

SECADERO SUSTENTADO ÍNTEGRAMENTE CON ENERGÍA SOLAR Y CON RECIRCULACIÓN DE AIRE, APLICADO A LA DESHIDRATACIÓN DE PEREJIL

Alba I. Lema, Jorge M. Morsetto

Universidad 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 - e-mail: jmorsetto@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: Se presentan resultados del desempeño de un prototipo de secado indirecto con recirculación de aire, sustentado íntegramente con energía solar, aplicado a la deshidratación de perejil. El sistema de calefacción de aire para el secado, utiliza un colector solar de tubos evacuados para aumentar la energía térmica del agua, que luego es parcialmente transferida al aire en un intercambiador de calor agua-aire. El agua se calienta en el calefón solar y se mueve en un circuito cerrado por efecto termosifón, sin la utilización de bombas impulsoras. El aire ingresa al prototipo mediante un ventilador y luego de atravesar el intercambiador de calor entra a la cámara de secado, en la cual se disponen cuatro bandejas giratorias donde se coloca el producto a secar. El aire húmedo que abandona la cámara de secado, es parcialmente recirculado a los fines de aumentar el aprovechamiento térmico. Los requerimientos eléctricos del prototipo, son provistos por un sistema fotovoltaico. El prototipo fue ensayado y los resultados se presentan en gráficos. Constatándose que el equipo de secado analizado, depende energéticamente sólo del recurso solar disponible y constituye un diseño idóneo en relación a la operación de secado a baja escala aplicado a hierbas aromáticas.

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

INTRODUCCIÓN

Actualmente la producción y/o recolección de plantas medicinales y aromáticas se presenta como una alternativa de diversificación productiva para predios familiares, complementaria a la horticultura (Banchero et al., 2008) y es comercializada parcial o totalmente en forma deshidratada. En este contexto, el secado solar constituye un método apropiado cuando se requieren bajas temperaturas y moderadas cantidades de producto a deshidratar. Se debe entonces, producir la mayor pérdida posible de agua libre del vegetal recién cosechado y a una temperatura que no supere los 50 °C, evitando así la disminución de la calidad en el producto obtenido (Bandoni, 2000). Desde esta perspectiva, la posibilidad de hacer el secado a bajas temperaturas in situ, contribuiría a mejorar la calidad del producto seco obtenido (Corvalán y et al., 2000).

Es en este sentido, en el año 2016, integrantes del grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto, comenzamos a trabajar en el diseño y construcción de un equipo de secado solar indirecto, que dependiera del recurso solar como única fuente de energía, haciendo posible desarrollar el emprendimiento de secado de manera autónoma en la cercanía de los sembradíos. En un trabajo inicial (Garnica y et al., 2016), se estudió el desempeño de un radiador, que se muestra en la figura 1, evaluando el intercambio de calor agua-aire, y se analizó la posibilidad que el agua se moviera por efecto termosifónico a través del mismo. Los resultados fueron alentadores, y la experimentación proporcionó información relevante para avanzar en el diseño definitivo.

Se procedió luego a la construcción de la sección de ingreso del aire y de la cabina de secado (figura 1) con un diseño de bandejas giratorias accionadas manualmente, y se estudió el funcionamiento del secadero bajo condiciones de operación controladas, lo cual fue posible mediante la utilización de una máquina de ensayos. Los resultados se presentaron en un trabajo posterior (Lema et al., 2017) en el cual se concluía que, para condiciones de procesos semejantes a las utilizadas durante la experimentación, el desempeño del secadero era satisfactorio, en relación al tiempo de secado y la calidad del producto seco obtenido.

Continuando con el desarrollo del proyecto inicial, se incorporó a lo ya construido, un colector solar de agua que provee la energía térmica necesaria para el calentamiento del aire. Se automatizó el movimiento de las bandejas giratorias y mediante experiencias de secado de perejil, se evaluó el sistema en su conjunto. Los resultados fueron descriptos en un trabajo posterior (Morsetto et al., 2018), en el cual se propone como acciones futuras, recircular el aire que abandona la cabina de secado, ya que lo hace lejos de la saturación.

En el presente trabajo, se muestran resultados del desempeño de un prototipo de secado indirecto 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.

El prototipo de secado, integrado al sistema indirecto de calentamiento del aire y recirculación, fue ensayado en su conjunto, presentando los resultados en gráficos.

Se concluye que el diseño con recirculación, provee un aire térmicamente más uniforme a la entrada a la cabina de secado y con una capacidad de secado mayor, favoreciendo la disminución del tiempo de secado y un secado homogéneo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del equipo de secado

El prototipo de secado analizado, se muestra en la figura 1.

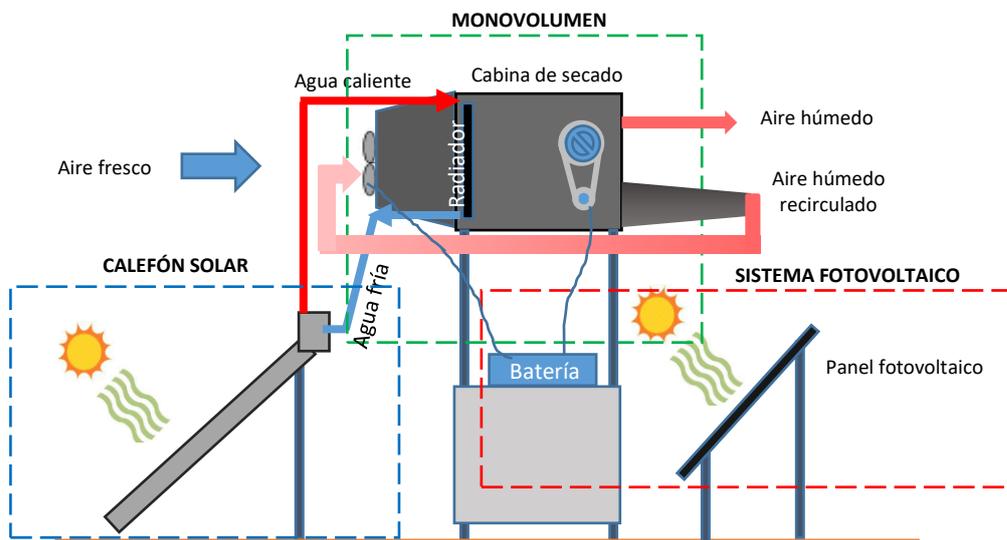


Figura 1. Prototipo de secado solar indirecto con recirculación de aire

Está compuesto básicamente por un calefón solar, un sistema fotovoltaico que provee la energía eléctrica requerida y un monovolumen compuesto por tres partes: la sección cónica de ingreso del aire para el secado, una delgada porción donde se encuentra el radiador y posteriormente la cabina de secado. En esta última, se disponen cuatro bandejas giratorias, donde es colocado el producto a secar.

Una descripción más detallada del equipo sin recirculación de aire, puede consultarse en Morsetto et al. (2018).

En la figura 2 a, se observa una vista lateral del montaje del equipo de secado completo, la figura 2 b, corresponde a una vista del interior de la cabina de secado, donde se encuentran las bandejas y las muestras testigo para el seguimiento del proceso de deshidratación del perejil, la figura 2 c, muestra la entrada de aire recirculado al equipo, mientras que la figura 2 d, presenta una vista trasera en la que se evidencia la puerta de acceso a las bandejas en la cabina de secado y la sección donde se recolecta el aire para recircular.

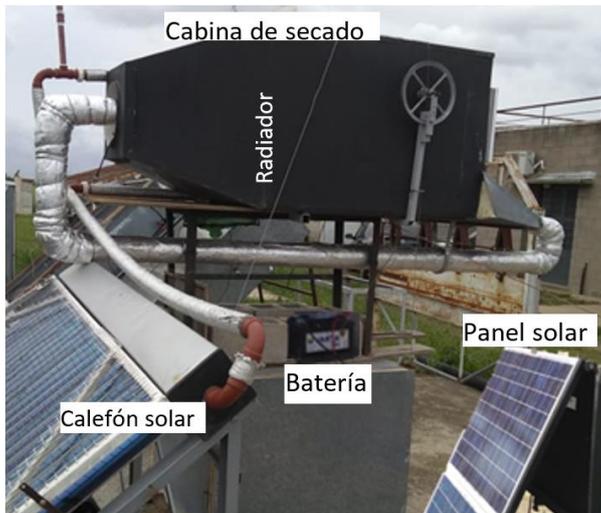


Figura 2 a. Equipo de secado solar indirecto



Figura 2 b. Interior de la cabina de secado



Figura 2 c. Entrada de aire recirculado



Figura 2 d. Vista trasera. Recolectación del aire de recirculación

El aire requerido para la operación de secado, proviene parcialmente de la recirculación (figura 2 c) y se completa con aire fresco exterior. Ambas contribuciones, son impulsadas al interior del equipo por un electroventilador de uso automotriz que funciona con 12 V de corriente continua.

El aire es calentado mediante un sistema indirecto de calefacción solar térmica de aire, y pueden consultarse los detalles en Garnica et al. (2016). El aire que ingresa al equipo, aumenta su temperatura al pasar por un intercambiador de calor y queda disponible para el secado, que tiene lugar en la cabina de secado, tal como se muestra en la figura 3.

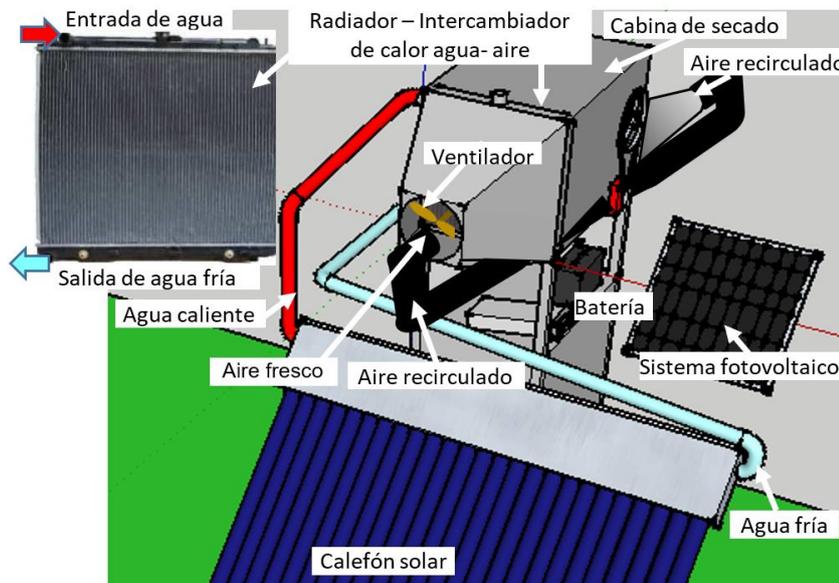


Figura 3. Sistema indirecto de calefacción térmica de aire. Detalle del radiador

El agua es el fluido caloportador y en su paso por el calefón solar, incrementa su temperatura, disminuyendo en consecuencia su densidad. La diferencia de densidades entre el agua caliente y fría, genera la fuerza impulsora para el flujo termosifónico. El calefón solar utilizado es uno de tubos evacuados, del tipo water-in-glass, conocido como “manifold”. De acuerdo a sus características (Barral et al., 2017) favorece el efecto termosifónico y es capaz de asegurar un buen desempeño en días de invierno nublados e incluso con lluvia, requiriendo además, poca manutención.

La energía que se almacena en el agua, es transferida parcialmente al aire en el intercambiador de calor agua-aire, que consiste en un radiador de uso automotriz, de paso simple (figura 3) cuyo desempeño y eficiencia fue evaluada en un trabajo anterior Garnica et al. (2016).

Un sistema fotovoltaico provee los requerimientos eléctricos del sistema: el ventilador y el mecanismo de bandejas giratorias.

Recirculación del aire de secado

El aire que abandona la cabina de secado, es recolectado en la porción siguiente del equipo, que tiene forma de pirámide rectangular truncada irregular (figura 2 d) y es recirculado hasta la entrada del ventilador, a través de un conducto de polipropileno negro, de sección circular de 110 mm de diámetro, que ha sido recubierto con un aislante térmico aluminizado.

Durante los ensayos realizados con anterioridad a la implementación de la recirculación del aire (Morsetto et al., 2018), el flujo de aire que ingresaba, se regulaba cubriendo parcialmente el área frontal del ventilador. Se tapaba aproximadamente el 70 % del área del ventilador correspondiente al ingreso del aire fresco, aun así, la velocidad del aire dentro del equipo, se mostraba muy sensible a los vientos presentes durante el ensayo, esto se evidenciaba en la fluctuación que mostraban los datos medidos de velocidad de aire en la cámara de secado, variaban entre 2 y 4 m/s.

En el prototipo ensayado con aire recirculado vinculado al presente trabajo, la entrada de aire se autorregula de acuerdo a la máxima potencia que puede entregar el ventilador y a la pérdida de carga que se genera en el circuito del aire con recirculación.

Procedimiento del ensayo

Para evaluar el desempeño del equipo de secado con recirculación de aire, 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 en el mes de octubre de 2019, en la Ciudad de Río Cuarto (Latitud: 33° 06' 27" S, Longitud: 64° 17' 50" O), en la República Argentina.

Se registraron temperaturas del agua a la entrada y a la salida del radiador, humedades relativas y temperaturas del aire en el ambiente, al ingreso del radiador y en la cabina de secado, y se midió también la radiación solar sobre el plano del calefón solar. Los registros se tomaron en intervalos de un minuto mediante el uso de registradores Data Loggers HOBO.

Se dispuso secar perejil fresco, desprovisto mayormente de los tallos y con una humedad inicial del 85 %. Aproximadamente un kilo de material húmedo se distribuyó equitativamente en las cuatro bandejas. El seguimiento del proceso de secado se realizó a partir de muestras testigos, colocadas sobre las bandejas (figura 4), para las cuales se registró la pérdida de humedad en intervalos de tiempo conocidos y determinando materia seca para cada una de ellas por secado en estufa 104 °C, durante 24 horas.

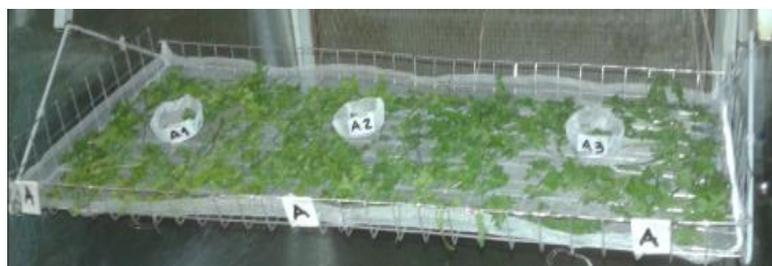


Figura 4. Distribución de muestras testigo en una bandeja

La velocidad del aire en el conducto de recirculación, se midió con un anemómetro de paletas colocado perpendicularmente al área de flujo, tal como se muestra en la figura 5 a y b. Cada registro correspondía a mediciones promediadas en un intervalo de un minuto que se realizaban en instantes previo a producirse la apertura de la cabina, para retiro de las muestras testigo.



*Figura 5 a. Apertura en el ducto de recirculación para ingreso del anemómetro
b. Toma de registros de velocidad del aire en el ducto de recirculación*

La toma de datos se realizó en dos días consecutivos, desde las 9:00 hasta las 19:00 horas, cada día. Finalizada la operación de secado el primer día, las bandejas fueron retiradas de la cabina de secado y guardadas en una habitación cerrada. En ensayos anteriores, (Morsetto et al., 2018), (Lema et al., 2017), las bandejas con el producto a secar permanecían durante la noche en el interior del equipo, cerrándose la entrada y salida de aire. El cambio en las condiciones del ensayo se decidió sobre la marcha, debido a que algunos de los pronósticos del tiempo consultados, anunciaban fuertes vientos y tormentas aisladas por la noche. Antes de continuar el secado al día siguiente, se pesaron las muestras y conjuntamente con las bandejas se colocaron en la cabina de secado.

Al finalizar la operación de secado las muestras testigo (figura 4) se ingresaron en la estufa, para determinar masa seca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos recogidos durante el ensayo, se describen a continuación.

Los registros de velocidad del aire en el conducto, mostraron un valor mínimo de 3,26 m/s, un valor máximo de 4,79 m/s, y el promedio de todas las mediciones fue de 4,02 m/s.

Teniendo en cuenta que el caudal másico de aire en el conducto de recirculación, es aproximadamente el mismo que atraviesa el radiador en flujo cruzado y sabiendo que el área del radiador es de $0,40710 \text{ m}^2$, mientras que la del ducto es de $0,03820 \text{ m}^2$, es de esperar que la velocidad del aire a la salida del radiador y por lo tanto en la cámara de secado, sea cercana a los 0,4 m/s. Por otro lado, durante la experimentación del secadero sin recirculación (Morsetto et al., 2018), la velocidad del aire en la cámara de secado variaba entre 2 y 4 m/s debido a los efectos del viento exterior. Entonces, la recirculación del aire, ocasiona un aumento en la pérdida de carga, que se traduce en una disminución de la velocidad del aire dentro del equipo de secado y en una amortiguación de los efectos del viento.

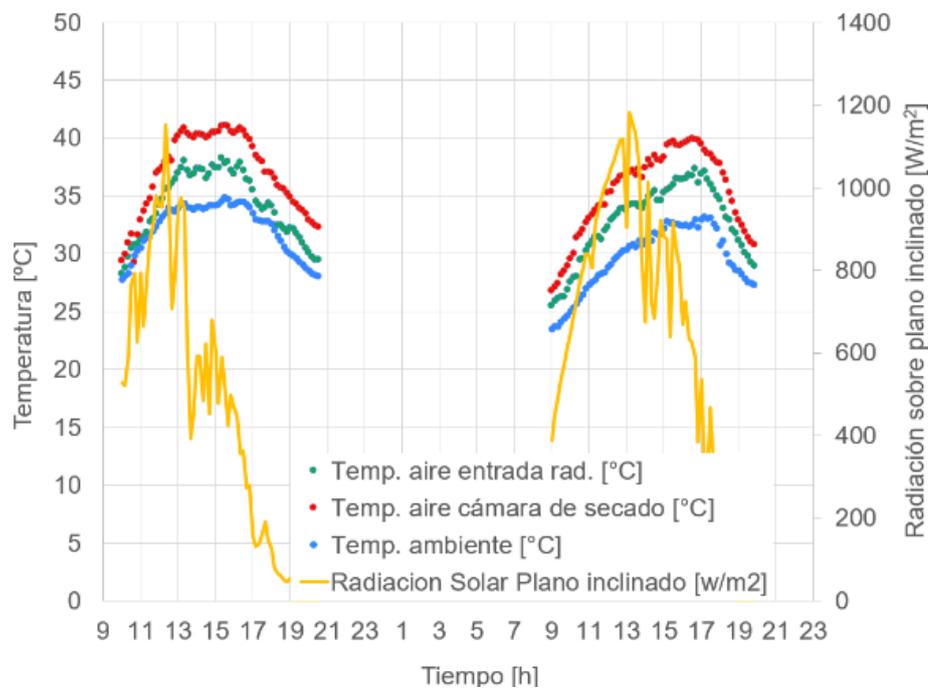


Figura 6. Temperaturas del aire en distintos puntos del equipo y Radiación solar sobre el plano del colector

En la figura 6, se presentan los registros de radiación sobre el plano del colector y temperaturas del aire en diferentes puntos del equipo, observándose que si bien la radiación solar de los días ensayados es prácticamente difusa en su totalidad (ambos días nublados), aun así, el sistema de calefacción del aire introduce un aumento máximo de temperatura para el aire ambiente cercano a los 7 °C durante el primer día, mientras que el segundo día el salto térmico alcanza los 9 °C, y esto es posible gracias a la recirculación del aire, que desde la perspectiva de la transferencia de calor, es equivalente a ingresar un aire precalentado.

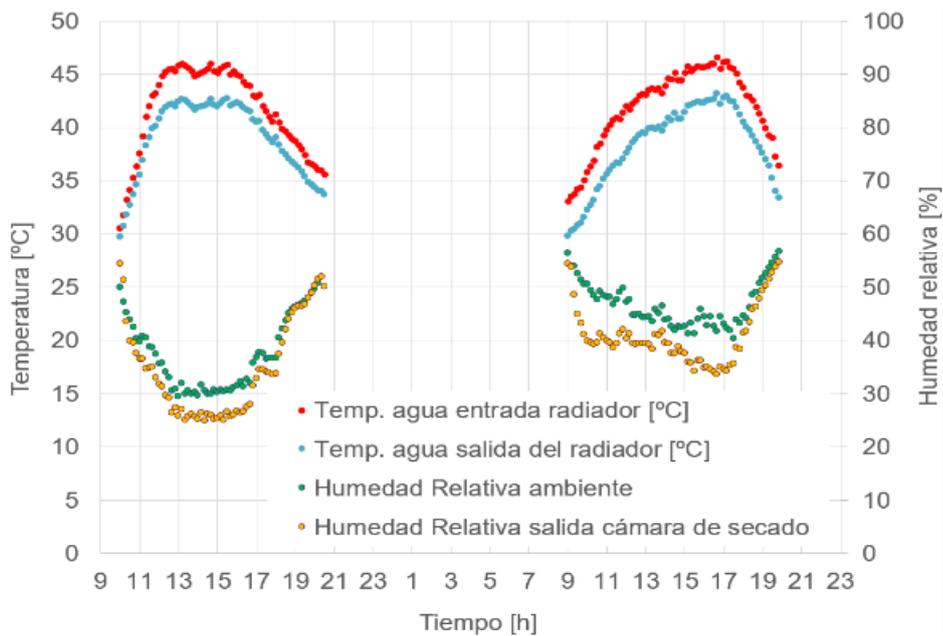


Figura 7. Temperaturas del agua a la entrada y salida del radiador y humedades relativas del aire en distintos puntos del equipo

En la figura 7, puede observarse que la diferencia instantánea entre la temperatura del agua a la entrada y a la salida del radiador, es inferior a los 5 °C. Esta diferencia es equivalente a la que existe entre la temperatura del agua a la entrada y a la salida del calefón solar, por lo tanto, es de esperar valores superiores, en días con mayor radiación solar disponible.

Se muestran también en la figura 7, las humedades relativas del aire ambiente y del aire en la cámara de secado, si bien la humedad relativa del aire en la cámara de secado es menor que la ambiente, teniendo en cuenta la temperatura del aire, es posible cuantificar a partir del diagrama psicrométrico, una ganancia promedio de humedad absoluta a la salida de la cámara de secado de 0,005 Kg de agua/Kg de aire seco aproximadamente, durante el primer día y de 0,002 Kg de agua/Kg de aire seco, el segundo día.

La figura 8, muestra las curvas de secado para el perejil en las condiciones de operación, obtenidas a partir de las muestras testigo. Se evidencia que durante la noche continúa el proceso de secado fuera del secadero, disminuyendo la humedad del producto en aproximadamente un 10 %, esto no ocurría cuando el producto permanecía dentro del equipo durante la noche (Morsetto et al., 2018).

Se presentan valores de humedad en base húmeda de las doce muestras testigo, para el primer y segundo día de la experiencia correspondientes a las horas de sol. Son tres muestras (1, 2 y 3) por cada una de las cuatro bandejas (A, B, C y D). Se advierte que las curvas obtenidas no presentan un periodo de velocidad constante, y que la velocidad de secado es mayor el primer día en relación al segundo.

Se observa también que a las 18:30 hs del segundo día, cuando se concluye la operación de secado, la humedad final alcanzada, es inferior al 10 % BH y es suficiente para un almacenamiento seguro.

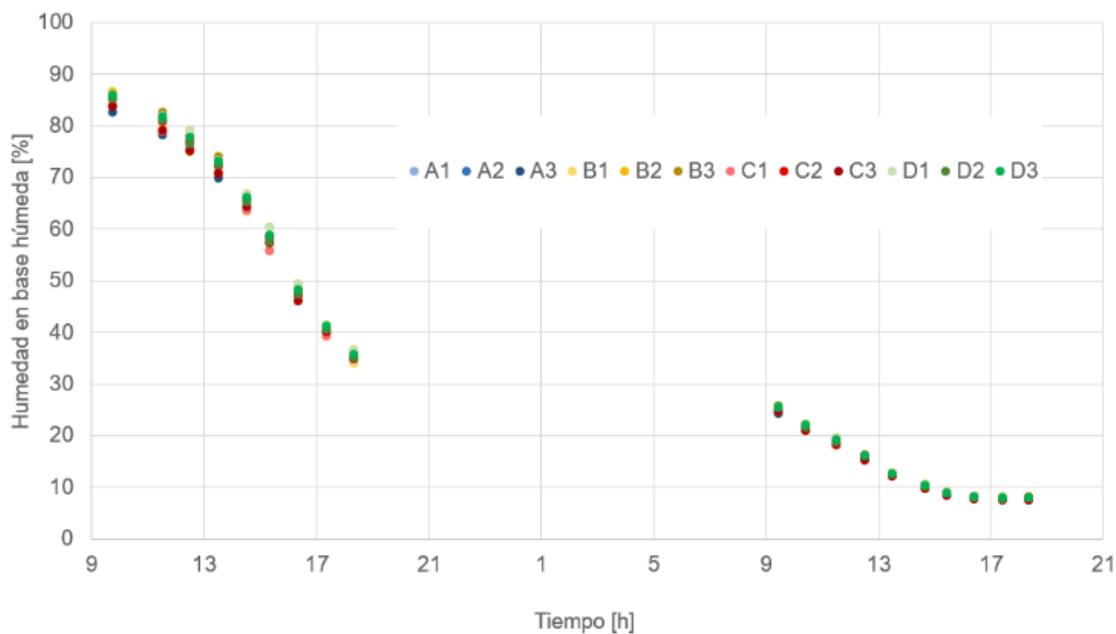


Figura 8. Curva de secado de perejil

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos de la experimentación y de la operación del equipo de secado en general, es posible obtener las conclusiones que se detallan.

A partir de los datos de velocidad del aire en el conducto de recirculación y de la comparación realizada respecto de lo que ocurría en los ensayos sin recirculación, se concluye que la recirculación del aire de secado disminuye la velocidad del aire en la cámara de secado y contribuye a generar condiciones de secado más uniformes, al amortiguar los efectos del viento.

El calefón solar seleccionado, permite operar en días con escasa radiación directa y efectuar un secado completo en 2 días de un kilogramo de perejil sin tallos.

Si bien la evaluación del flujo termosifónico, no se presenta entre los objetivos de este trabajo, es posible determinar su existencia a partir de los registros obtenidos de temperaturas del aire antes y después de atravesar el radiador, que confirman el intercambio de calor en el radiador y de este modo también, la presencia del flujo termosifónico.

La figura 8, evidencia que todas las muestras testigo presentan una evolución similar, dando cuenta de la homogeneidad de la operación de secado y en consecuencia del producto seco obtenido. En la misma figura, se observa además, una pérdida de humedad del perejil del 50 % para el primer día con la presencia de escasa radiación directa. Es de esperar entonces que, en días despejados, el secado de la misma masa de perejil pueda lograrse en un único día de operación.

El haber retirado el producto del secadero durante la noche y haberlo guardado en el interior de una habitación seca, ocasionó una pérdida de humedad del producto de aproximadamente 10 %.

Se comprueba que la tecnología desarrollada es apropiada para calentamiento indirecto del aire.

Por último, se constata que el prototipo de secado propuesto constituye un diseño idóneo en relación a la operación de secado aplicado a hierbas aromáticas y medicinales y que su funcionamiento depende solamente del recurso solar disponible.

REFERENCIAS

- 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.
- Corvalán, R., Horn, M., Román R. y Saravia L. (2000) Ingeniería del Secado Solar, Subprograma VI: Nuevas Fuentes y Conservación de la Energía. CYTED-D.
- Garnica J., Lema A., Morsetto J., Pontin M. y Lucchini, M. (2016) Evaluación de un Sistema de calentamiento de aire apto para Secado Solar indirecto de Perejil. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 20, pág. 02.01-02.11
- Lema A., Morsetto J., Pontin M. y Medina M. (2017) Secadero solar indirecto para el secado de hierbas. Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 5, pp. 02.35-02.46.
- 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.

ABSTRACT: This work shows the performance of an indirect solar dryer prototype that uses air recirculation. The dryer works using just solar energy and it dries parsley. The air heating system uses an all-glass evacuated tube collector to increase the thermal energy of water, which is partially transferred to a flux of air, by means of a water-air heat exchanger. The water flows in a closed circuit by thermosyphon effect, without using any pump to be driven through the heat exchanger. The air gets into the prototype pushed by a fan, and after passing through the heat exchanger, flows through the drying chamber, where the parsley is distributed over four gyratory trays. The humid air comes out the drying chamber and is partially recirculated in order to improve the thermal efficiency of the prototype. The electrical demand of the prototype is provided by a photovoltaic system. The prototype was tested and results are shown by plots. Taking into account that the equipment depends only from the solar energy, it turns out that it is an appropriate design to operate low scale drying processes for aromatic herbs postharvest treatments.

KEYWORDS: indirect solar drying, air heating, herb drying, thermosyphonic flow.