ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 22, pp 02.73-02.83, 2018. Impreso en la Argentina
ISSN 2314-1433 - Trabajo selecionado de Actas ASADES2018

SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SECADERO SOLAR DIRECTO PASIVO MEDIANTE SIMUSOL

A. Salvo[1], P. Dellicompagni[2], N. Sarmiento[3], J. Franco[4], R. Echazú[5]
Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de Salta (UNSa), Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.
Tel. 0387-4255579 Cel. 0387-154030921. E-mail **aienweni@gmail.com**

Recibido 12/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMEN: Este artículo presenta resultados experimentales y de simulación de un de secador solar directo pasivo. Se construyó un deshidratador de caja directo que se ensayó en condiciones reales de funcionamiento para el secado de bananas. La medición de los parámetros experimentales fue automatizada mediante un dispositivo Raspberry Pi construido y programado para tal fin. Se simuló en SIMUSOL y se desarrolló el modelo en software libre DIA. Se obtuvo un muy buen ajuste entre los datos medidos y los logrados con SIMUSOL. Los primeros resultados evidencian que en general el modelo de simulación propuesto funciona adecuadamente y permite continuar trabajando sobre el mismo para incorporar aquellos ajustes pendientes.

Palabras Claves: Secado solar de bananas, deshidratador pasivo, simulación, secadero solar pasivo, SIMUSOL.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se observa una demanda creciente de alimentos asociada a un importante cambio del estilo vida en la población mundial, lo que ha generado la existencia de nuevas preferencias asociadas a la elección de alimentos más saludables, y de mayor calidad nutritiva (Yahia et al., 2001), así como nuevas exigencias por parte de los consumidores en cuanto a la producción de alimentos cuyas prácticas y manejos permitan que los mismos sean inocuos para la salud.

La necesidad creciente de determinados alimentos se da simultáneamente con una producción y productividad limitadas, condicionadas por las pérdidas existentes de los mismos, ocasionadas por múltiples factores como ser, cuestiones de infraestructura, elecciones tomadas al momento de producir, desinformación, ataque por insectos y/o microorganismo, etc.

Dichas pérdidas se dan a lo largo de todo el ciclo productivo. Las que se suceden durante la pos-cosecha suelen ser mayores en zonas tropicales y sub-tropicales por las condiciones climáticas prevalecientes (Yahia et al., 2001).
Lo antedicho estimula, principalmente entre la producción de alimentos perecederos, a buscar nuevos métodos de conservación y/o a la mejora de aquellos ya existentes entre los que se encuentra el secado solar, el cual sigue siendo “aún el proceso agrícola más utilizado en los países iberoamericanos” (Espinoza et al., 2010).

[1] Becaria Doctoral CONICET
[2] Becario Doctoral CONICET
[3] Becaria Doctoral CONICET
[4] Investigadora Adjunta CONICET
[5] Técnico investigador del INENCO

El presente trabajo surge en el marco del proyecto de investigación presentado en el trabajo Salvo et al. (2017) el cual plantea el deshidratado solar como una alternativa en la región tropical y sub-tropical de las provincias de Salta y Jujuy para la conservación de los excedentes de frutas que tienen los pequeños y medianos productores en dicha zona.

Para poder mejorar la eficiencia de los equipos y evaluar qué parámetros afectan de manera importante al proceso de secado, se realizó una simulación del proceso. Se presentan a continuación el diagrama realizado en DIA de un deshidratador de caja directo y la simulación utilizando SIMUSOL, la cual fue validada experimentalmente, utilizando para la medición de los parámetros en el secadero un dispositivo Raspberry Pi construido y programado para tal fin.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del secadero

La figura 1 muestra el esquema del deshidratador con sus dimensiones. El mismo se construyó utilizando para las paredes tableros de madera prensada y una cubierta de policarbonato alveolar inclinada 27°. En la parte inferior del mismo se colocó chapa galvanizada. Los orificios de entrada y salida del aire tienen una superficie de 75 cm² habiendo tres de entrada y tres de salida. La bandeja se encuentra a una altura de 20 cm desde la parte inferior de la caja siendo la misma una malla plástica.

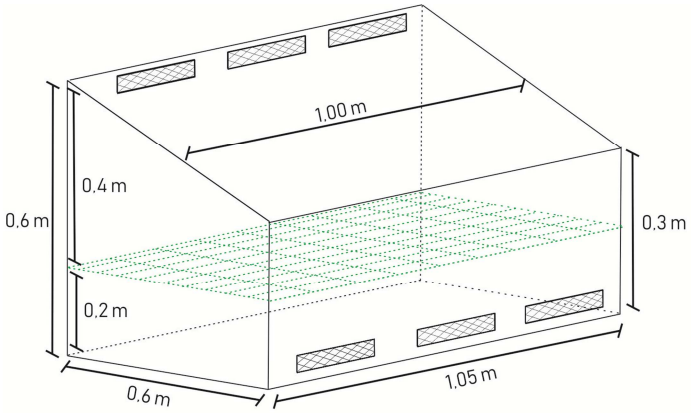


Figura 1. Descripción del secadero directo tipo caja

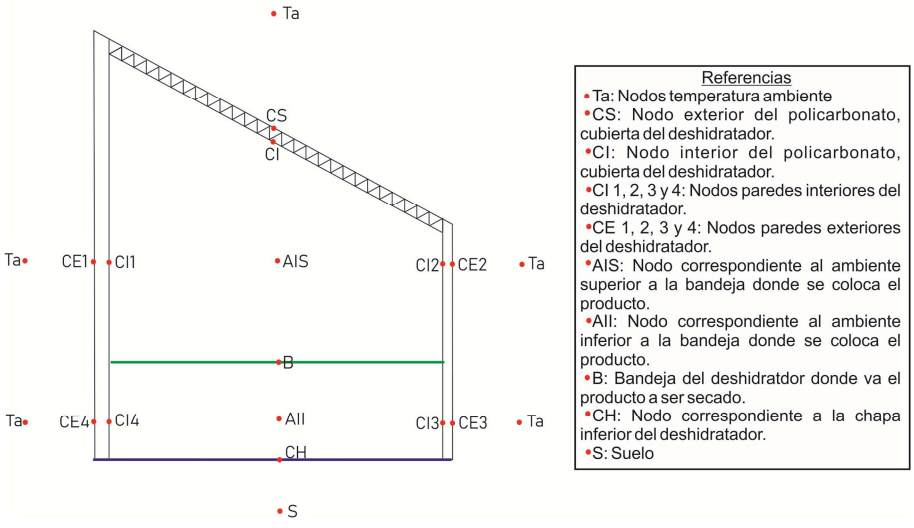


Figura 2. Ubicación de los nodos para la realización del diagrama en DIA.

En la figura 2 se pueden observar los nodos que fueron considerados para la realización del diagrama mediante la utilización del software DIA. Se encuentran detallados en la figura 3 los mecanismos de transferencia térmica radiativas, conductivas y convectivos contemplados en la simulación del circuito térmico.

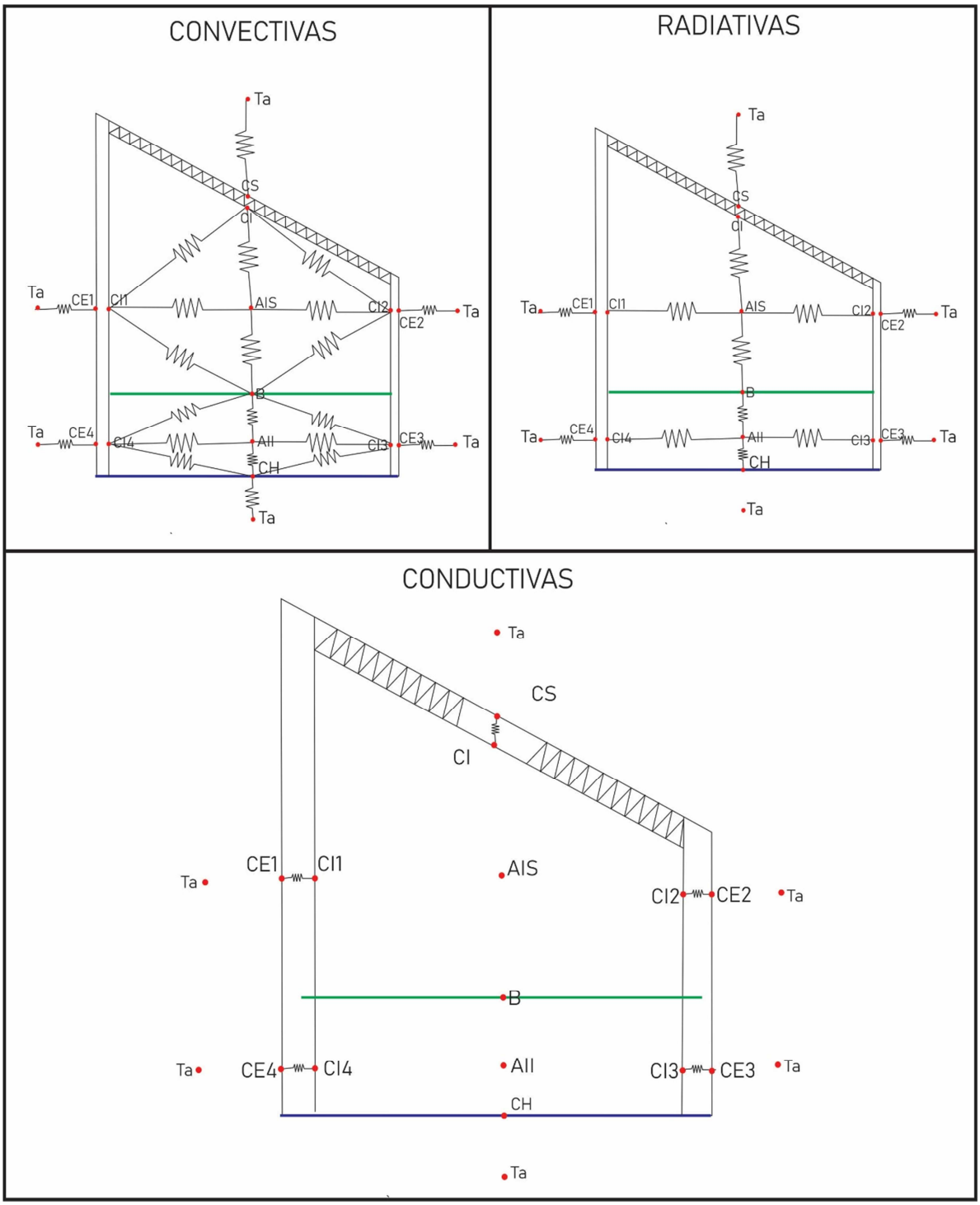


Figura3. Resistencias conductivas, convectivas y radiativas consideradas.

Las figuras 4 y 5 muestran el diagrama final con el cual se corrió la simulación, es importante mencionar que dicho modelo fue elaborado considerando las siguientes hipótesis.

- El flujo de calor de pérdida hacia el exterior a través de la envolvente del secadero se realiza de manera perpendicular a las paredes, no habiéndose consdierado las paredes laterales del mismo. Vale decir que el esquema de pérdida se plantea en un corte transversal del secadero.
- Se consideran homogéneos los materiales con que está construido el secadero. Por lo que los parámetros térmicos involucrados en las transferencias de calor (coeficientes conductivos son constantes y responden a modelos lineales).

- El flujo de aire en el interior del recinto por encima y por debajo de la placa que contiene el producto, es uniforme y laminar. No se consideran efectos de vórtices y de pérdida de carga en el flujo al atravesar el producto.

- En el presente modelo no se consideró el efecto de enfriamento evaporativo por cesión desde el producto al aire en circulación; por lo tanto el modelo de transferencia térmica por evaporación no ha sido tenido en cuenta.

- No se tuvieron en cuenta reflexiones en las paredes internas. La transmitancia del policarbonato se consideró en un valor promedio e independiente del ángulo de incidencia solar.

- No se tuvo en cuenta el modelo de pérdida conductiva hacia el suelo, suponiendo que la temperatura de fondo del secadero es igual a la temperatura ambiente.

- Las características emisivas de la sueprficie del producto se consideraron invariables durante el proceso de secado.

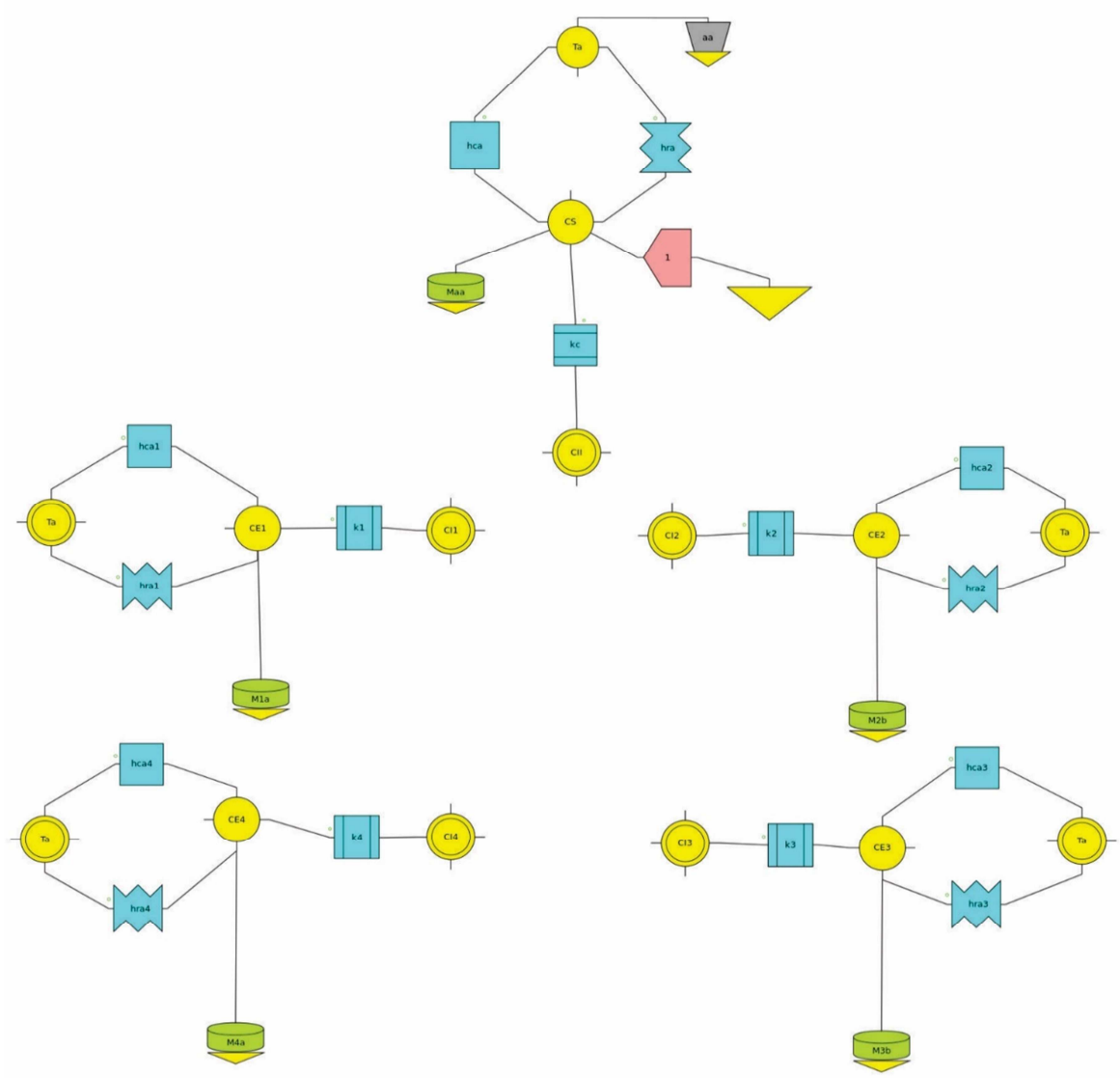


Figura 4. Modelo de transferencia térmica hacia el exterior.

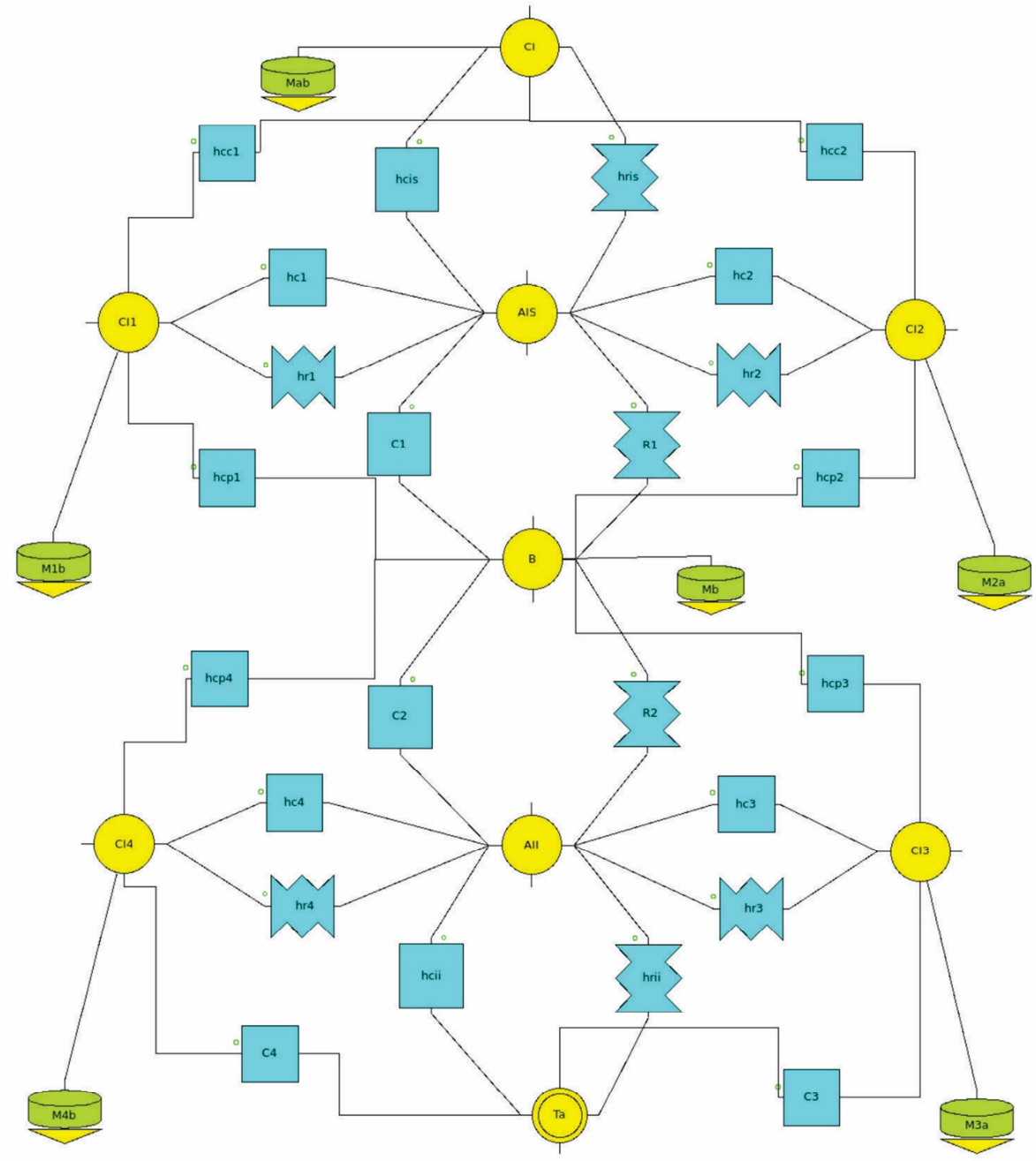


Figura 5. Modelo de transferencia térmica en el interior.

Sistema de medición

La toma de datos se realizó secando bananas. Primero se determinó en laboratorio la curva de secado característica mediante la deshidratación de rodajas de 0,5 mm de espesor en un horno eléctrico a 60 °C hasta alcanzar el peso constante.

En la experiencia en campo de la deshidratación de bananas se midió radiación en el plano horizontal y en el plano del colector con un solarímetro HT204 Solar Power Meter. Para la humedad relativa y la velocidad del flujo de aire a la entrada y salida del deshidratador se utilizó un anemómetro de hilo caliente TES 1341. Se realizó el seguimiento del peso de la muestra utilizando una balanza digital cuya precisión es de 0,01 g.

Para la medición de la temperatura y humedad ambiente y en el interior en la zona de la bandeja con el producto, se desarrolló un sistema basado en la microcomputadora Raspberry Pi conectada a dos sensores de temperatura y humedad DHT11 (ver figura 6) construida específicamente para éste uso y descripta en el siguiente apartado con mayor profundidad.

Los datos experimentales fueron procesados y comparados con el modelo simulado de forma tal de contrastar los datos experimentales y los obtenidos a partir de SIMUSOL.



Figura 6. Raspberry Pi registrando las mediciones

Se determinó el coeficiente de correlación, el %RMSE -error cuadrático medio relativo- y el %MBE -sesgo medio relativo- (Raichijk, 2009) para evaluar la precisión de la simulación.

Descripción del microcomputador Raspberry Pi

La Raspberry Pi fue lanzada en 2014, con un procesador Broadcom módelo BCM2836 con cuatro núcleos y de 700 MHz a 900 MHz. Posee VideoCore IV como placa gráfica y 1 GB de memoria compartida con la gráfica. Posee cuatro puertos USB y 40 pines de propósito General. Los puertos con entradas/salidas de propósito general (General Purpose Input/Output: GPIO) permiten interactuar con diversos componentes electrónicos. Se utilizaron dichos puertos para la conexión de los sensores. La Raspberry Pi a su vez se encuentra conectada a una red ethernet mediante un conector RJ45 para facilitar el comando del microcomputador así como la toma de datos. A su vez, la Raspberry es alimentada mediante un conector microUSB y un cargador de celular de 5,0 V y 700 mA.

El sistema operativo que comanda la Raspberry Pi es una distribución linux, el fabricante ofrece diversas opciones adaptadas a la plataforma ARM en su sitio web (Debian, Archlinux, Fedora entre otros). En este caso se optó por utilizar Raspbian, dicha versión está basada en Debian 7 (wheezy) e incluye las utilidades básicas del sistema operativo, un escritorio gráfico con muy pocos requerimientos de hardware LXDE y algunas opciones para la programación: un entorno de desarrollo para Python (IDLE) y el compilador GCC para el lenguaje C. Al tratarse de una distribución derivada de Debian, con sus correspondientes repositorios accesibles en Internet se puede obtener más de 35.000 paquetes de software de la distribución (Hoyos et al., 2014).

Es importante destacar la excelente relación costo/beneficio de la Raspberry Pi, así como su flexibilidad y la posibilidad de adecuación tanto a nivel hardware como software de acuerdo a las específicas necesidades del usuario. Además, se puede utilizar para diversas aplicaciones como la domótica y control o como una diminuta computadora personal.

En cuanto al lenguaje de programación, se decidió utilizar Python, como lenguaje de alto nivel, para garantizar la portabilidad del código a distintas plataformas y la legibilidad de dicho código, lo que posibilita la colaboración del equipo. El lenguaje de programación Python nació como una herramienta para la enseñanza de la programación, sin embargo fue adoptado para el desarrollo de software en general alcanzando su auge en los últimos años. Es un lenguaje multiparadigma, es decir, se pueden utilizar varios estilos de programación: orientada a objetos, programación imperativa y programación funcional.

El programa de control de mediciones, desarrollado en Python, emplea las siguientes librerías siguientes:

- Time y OS para el control del reloj.
- RPi.GPIO para el control de los sensores.

Este programa fue diseñado para alojar los datos tanto en una memoria USB como en la memoria interna de la Raspberry Pi. Esta característica, simplifica la portabilidad de los datos evitando el ingreso a la microcomputadora mediante ssh.

Los archivos de medida tienen formato de tabla con cuatro columnas divididas por comas tal como se observa en la tabla 1.

Fecha	Hora	Temperatura Sensor 1	Humedad Sensor 1	Temperatura Sensor 2	Humedad Sensor 2
Dia.mes.año	Hora.minutos. segundos	Decimales separado por coma	Decimales separado por coma	Decimales separado por coma	Decimales separado por coma

Tabla 1. Formato de los archivos de medida generados por Raspberry Pi

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la construcción de la curva de secado de banana se obtuvo la que se observa en la figura 7 mediante la cual se pudo estimar que el proceso de secado de la muestra de 300,5 gr debiera alcanzar los 85,34 gr para considerar el deshidratado óptimo en cuanto a la humedad que debe tener la banana para poder ser conservada. El peso final de la muestra fue de 84,8 gr considerándose exitoso el proceso.

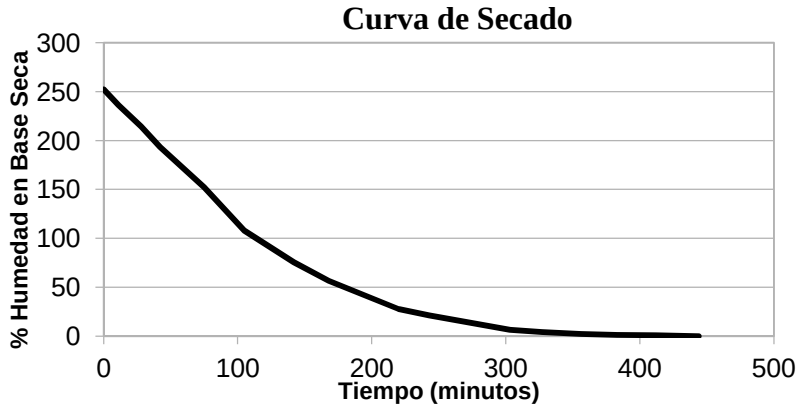


Figura 7. Curva de secado de la banana

El proceso total duró aproximadamente 38 horas, estuvo fuertemente condicionado por el hecho que al segundo día se nubló, durante el cual si bien el producto disminuyó 0,2 gr, permaneció prácticamente estable en cuanto a sus condiciones de humedad. La radiación disponible durante todo el proceso se puede ver en la figura 8, donde se ve claramente la disminución durante el segundo día del proceso.

Obtenidos los datos experimentales, los mismos fueron cargados dentro del diagrama realizado en DIA como se observa en las figuras 9 y 10 donde se pueden ver las tablas construidas para la simulación.

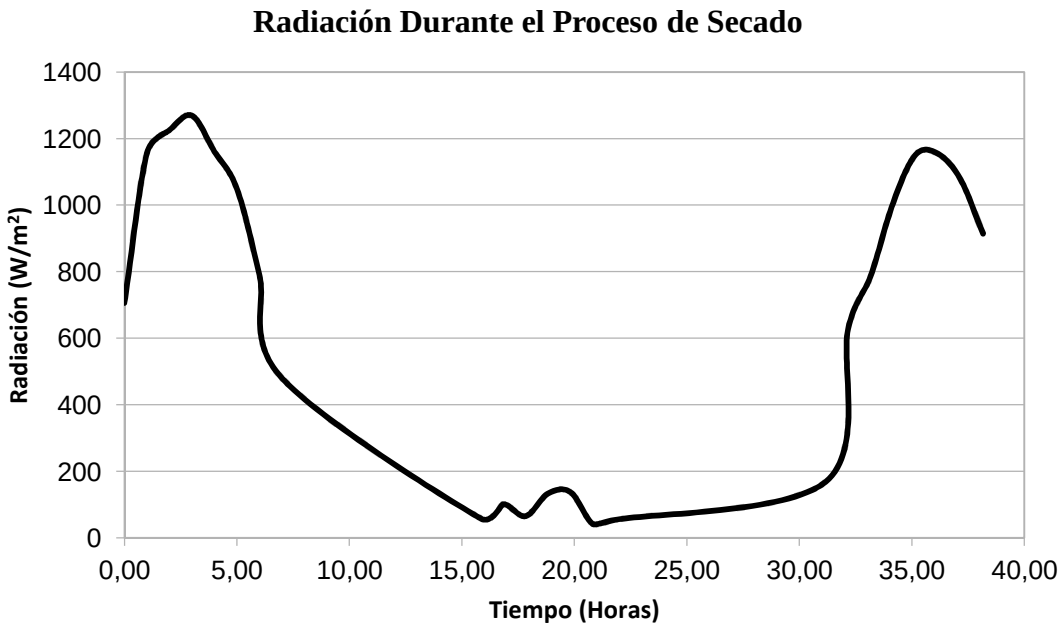


Figura 8. Radiación medida durante el proceso de secado.

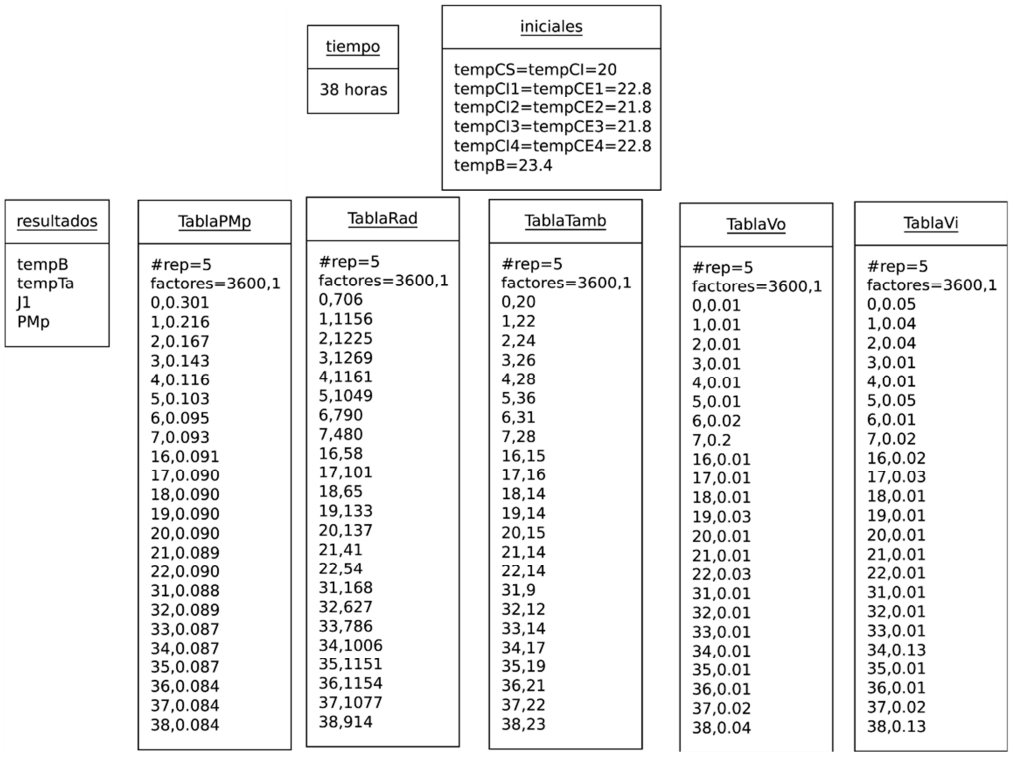


Figura 9. Tablas de parámetros y datos

parametros

```
#áreas
Pa1 =0.42 #area1
Pa2=0.105 #area2
Pa3=Pa4=0.21 #area34
Pa5=0.67 #areacub
Pa6=0.63 #areaband
Pes=0.02 #espesor laterales
Pesc=0.004 #esp cubier
Pess=10 #espsuelo

#Volumenes y masas
Pv1=Pa1*Pes
Pv2=Pa2*Pes
Pv3=Pv4=Pa3*Pes
Pv5=Pa5*Pesc #cubierta
PM1=Pv1*Pdens
PM2=Pv2*Pdens
PM3=PM4=PV3*Pdens
PM5=0.536 #masacubierta
Pdens=640
PMp=TablaPMp(tiempo) #0.5
Pcpm= 1170 #cpmadera
Pcpp= 3350  #cppolic
Pcp=4184

#Resistencias convectivas
Phca1=5.8+2.8*Pwa1
Phca2=5.8
Phca3=5.8+2.8*Pwa3
Phca4=5.8
Phc1=5.8+2.8*Pw1
Phc2=5.8+2.8*Pw2
Phc3=5.8+2.8*Pw3
Phc4=5.8+2.8*Pw4
Phcp1=5.8+2.8*Pwp1
Phcp2=5.8+2.8*Pwp2
Phcp3=5.8+2.8*Pwp3
Phcp4=5.8+2.8*Pwp4
Pc1=5.8+2.8*Pwpi1
Pc2=5.8+2.8*Pwpi2
Phcis=5.8+2.8*Pwis
Phcii=5.8+2.8*Pwii
Phca=5.8+2.8*Pwa
Phcc1=5.8+2.8*Pw1
Phcc2=5.8+2.8*Pw2
Pc3=5.8+2.8*Pw3
Pc4=5.8+2.8*Pw4
Pw1=Pw2=Pw3=Pw4=Pwp1=Pwp2=Pwp3=Pwp4=Pwpi1=Pwpi2=Pwis=Pwii=TablaVi(tiempo) #0.45
Pwa=0.37
Pwa1=TablaVo(tiempo) #0.29
Pwa3=TablaVi(tiempo) #0.45

#Conductividades
Pkm=0.094  #cmadera
Pkp=0.23 #cpolicar
Pks=5 #csuelo

#Emisividades
Pepo= 0.90#Policarbonato
Pep=0.5 #Productoinventado
Pec=0.28 #Chapa
Pem= 0.82#Madera

#Fuente de Calor
PJ=TablaRad(tiempo) #*Ptr

#Temperaturas
Ptaa=TablaTamb(tiempo) #Provisorio
Ptas=18.2

#transmitancia policarbonato
Ptr=0.7

#temperaturas iniciales
Ptin=20
```

datos

```
#masas
CMaa=CMab=C1, Pcpp, PM5/2
CM1a=Cm1b=C1, Pcpm, PM1/2
CM2a=CM2b=C1, Pcpm, PM2/2
CM3a=CM3b=C1, Pcpm, PM3/2
CM4a=CM4b=C1, Pcpm, PM4/2
CMb=C1, Pcp, PMp

#Resistencias convectivas
Rhca=V1, Pa5, Phca
Rhca1=V1, Pa1, Phca1
Rhca2=V1, Pa2, Phca2
Rhca3=V1, Pa3, Phca3
Rhca4=V1, Pa4, Phca4
Rhcc1=V1, Pa1, Phcc1
Rhcc2=V1, Pa2, Phcc2
Rhcis=V1, Pa5, Phcis
Rhc1=V1, Pa1, Phc1
Rhc2=V1, Pa2, Phc2
RC1=V1, Pa6, Pc1
RC2= V1, Pa6, Pc2
Rhc3=V1, Pa3, Phc3
Rhc4=V1, Pa4, Phc4
Rhcp1=V1, Pa1, Phcp1
Rhcp2= V1, Pa2, Phcp2
Rhcp3= V1, Pa3, Phcp3
Rhcp4=V1, Pa4, Phcp4
Rhcii=V1, Pa6, Phcii
RC3=V1, Pa3, Pc3
RC4=V1, Pa4, Pc4

#Resistencias radiativas
Rhra=R1, Pa5, 0.9, 1
Rhris=R1, Pa6, 0.9, 1
Rr1=R1, Pa6, 0.5, 1
Rr2=R1, Pa6, 0.5, 1
Rhrii=R1, Pa6, 0.28, 1
Rhr1=R1, Pa1, 0.82, 1
Rhr2=R1, Pa2, 0.82, 1
Rhr3=R1, Pa3, 0.82, 1
Rhr4=R1, Pa4, 0.82, 1
Rhra1=R1, Pa1, 0.82, 1
Rhra2=R1, Pa2, 0.82, 1
Rhra3=R1, Pa3, 0.82, 1
Rhra4=R1, Pa4, 0.82, 1

#Resistencias conductivas
Rkc=D1, Pa5, Pesc, Pkp
Rk1=D1, Pa1, Pes, Pkm
Rk2=D1, Pa2, Pes, Pkm
Rk3=D1, Pa3, Pes, Pkm
Rk4=D1, Pa4, Pes, Pkm
#Rks=D1, Pa6, Pess, Pks

#Flujo de Calor
J1= JQ, Pa5, PJ

#Temperaturas
Eaa=E1, Ptaa
#Eas=E1, Ptas
```

Figura 10. Tablas para simulación construidas a partir de los datos obtenidos experimentalmente

Se observa en la figura 11 las curvas obtenidas de la evolución de la temperatura en la zona de la bandeja donde se encuentra el producto. Se graficaron la curva obtenida de los datos medidos mediante las Raspberry Pi y aquellos generados a partir de la simulación empleando SIMUSOL, así como la evolución de la temperatura ambiente durante el proceso de secado. Se puede observar un muy buen ajuste entre los datos medidos y los obtenidos con SIMUSOL esto corroborado a su vez a partir del cálculo de RMSE el cual dio un 8% y el del MBE del -4%, resultados que evidencian un muy buen ajuste por parte de la simulación.

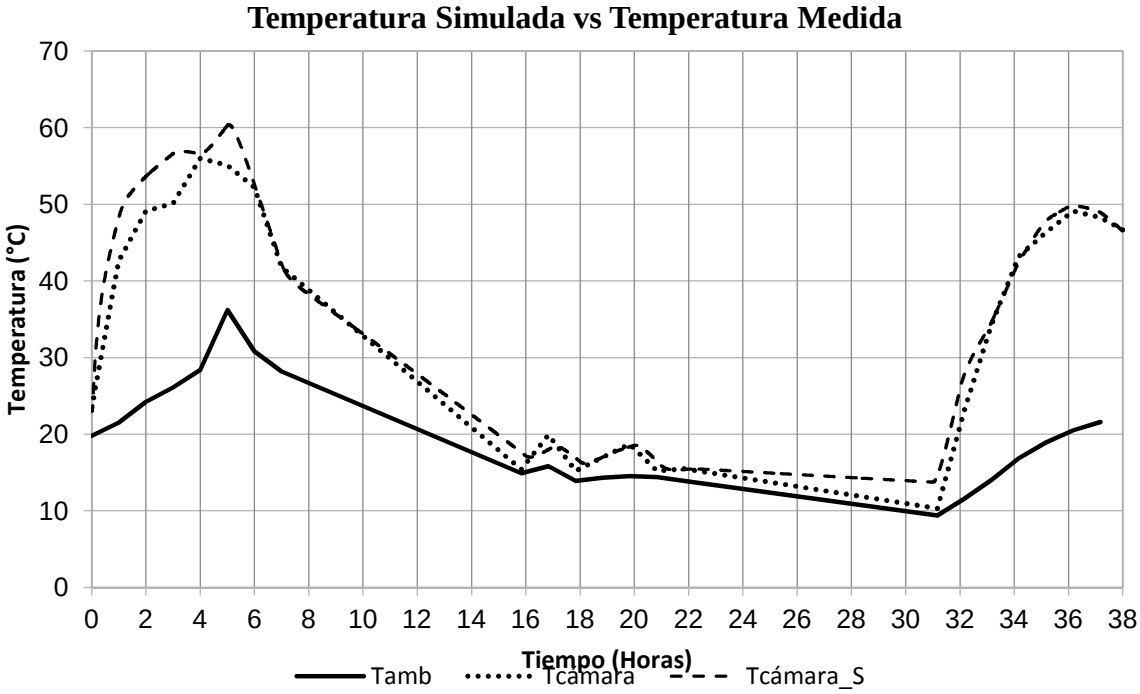


Figura 11. Curvas de la evolución de la temperatura en la zona de la bandeja del deshidratador obtenidas a partir de los datos medidos (Tcámara) y los simulados (Tcámara_S). Evolución de la temperatura ambiente (Tamb)

Finalmente se puede observar en la figura 12 el coeficiente de determinación calculado para la temperatura de la cámara simulada vs la temperatura de cámara medida siendo R^2=0,9828, respaldando nuevamente los buenos resultados obtenidos de la simulación.

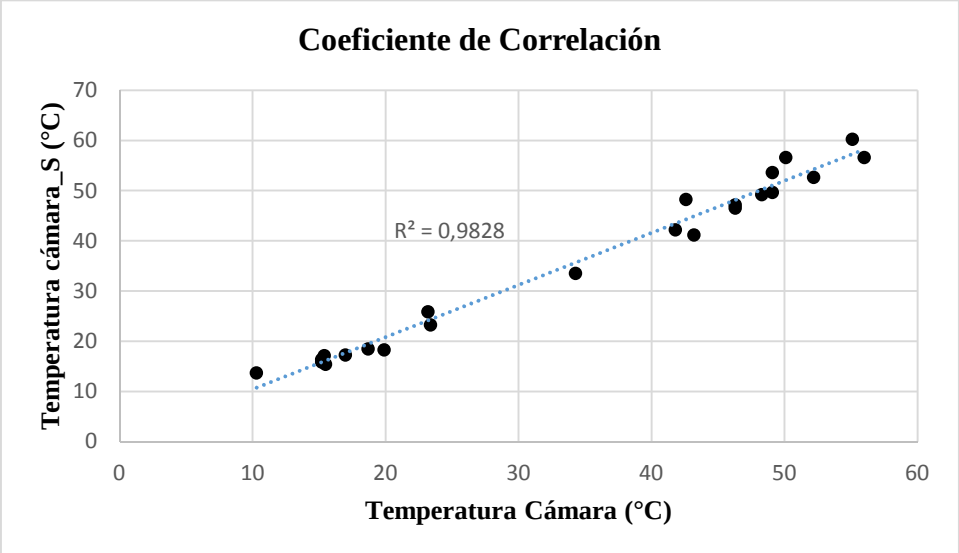


Figura 12. Coeficiente de correlación entre la evolución de la temperatura de la cámara medida y la simulada

CONCLUSIONES

Los primeros resultados evidencian que en general el modelo de simulación propuesto funciona adecuadamente y permite continuar trabajando sobre el mismo para incorporar aquellos ajustes pendientes.

El empleo de SIMUSOL resulta una muy buena herramienta para la simulación de circuitos térmicos, el cual permite prever con gran precisión como repercutirán sobre la eficiencia distintas modificaciones que se realicen sobre equipos en cuestión además del ahorro de recursos que su uso implica.

La toma de medidas utilizando microcomputador como las Rrasberry Pi permite la automatización de la toma de datos y la generación de un registro de parámetros mucho más completo lo que mejora considerablemente el análisis y el seguimiento de los equipos durante su funcionamiento.

Queda pendiente el profundizar y seguir ajustando el modelo aquí propuesto, sería interesante en una próxima instancia el realizar la simulación en las tres dimensiones.

REFERENCIAS

Espinoza R. y L. Saravia. (2010). Secado Solar de Productos Agroalimentarios en Iberoamérica. Red Iberoamericana de Secado Solar de Productos Agroalimentarios (RISSPA). CYTED.

Hoyos D, Moya T., Villena M. y Serrano V. H (2014). Sistema de monitoreo y control remoto para un generador de electricidad con un concentrador Fresnel. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 18, pp.08.69-08.78.

Raichijk C. (2009). Comparación de valores satelitales de irradiación solar global con datos de tierra en la República Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 13, 2009. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

Salvo A. W, Franco J. y Pais. A (2017). Incorporación de valor agregado a la producción frutícola de la región subtropical de la provincia de Salta y Jujuy con utilización de energías renovables. ASADES 2017 - XL REUNIÓN DE TRABAJO - SAN JUAN.

Yahia E. M. y Flores R. A. (2001). Tratamientos físicos en poscosecha de fruta y hortaliza.

ABSTRACT:

This article presents experimental and simulation results of a direct passive solar dryer. A direct-box dehydrator was built and tested under real operating conditions for the drying of bananas. The measurement of the experimental parameters was automated using a Raspberry Pi device built and programmed for this purpose. It was simulated in SIMUSOL and the model was developed in free software DIA. A very good fit between the measured data and that achieved with SIMUSOL was obtained. The first results show that in general the proposed simulation model works properly and allows us to continue working on it to incorporate those pending adjustments.

Keywords: Solar drying of bananas, passive dehydrator, simulation, passive solar dryer, SIMUSOL.