. The reforms carried out on the existing equipment were designed with the purpose of improving the performance of the dryer and were aimed at increasing the air temperature for drying and reducing thermal losses in the equipment. The evaluation of the modifications made in the dryer was carried out through the determination of parameters and the analysis of the data obtained in the experimentation performed. The results are presented in tables and graphs. The drying curve for fresh parsley (85 % humidity) is also determined under the dryer's operating conditions, achieving a final humidity of 11 % after 8 working hours, reducing drying time by half. A maximum temperature of 54 °C for air in the dryer is obtained, and practically the entire drying operation occurs with drying air temperatures above the ambient temperature for more than 20 °C.

KEYWORDS: solar energy, indirect solar drying, air heating, herb drying.