

ENSAYOS Y SIMULACIÓN DE UN NUEVO TENDALERO SOLAR ACTIVO TIPO TÚNEL[#]

A. Iriarte¹, V. García y S. Bistoni

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. iriarteadolfo@gmail.com

Recibido 08/09/15, aceptado 09/10/15

RESUMEN: El presente trabajo propone un nuevo diseño de un secadero solar mixto construido sobre la base un tendalero tradicional, cubierto con un plástico y con flujo forzado de aire impulsado por dos pequeños ventiladores axiales de 0,45 kW cada uno. Está formado por dos partes: un colector solar y a continuación, sobre el mismo plano, la cámara de secado. Se describe las modificaciones realizadas en el diseño y los nuevos materiales utilizados. Se muestra la caracterización del secadero para el secadero de pimientón para pimentón realizado en Chilecito, La Rioja, durante el mes de marzo. Se analizan las variaciones de temperaturas y humedades, la velocidad de secado en función del contenido de humedad y del tiempo, para 4 variedades de pimientón. La velocidad y el tiempo de secado fue adecuado y el producto de buena calidad. El modelo de simulación se basa en la equivalencia térmica – eléctrica (SIMUSOL) y ajustado con los datos experimentales.

Palabras Clave: secadero solar activo, simulación secadero tendalero, pimientón para pimentón

INTRODUCCIÓN

En el oeste de las Provincias de Catamarca y La Rioja de la República Argentina, el principal sustento de la gente es la agricultura y ganadería extensiva. En agricultura las aromáticas son los productos que principalmente se producen, destacándose el pimientón para pimentón, anís, ajo y comino. También hay producciones de frutas tales como, duraznos, ciruelas, membrillos y nuez. Gran parte de estas producciones son destinadas al deshidratado.

El método tradicional de secado de frutas, verduras y aromáticas en estas zonas rurales distribuir los productos en el suelo o en canchones con ripio, expuestos al sol y al aire libre. Algunos productores han incorporado los tendaleros, que mejoran un poco la situación. Si bien estos métodos de secado requieren poca inversión, tienen las desventajas de que el producto se contamina por suciedad, insectos y bacterias. Por otro lado, se tienen pérdidas, a veces importante, como consecuencia de las lluvias. Por ejemplo, en el caso de secado de pimientón para pimentón, bajo estas condiciones, las pérdidas son muy altas, entre el 30 y 50 %. La velocidad de secado es muy lento y toma entre 15 a 30 días, dependiendo de las condiciones climáticas (Carabajal, 2001). Este tipo de secado es generalmente aceptado como una parte inherente del método de procesamiento y resulta muy difícil cambiar las costumbres ancestrales de los productores.

Los productores no obtienen un rendimiento económico adecuado durante el periodo de cosecha, debido al bajo precio en el mercado por la abundancia del producto. Generalmente, deben vender su producto en fresco a un precio por debajo del costo de producción. Asimismo, la renta derivada de estos productos deshidratados es mínima, debido a que la deshidratación y conservación es inadecuada. Tienen muchas limitaciones en el almacenaje, por lo cual la comercialización a precios razonables se hace difícil. La

[#]Parcialmente financiado por PFIP/MinCyT, UNCa, INTA

¹Investigador del CONICET

mejora en la tecnología de secado podría resolver una parte importante ese problema, más aun si se emplea tecnología solar de bajo costo, lo permitiría obtener mayor rentabilidad y mejorar la calidad.

Una opción es el uso de secaderos solares naturales o pasivos de bajo costo que pueden ser construidos a nivel local y no requieren energía eléctrica (Bala y Woods, 1989, Jairayet al., 2009, Iriarte et al., 2010). Este tipo de secadero condiciona el secado por cuanto para días nublados o seminublados, el flujo es bajo y fluctuante (Bala y Woods, 1994, Duran y Condori, 2009, Iriarte et al., 2011). Por lo tanto, tienen un riesgo importante en el deterioro del producto.

En este sentido, es interesante disponer de una opción de bajo costo con convección forzada de baja potencia. Iriarte et al (2012) hicieron una primera experiencia mediante la transformación de un tendalero tradicional en un colector – secadero solar activo de 10m de largo. Los primeros resultados mostraron que este tipo de diseño es de fácil construcción, no necesita mano de obra especializada, fabricado con materiales locales y de bajo costo. La capacidad de carga (100 a 120 kg) es razonable para el volumen que operan los pequeños productores. Sin embargo, se advirtió que las temperaturas diarias promedio del aire en contacto con el producto no presentaban niveles óptimos para el secado, con lo cual el tiempo para su deshidratación fue superior al previsto.

Para optimizar el diseño se lo simuló usando el software SIMUSOL, llegándose a la conclusión que para aumentar la temperatura promedio del aire era necesario alargar tanto colector como cámara de secado. El estudio determinó que la longitud máxima óptima era de 20 m, 10 m para cada cámara; sin embargo a partir de los 16 m (8 para cada sector) se comporta adecuadamente y su costo es razonable (Iriarte et al., 2014).

El propósito del presente trabajo fue estudiar el comportamiento de un nuevo diseño del secador solar tipo tendalero túnel activo con mayor longitud de los sectores colector-secadero y otro tipo de materiales para su construcción. Se describen las componentes y materiales utilizados para el nuevo sistema tendalero túnel solar activo como así también los resultados experimentales del secado de pimiento para pimentón. Se muestran las curvas de secado, la variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y del tiempo.

MATERIALES Y MÉTODO

Descripción del secadero solar

El secadero solar fue instalado en Chilecito Provincia de la Rioja. Consiste en un tendalero de 0,80 m de alto, 1,80 m de ancho y 16 m de largo, dividido en dos partes; una parte es el colector solar y la otra el secador, ambas están en el mismo plano.

Se realizaron tres modificaciones importantes respecto al diseño anterior: a) la estructura soporte del tendalero fue construida con tubos cuadrados de hierro de 2,5 cm, b) la aislación fue de lana de vidrio de 5 cm de espesor, con papel de aluminio en una de las caras, igual en ambos sectores. Esta lámina, expuesta al sol, fue pintada de negro mate y c) el espacio entre la placa colectora y la cubierta plana de plástico UV térmico fue disminuida a 0,20 m.

El sector de secado (1,8 m x 8 m), inicia donde termina el colector y allí se colocan las bandejas. Por debajo de las bandejas queda un espacio de 0,07 m por donde circula aire. El aire circula por el canal que queda formado entre esta cubierta y la placa colectora y las bandejas. Todo el sistema tiene una segunda cubierta semicircular de plástico, también de UV térmico, Fig. N° 1.

El producto se ubica sobre bandejas de 0,85 de ancho y largo de 0,98 m, de estructura de madera y cubiertas con media sombra. Entran 8 bandejas de cada lado, lo que hace una superficie para el producto de 13,3 m². La carga y descarga de los productos se realiza por los costados del módulo de secado. Se colocó un plástico negro cubriendo la estructura del tendalero para evitar pérdidas de calor y protegerlo de los animales. Sobre el suelo, se colocó otro plástico negro para evitar el crecimiento del pasto y se colocaron sobre él piedras para acumular parte de calor que gana el sistema en la parte inferior.

El aire ambiente es forzado a circular a través del sistema mediante dos ventiladores axiales de 45 W cada uno, absorbiendo en el sector de secado la humedad del producto. Estos ventiladores están ubicados en sector colector, pared este,. La radiación solar que pasa a través de las cubiertas transparentes del colector y del secador, en este último aporta calor al producto y contribuye a un aumento en la velocidad de secado. Hay que tener en cuenta que algunos productos no admiten radiación directa.

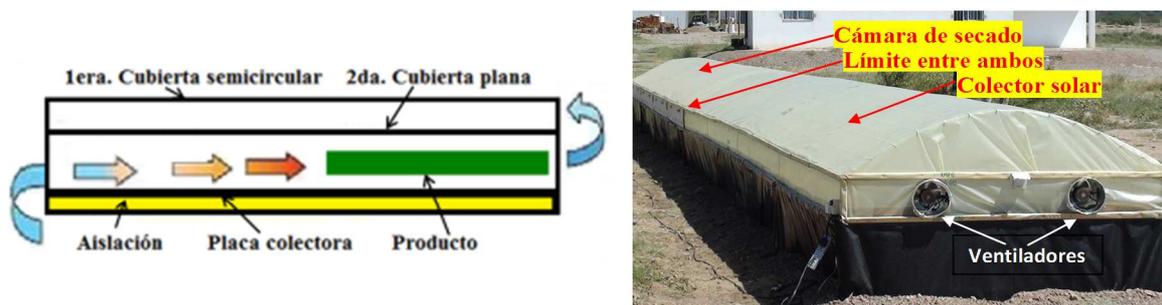


Figura N° 1. Esquema del secadero y vista del prototipo instalado en Chilecito

Sistema de medición

Las mediciones de temperatura y humedad se realizaron con Data Logger tipo HOBOS tipo U12 individuales que permiten medir temperaturas en el rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, resolución de $0,02^{\circ}\text{C}$) y humedades relativas del aire entre 10 - 90 % (precisión de $\pm 1\%$, resolución de $0,1\%$). Los sensores se ubicaron a lo largo del sistema en la dirección del flujo de aire, protegidos de la radiación solar directa. Los registros fueron cada 15 minutos durante el proceso de secado.

La radiación solar se midió con un piranómetro horizontal Kipp&Zonen ($\pm 5\%$). Las variables meteorológicas se determinaron con la estación meteorológica instalada en el lugar de la experiencia.

La velocidad del aire dentro del secadero fue medida con un anemómetro de hilo caliente, marca TSI 1650 ($\pm 0,05\text{ m s}^{-1}$), en diferentes puntos en dirección transversal y a lo largo del colector y secadero. Las muestras testigos se pesaron con una balanza electrónica (Mettler $\pm 0,1\text{ g}$) y la pesada inicial y final de todo el producto con una balanza de plato ($\pm 1\text{ g}$).

Cinética de secado

El secadero se cargó 100 kg de pimiento para pimentón de diferentes variedades, cosechado por productores vinculados con la Estación Experimental del INTA de La Rioja, Chilecito, en la segunda quincena de marzo. Se colocó el producto cubriendo la superficie de las bandejas y con una sola capa. La determinación de los parámetros de secado se realizó a través de nueve muestras de cada variedad, de aproximadamente 100 gr cada una, ubicadas en diferentes lugares del secadero y respetando las variedades de pimiento para pimentón. Las variedades que se utilizaron para este trabajo fueron: M1 Yokavil Hortícola; M2 Encadilla; M7 Experimental (Datler) y M10 Lautaro. Se realizaron pesadas horarias durante los tres días de secado. El peso seco del producto se obtuvo secando una muestra de cada variedad en una estufa con temperatura de $102\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta obtener peso constante.

Descripción del modelo de simulación del secadero

El modelo utilizado se basa en la analogía existente entre los procesos térmicos y los eléctricos (Iriarte 2001). Los coeficientes convectivos y radiativos se representan por resistencias eléctricas: RD para las pérdidas conductivas, RV para las pérdidas convectivas y RR para las radiativas. Los flujos de calor (JQ) y los flujos asociados a flujos de masa (JMQ) se representan por fuentes de corriente. La acumulación de calor sensible se esquematiza mediante capacitores (C) y las fuentes de tensión (E) representan valores de temperatura conocidos. Los valores de estos parámetros se ven reflejados en los datos y parámetros del programa a simular. Para la simulación del modelo del secadero tendalero se utilizó el software SIMUSOL.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Colector y cámara de secado

En la Fig. 2 se muestra la variación de las temperaturas del aire a la entrada ($T_{a,eC}$), salida del colector ($T_{a,sC}$), zona media del secadero ($T_{a,mS}$), salida del secadero ($T_{a,sS}$) y la irradiancia solar (R_{adi}) para el tercer día de secado. La temperatura del aire a la salida del colector es la misma que la temperatura de entrada en el secadero.

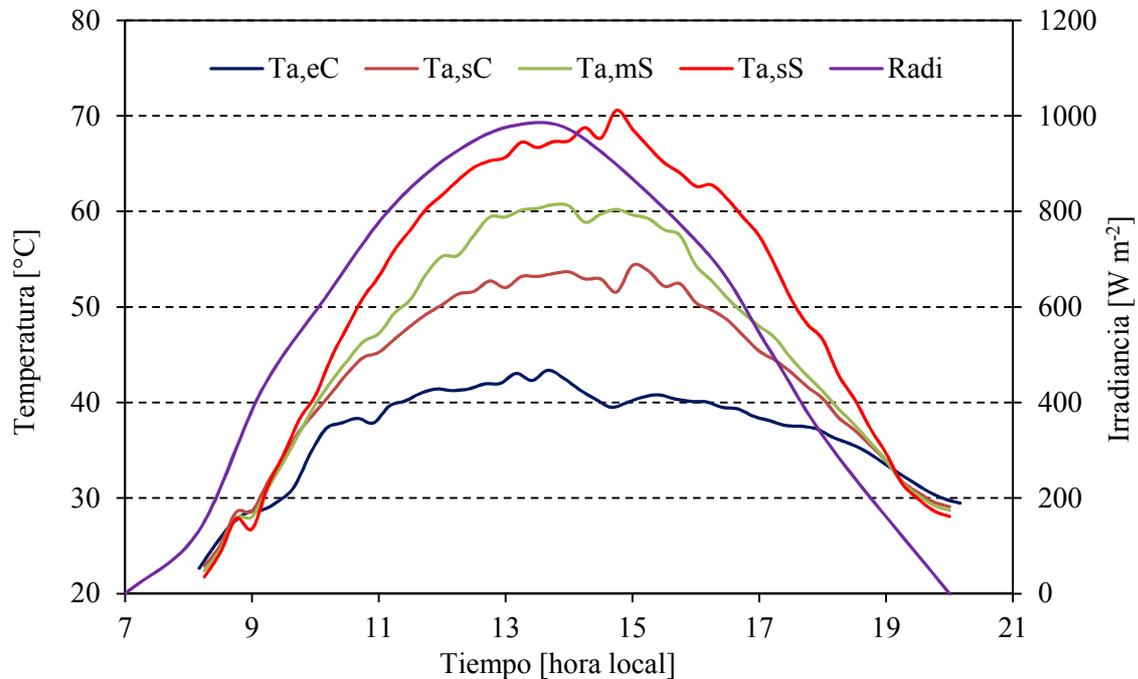


Figura 2. Variación de temperatura en distintos puntos del colector, secadero y la Irradiancia sobre superficie horizontal para el 3er. día en función del tiempo.

La temperatura del aire a la entrada al colector, coincidente con la temperatura del aire ambiente exterior, se mantuvo a partir de las 11,4 h y hasta 16,2 h por encima de 40 °C ($T_{a,eC} = T_{a,ex}$) y obtiene su valor máximo de 43,4 °C a las 13 h. En ese mismo intervalo la temperatura del aire a la salida del colector ($T_{a,sC} = T_{a,eS}$) fue superior a 48 °C, con un máximo a las 15,5 h de 54,3 °C, siendo el valor promedio de 52 °C. Por otro lado, la temperatura del aire a la salida del secadero se mantuvo, para el mismo intervalo, en valores superiores a 60 °C, con un valor máximo de 70,1°C a las 14,8 h con un valor promedio de 63 °C. La eficiencia máxima para el primer día de ensayo del colector (energía útil/energía incidente) fue de 53,3 % para un flujo de 0,51 kg s⁻¹. La eficiencia promedio diaria del colector para el mismo día fue 38 %, mientras que para los 3 días de secado fue del 31,8 %.

En la Figura 3 se aprecian las variaciones temporales de las temperaturas a la entrada ($T_{a,eS}$), salida ($T_{a,sS}$) del sector de secado, en contraste con la temperatura del aire en el ambiente exterior ($T_{a,ex}$) y la irradiancia incidente sobre superficie horizontal ($I_{h,ex}$) correspondiente a los tres días de secado. Se evidencia un aumento de la temperatura del aire al pasar por el sector de secado; esto se visualiza en los valores máximos de cada zona. En el primer día de secado la diferencia es de 5 °C, en el segundo 8°C y en el tercero de 13 °C. Estas diferencias entre los distintos días de secado, a pesar de que la irradiancia es casi la misma, se debe a que al comienzo del proceso secado, cuando el contenido de humedad es alto, el aire que proviene del colector disminuye su temperatura a lo largo de la longitud del túnel de secado debido al enfriamiento por evaporación en la superficie del producto. Cuando la cantidad de energía requerida para la evaporación de la humedad superficial del pimiento es menor, la temperatura del aire en el secador aumenta.

La Fig. 4, muestra la variaciones de la humedad del aire en el ambiente exterior ($H_{ra,ex}$), la humedad relativa a la salida del colector ($H_{ra,sC}$) y la humedad relativa a la salida del secador ($H_{ra,sS}$). La humedad del aire exterior durante las horas de secado fue menor que 35,2 %, la mínima de 22 % (el último día) y el promedio durante el periodo de secado fue de 44 %. La humedad mínima del aire a la salida del colector fue 24,6 %, 23,9 % y 16,2 % para cada uno de los días de secado, mientras que a la salida del secadero fueron 15,4 %, 13,3 % y 8,2 %.

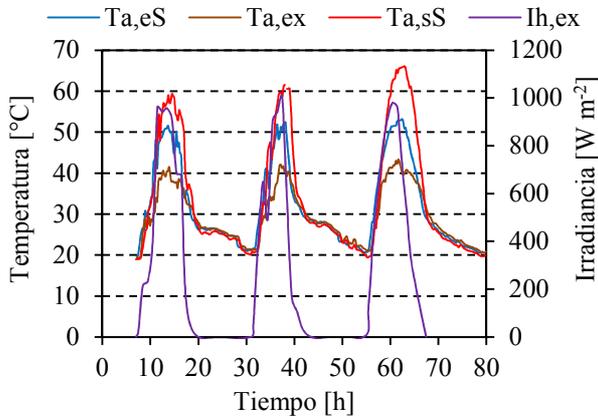


Figura 3. Temperaturas en el secadero e Irradiancia horizontal en función del tiempo para los tres días de secado

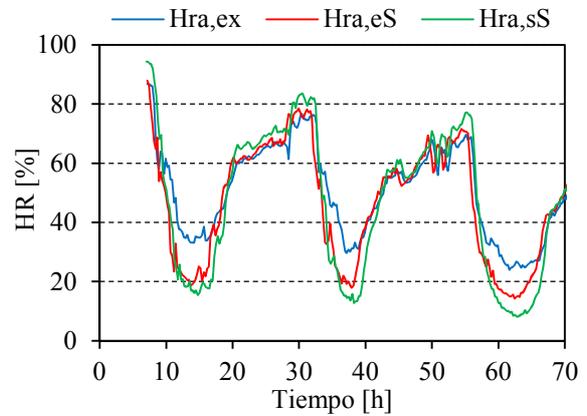


Figura 4. Humedades en el secadero en función del tiempo para los tres días de secado

En la Fig. 5 se grafica el contenido de humedad (M_h), expresado en kg kg^{-1} referido a base seca (bs), en función del tiempo para cuatro muestras seleccionadas. El contenido de humedad inicial en base seca de las muestras de pimiento M1 y M10 fue de $2,6 \text{ kg kg}^{-1}$, M2 de $2,1 \text{ kg kg}^{-1}$ y M7 de $3,2 \text{ kg kg}^{-1}$.

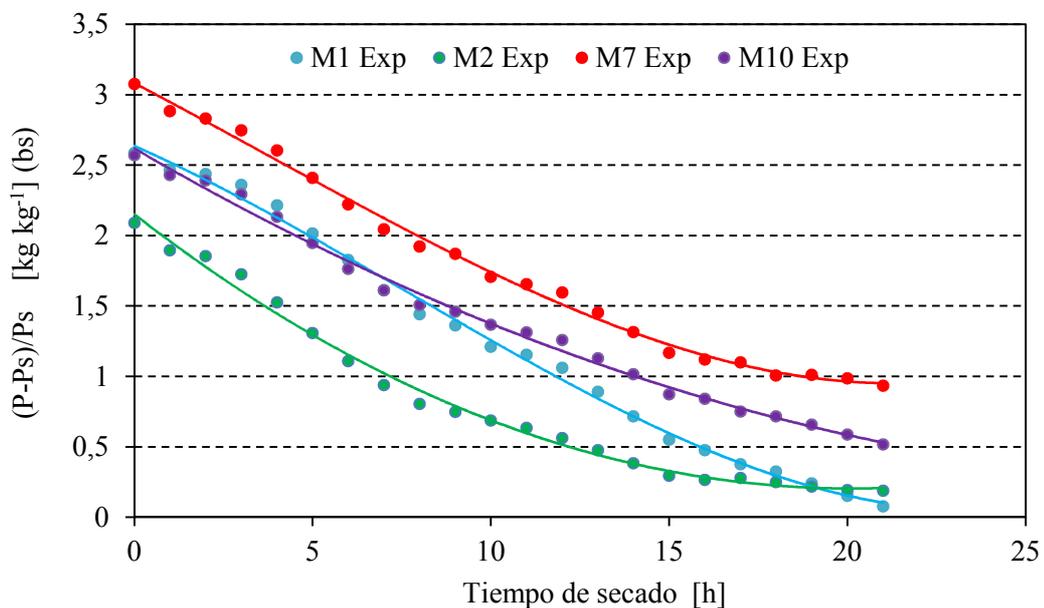


Figura 5. Variación temporal del contenido de humedad (bs) para muestras de diferentes variedades

Después de 21 horas de secado, sin contar el periodo nocturno, las muestras llegaron a los siguientes contenidos de humedad (bs): M1, $0,08 \text{ kg kg}^{-1}$, M2, $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$, M7, $0,97 \text{ kg kg}^{-1}$ y M10, $0,52 \text{ kg kg}^{-1}$, lo que significa pérdidas de 68,5 %, 89,9 %, 97 % y 96% respectivamente. Esta diferencia se debe fundamentalmente a las características de cada variedad. Una vez finalizado el proceso los pimientos fueron retirados del secadero y acondicionados para lograr la homogeneización del producto respecto al contenido de humedad.

La relación entre el contenido de humedad (bs) y el tiempo real de secado, para cada muestra, ajustada por mínimos cuadrados, es:

$$[(P-Ps)/Ps]_1 = 0,0002 t^3 - 0,0046 t^2 - 0,1121 t + 2,6361 \quad R^2 = 0,9957 \quad [1]$$

$$[(P-Ps)/Ps]_2 = -8E-06 t^3 + 0,0051 t^2 - 0,1969 t + 2,1517 \quad R^2 = 0,9924 \quad [2]$$

$$[(P-Ps)/Ps]_7 = -2E-06 t^3 + 0,0018 t^2 - 0,1519 t + 3,1005 \quad R^2 = 0,9960 [3]$$

$$[(P-Ps)/Ps]_{10} = -2E-07 t^3 + 0,0023 t^2 - 0,1471 t + 2,6182 \quad R^2 = 0,9943 \quad [4]$$

Las relaciones entre la velocidad de secado en función del contenido de humedad y del tiempo durante el proceso secado en el túnel solar, fueron ajustadas por cuadrados mínimos, Tabla 1. En la Fig. 6 y 7, se muestran las gráficas correspondientes.

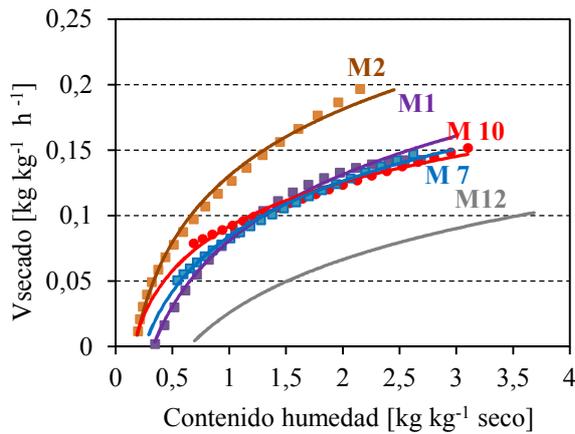


Figura 6. Velocidad de secado en función del contenido de humedad

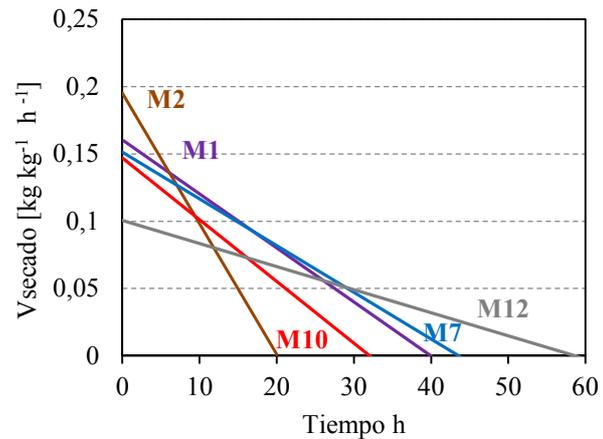


Figura 7. Velocidad de secado en función del tiempo

Las siguientes ecuaciones son el resultado del ajuste de las curvas de velocidad de secado en función del contenido de humedad (Mh) para pimiento para pimentón (Tabla 1), obtenidas al derivar las curvas de secado y ajustarlas por mínimos cuadrados.

$V_{s1} = 0,0727 \ln(Mh_1) + 0,0809 \quad R^2 = 0,9927$	$V_{s1} = -0,004 t + 0,1605 \quad R^2 = 0,9264$
$V_{s2} = 0,0733 \ln(Mh_2) + 0,1305 \quad R^2 = 0,9934$	$V_{s2} = -0,0097 t + 0,1954 \quad R^2 = 0,9998$
$V_{s7} = 0,0488 \ln(Mh_7) + 0,0917 \quad R^2 = 0,9851$	$V_{s7} = -0,0035 t + 0,1515 \quad R^2 = 0,9999$
$V_{s10} = 0,0609 \ln(Mh_{10}) + 0,0841 \quad R^2 = 0,9943$	$V_{s10} = -0,0046 t + 0,1471 \quad R^2 = 1$
$V_{s12} = 0,0587 \ln(Mh_{12}) + 0,0258 \quad R^2 = 0,9956$	$V_{s12} = -0,0017 t + 0,1006 \quad R^2 = 0,9855$

Tabla N° 1. Ecuaciones de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y el tiempo

Se observa que la velocidad de secado fue mayor al inicio del proceso de secado, reduciéndose logarítmicamente a medida que el contenido de humedad va disminuyendo, como era de esperar. En ambas figuras, además de la velocidad de secado para las muestras procesadas en esta oportunidad, se incluye la velocidad de secado obtenida con el prototipo anterior (Iriarte et al., 2012), identificada como M12. Se advierte claramente que la velocidad de secado del nuevo diseño aumentó en forma significativa, aun en las primeras horas del proceso. Esta diferencia es aproximadamente el doble para la variedad M2, variedad que más rápido se seca.

En Figura 8 y 9, se muestran las bandejas con pimiento recién cargado y luego del secado.



Figura 8. Carga de pimiento fresco



Figura 9. Bandejas con pimiento seco

MODELO DE SIMULACIÓN DEL COLECTOR - SECADOR

Diagrama del modelo

Para utilizar el programa SIMUSOL y ajustar con mayor precisión el prototipo, se dividieron longitudinalmente, tanto el colector como la cámara de secado, en 3 partes iguales. Por razones de espacio se muestra el circuito correspondiente al sector secador, teniendo en cuenta que ambos circuitos (colector y secador) desde el punto de vista térmico son similares, Fig. 10.

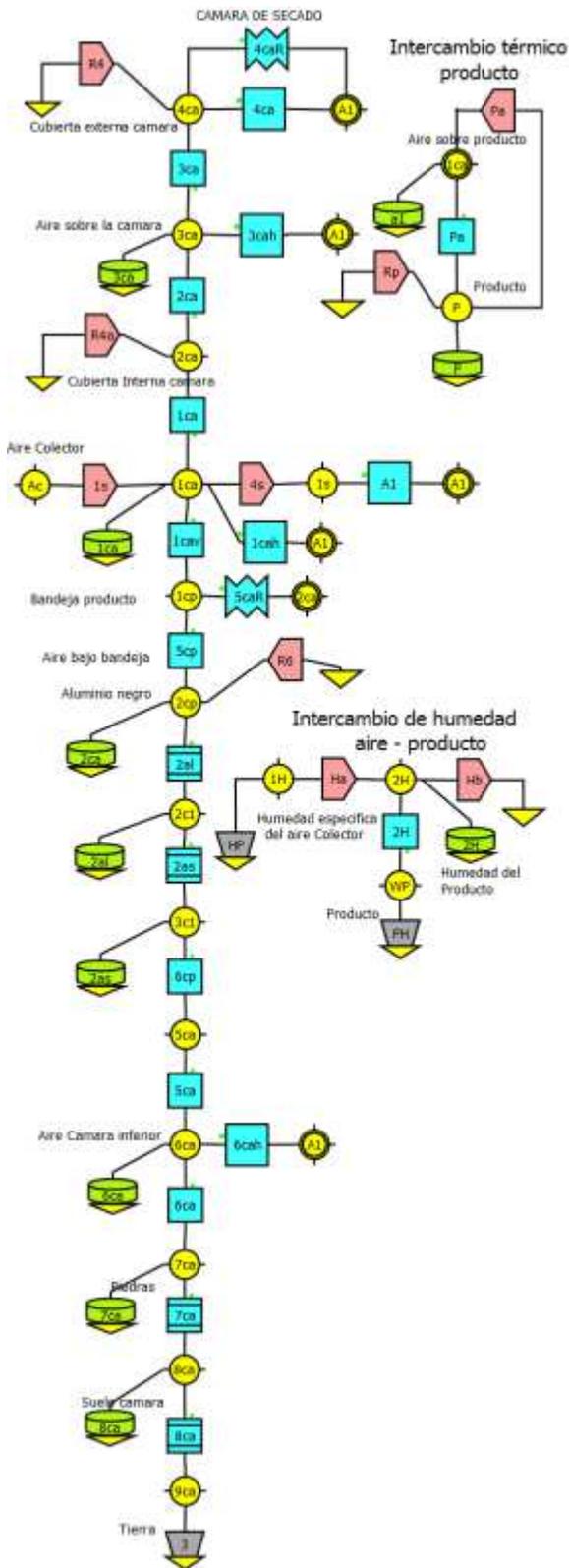
Los principales elementos constitutivos de la misma son: nodo [Ac] representa la entrada del flujo másico del colector, el nodo [1cp] la bandeja para carga del producto, el nodo [2ca] a la cubierta interna, el [4ca] a la cubierta externa, el [5ca] al cerramiento de plástico negro de la parte inferior, la cama de piedras [7ca], el suelo o piso de la cámara [8ca] y la tierra [9ca], además el ambiente exterior [A1]. Entre estos elementos se intercalan algunos nodos, para estudiar el comportamiento del aire que está circulando sobre el producto [1ca], la masa de aire existente entre ambas cubiertas en la parte superior [3ca], entre la bandeja y el plástico negro [2cp], además del comprendido entre el plástico negro y el lecho de piedras [6cp] en la parte inferior. En este circuito se indican también las pérdidas hacia el exterior, mediante las resistencias convectivas [4ca], [3cah], [1cah] y [6cah].

Se incluyen los aportes de los intercambios térmicos por procesos convectivos, conductivos o radiativos entre los diferentes elementos, así como el aporte de energía por la radiación solar [R4] sobre la cubierta exterior y [R4a] interior y sobre la cubierta negra [R6]. La acumulación de energía en el aire, en el lecho de piedras y en el piso de la cámara, está considerada con la incorporación de los acumuladores [3ca], [1ca], [2ca], [6ca], [7ca] y [8ca].

El aire caliente que sale del colector es introducido en la cámara de secado mediante flujo de masa [J1s] en el nodo [1ca], su desplazamiento a través del producto está dada por la fuente [4s]. El proceso de intercambio térmico y la pérdida de humedad del producto están representados en dos circuitos independientes pero relacionados con el principal por intermedio de los nodos [1ca] y [WP].

En el primer circuito identificado como: "Intercambio térmico en el producto", el elemento producto está representado por el nodo [P], que recibe energía proveniente de la radiación solar [Rp] y también del aire caliente que está circulando sobre la bandeja [1cp]. Mediante un proceso convectivo indicado, con la resistencia [Pa], se produce evaporación de la humedad superficial y cambios en su temperatura. La masa del producto se representa con el acumulador [P].

En el circuito de pérdida de humedad "identificado como: Intercambio de humedad aire – producto", se considera la humedad inicial que posee tanto el producto como el aire que circula por el secadero y las variaciones en su contenido durante el proceso de secado a causa de la interacción entre ellos. Los valores iniciales son introducidos para el aire mediante la fuente (HP) asociada a la humedad específica del aire del colector.



DATOS	DATOS
#Datos de circuito termico secador J1s=JM,1000,PFlujo*PVal J4s=JM,1000,PFlujo*PVal #Camara RA1=0.000 E3=18 JR4=JQ,PACU,(0.10*Prad) JR4a=JQ,PACU,(0.10*Prad) JR6=JQ,PAB,(0.10*Prad) R1ca=V1,PAB,PH1ca R2ca=V1,PAB,PH2ca R3ca=V1,PAB,PH3ca R3cah=V1,PAF,PH3cah R4ca=V1,PACU,PH4ca R1cah=V1,PALCa,PH1cah R1cav=V1,PAB,PH1cav R5ca=V1,PAB,PH5ca R5cp=V1,PAB,PH5ca R6cp=V1,PAB,PH5ca R6ca=V1,PAB,PH6ca R6cah=V1,PABCA,PH6cah R2al=D1,PAC,PeC,209.3 R2as=D1,PAC,PeAi,0.03 R7ca=D1,PAB,P6,0.06 R8ca=D1,PAB,0.60,0.05 R4caR=R1,PACU,0.9,1 R5caR=R1,PAB,0.9,1 C1ca=Ca1=C1,1000,PMcam #Camara C2ca=C1,1000,1*PAB*0.20 C3ca=C1,1000,1*PAB*P5 C6ca=C1,1000,PAB*1*(P7-0.20) C7ca=C1,900,1200*PAB*P6 C8ca=C1,900,1000*PAB*0.6 C2al=C1,878,(2698*P1*PeC) C2as=C1,1000,(16*P1*PeAi) #Parametros del circuito de hum #PFlujo PFlujo= 0.30*PVal #kg/s PVal=1 #Tabla Val(Pdif) Pdif= (Temp 1ca-25) PHeS= TABLA HeS(tiempo) #EXP PHsS= TABLA HsS(tiempo) #EXP PMTI=80 #kg masa humeda inicial PMS=15 # kg masa seca #Hr Salida PH3=QWs(PPs,PPa) PHa=VC2H PHsa=PHa/PH3 Pcpws=3000 #Cp Prod. seco Pcpw=4180 PPa=87000 #Pa PWsa=QWs(PPs,PPa) PHP=PHeS*QWs(PPs,PPa) PPs=Qpsat(Temp 1ca) PPH=QWs(PPsp,PPa) PPsp=Qpsat(Temp p) #Temp P DPAGu= -(FLUJO R2H) Px=(PAGu)/(PMS) PMT=(PAGu+(PMS)) #kg m humedad Pcpp=Pcpws+Pcpw*Px PXX=PMT/PMTI PXX1=(PMT-PMS)/(PMTI-PMS)	#Camara - Producto Cp=C1,Pcpp,PMT JRp=JQ,PAB,(0.42*Prad) # supProd JPa=2400000*IR2H #Lvapor Rpa=V1,PAB,12 # ver valor #Datos del circuito de humedad EHP= PHP #humedad especif. aire JHa=EHP*PFlujo #PW1H*PFlujo JHb=VC2H*PFlujo C2H=VC2H*PMcam R2H=V1,PAB,QHD(EPH) #htransf masa EPH=PPH #Humed aire sobre prod agua # PARAMETROS ADICIONALES PTemp=TABLA Tamb(tiempo) #Tamb archivo Prad=TABLA Rad(tiempo) # Rad archivo PVcam=PAB*P5 #m3 PMcam= 1*PVcam #kg PCpa=4186 PH1c=12 #Hcolect aire-cubi int PH2c=PH1c #Hcol cub int-aire PH3c=PH1c #Hcol aire-cub ext PH4c=PH3ch=(2.8+3.7*2) #Hcol cub ext-ext PH1cv=PH1c #Hcol aire-plast negro PH1ch=PH4c PH5c=PH1c #Hcol plast-aire PH6c=PH4c #Hcol aire-ext PH6cv=PH1c #Hcol aire-piedra PH1ca=PH1cav=PH1c #H aire-cubi int-pl negro PH1cah=PH4c PH2ca=PH1c #H cub int-aire PH3ca=PH1c PH3cah=PH4c #H aire-cub ext PH4ca=PH4c #H cub ext-ext PH5ca=PH1c #H plast-aire PH6cah=PH4c #H aire-ext PH6ca=PH1c #H aire-piedra # PARAMETROS CONSTRUCTIVOS SISTEMA P1=8 #LARGO_COLECTOR P2=8 #LARGO_CAMARA_DE_SECADO P3=1.8 #ANCHO_COLECTOR_Y_CAMARA P4=0.2 #ALTO_COLECTOR P5=0.2 #ALTO_CAMARA P6=0.15 #ESPESOR_CAMA_DE_PIEDRA P7=0.50 #ALTO_PATAS PeC=0.001 PeAi=0.05 PAC=P3*P1 #AREA_COLECTOR PAB=P3*P2 #AREA_BANDEJA PATC=P3*P4 #AREA_TRANSV_COLECTOR PATS=P5*P3 #AREA_TRANSV_CAM PALC=P4*P1 #AREA_LATERAL_COLECTOR PAF=3.14*(P3**2)/2 #AREA_SEMICIRCULAR PACU=3.14*P3/2*P1 #AREA_CUBIERTA_COL PABCA=P3*P7+2*P1*P7 # AREA_LAT_BAJO_COL PABCA=((P2*2*(P7-P5/2))+P1*(P7-P5/2)) PALCa=((2*P5*P2)+(P3*P5/2)) #LAT_CAMARA
PARAMETROS	PARAMETROS
#Funciones para circuito de humedad QWs(xx,yy)=0.622*xx/(yy-xx) Qpsat(TT)=610.7*10**(7.5*TT/(273+TT)) #Threkeid QHD(xx)=13/(958+1796*xx)#hc/Lewis #QWE(PDS,PH1H,PPa)=(0.622*PDS*(PH1H/100))/(PPa-(PH1H/100)*PDS) #QPw(Patm,Wsal)=(Patm*Wsal)/(Wsal+0.622)	
FUNCIONES	

Figura 10. Circuito y datos para la simulación numérica con SIMUSOL

Ajuste del modelo de simulación

El ajuste del modelo de SIMUSOL se realizó con datos experimentales del ensayo de secado de pimiento para pimentón. Se realizó un ajuste del modelo en el sector colector y de la zona del secador. Los coeficientes convectivos, conductivos y radiativos que se usaron en el modelo térmico fueron calculados teniendo en cuenta las propiedades físicas y térmicas de cada uno de los materiales que se utilizaron para su construcción.

Se utilizaron como variables de ajustes los coeficientes de absorción de la radiación en las cubiertas y la placa colector, teniendo en cuenta los datos medidos, como el flujo (velocidad promedio del aire medida en los tres nodos principales del aire) y la radiación obtenida experimentalmente sobre la placa colector. El ajuste se realizó comparando las temperaturas simuladas y experimentales del aire a la salida del colector. Los coeficientes que intervienen en los cálculos se ajustaron a la temperatura media entre la temperatura de entrada y salida del colector y del sector de secado, según corresponda. En el procedimiento de ajuste se modificó un 2 % del coeficiente de absorción de la radiación solar incidente sobre superficie horizontal y sobre el producto, respecto del calculado teóricamente.

En la Figura 11 se muestra la variación de la temperatura del aire a la entrada del secadero [$T_{a,eS}$] y salida del secadero [$T_{a,sS}$] experimentales y las ajustada con el modelo. Del análisis de los datos se obtiene que la desviación entre los datos experimentales y simulados, en promedio fue de $0,87\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un error relativo respecto al valor experimental de $1,2\%$, para los tres días de secado.

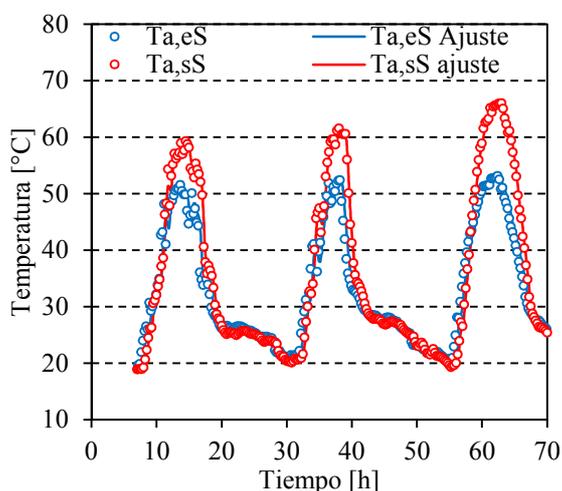


Fig. 11. Ajuste del modelo en las temperaturas del colector y secador

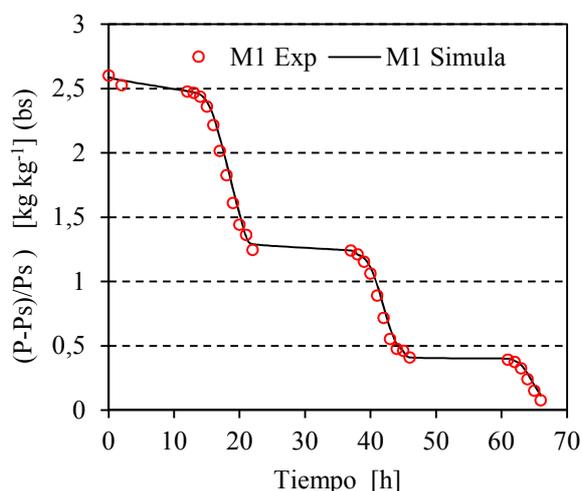


Fig. 12. Ajuste del modelo para el contenido de humedad en función del tiempo para muestra 1

En lo que respecta a la simulación de la variación del contenido de humedad $[(P-P_s)/P_s]$ respecto del tiempo, para la muestra 1, se advierte una buena concordancia (Fig.12), siendo el error relativo respecto de los valores experimentales del orden del 2 %. En las otras variedades de pimiento utilizadas para el secado, el ajuste también fue bueno.

CONCLUSIONES

Las modificaciones realizadas en el secadero tendalero túnel permitieron el aumento del flujo másico por disminución del área transversal y del calor disponible, al incorporar aislamiento y placa colector al secador. Esto produjo un aumento en la temperatura del aire sobre el producto, aumentando la velocidad de secado y disminuyendo el tiempo de secado.

Al ser iguales, en este nuevo diseño, las configuraciones del colector y secador es posible cambiar las longitudes de ambas partes a fin de adaptarlas a las necesidades del secado.

Este secadero, si bien está construido en estructura de hierro, para estos ensayos, se puede construir en madera. Su construcción es sencilla, los materiales son locales, su costo no aumenta

significativamente. Si es de madera su costo es menor y la mano de obra es no especializada. La capacidad máxima de carga 140 kg, para el caso de pimiento para pimentón.

El modelo utilizado para la simulación del nuevo diseño demostró ser adecuado para este sistema.

REFERENCIAS

- Bala B. y Woods J. (1989). Simulation and Optimization of natural convection solar drier. *Journal of Agricultural Engineering*, 27, pp. 419-424.
- Bala, B.K., Woods, J.L.(1994). Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy* 53 (3), pp. 259–266.
- Carabajal D. (2002). Secadero tendalero con cubierta plástica. Folletos de divulgación de INTA Catamarca.
- Duran G. y M. Condori (2009). Modelo y simulación de un secador solar pasivo de producción semi industrial. *Avances en Energías*, pág. 121 – 129. *Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 13.
- Jairaj K., Singh S. and Srikant K. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying, *Solar Energy* 83, pp. 1698-1712.
- Iriarte A. (2001). Calefacción de invernaderos utilizando energía solar y biomasa residual agrícola. Tesis doctoral. Libro publicado por Editorial Científica Universitaria, ISBN: 978-987-1341-43-6. 2009.
- Iriarte A., S. Bistoni, V. Luque, M. Laray L. Brizuela. (2010). Secadero tendalero con chimenea solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 14, pág. 2.01- 2.08.
- Iriarte A., S. Bistoni, M. Watkins, V. Luque, H. Sánchez y L. Brizuela. (2011). Análisis de un secadero solar tendalero con torre central en convección natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol.15, pág. 225 - 232..
- Iriarte A., Bistoni S., Luque V., García V., Rodríguez C. y Brizuela L. (2012). Caracterización del secado de pimiento para pimentón en un tendalero solar activo tipo túnel. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 16, pág. 895-899.
- Iriarte A., Bistoni S., García V. y Luque V. (2013) .Evaluación de un secadero solar tendalero túnel: estudio de secado de manzanas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 17, pág. 21-28.
- Iriarte A., Rodríguez C., Bistoni S., Hall M.(2014). Simulación de un secadero solar tendalero túnel. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol.18, pág. 825 – 834.

ABSTRACT: This paper proposes a new design of a mixed solar dryer built on a traditional “tendalero”, with a plastic layer and with two small axial fans 0.45kW each one. It consists of two parts: a solar collector and, on the same plane, the drying chamber. The design changes and the new materials used are described. The characterization of the dryer for drying peppers for paprika, made in Chilecito, La Rioja, during the month of March is shown. Moreover, the variations of temperature and humidity, the drying rate depending on the moisture content and time are analyzed for four pepper varieties. The speed and time of drying were suitable and the product presented had good quality. The simulation model was based on the thermal- electric (SIMUSOL) equivalence and was adjusted to the experimental data.

Keywords: active solar dryer, drying simulation, pepper for paprika