



**XL** Semana Nacional de  
Energía Solar 2016  
17 AL 21 DE OCTUBRE  
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO  
¡OH TIERRA DEL SOL!  
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"



## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO

**David Gudiño Ayala**

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales  
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO),  
Periférico Sur Manuel Gómez Morín # 8585, Tlaquepaque, Jalisco, CP 45090, México,  
Teléfono: 3669-3506, Fax: 3669-3505, [dgudino@iteso.mx](mailto:dgudino@iteso.mx)

### RESUMEN

Se presentan los resultados del estudio del comportamiento térmico de un sistema de secadores solares híbridos sin carga de producto a secar, tanto para la etapa o rampa de calentamiento como para la etapa de operación normal donde la temperatura permanece estable. El sistema consta de dos secadores solares tipo charola integrados (dimensiones 0.61x1.22x0.095 m) y un calentador de gas doméstico. En el fondo de la charola hay un serpentín de cobre por donde se hace circular agua caliente (80°C) para ayudar al proceso de secado.

El estudio consistió en realizar balances de energía para conocer los porcentajes de calor promedio disipados en cada parte del sistema: charolas, conexiones y calentador de gas, usando el sistema a diferentes condiciones ambientales (con y sin radiación solar) y de operación (etapa de calentamiento y de operación normal). La energía aportada provino en ocasiones sólo de la fuente auxiliar de energía (gas LP) a través de un calentador de gas comercial, o de radiación solar en conjunto con la del gas quemado.

Se encontró que el porcentaje de energía disipada en los secadores de charolas (la que ayuda al proceso de secado), respecto a la energía total suministrada por el gas durante la etapa normal de funcionamiento fue del orden de 27% para las pruebas hechas sin recibir radiación solar, y de un 20% para las pruebas con radiación solar. Cuando el cálculo se hizo respecto a la energía transportada por el agua de calentamiento que se usa como medio de transporte de calor del calentador de gas a los colectores, la eficiencia de disipación de calor promedio en los colectores fue del orden del 80% para las pruebas sin radiación solar, y de un 52% para las otras con condiciones solares.

También se obtuvo la eficiencia promedio del calentador de gas durante las etapas de calentamiento y operación normal, y cuando los secadores operaron con y sin radiación solar. Los valores medios de la eficiencia con y sin radiación solar fueron 54% para la etapa de calentamiento y 36% para la de operación normal. La eficiencia fue ligeramente mayor (3 %) cuando el sistema operó recibiendo radiación solar.

### ABSTRACT

The results of the study of the thermal behavior of a hybrid solar drying systems is presented without the load of material to be dried both at the start heating ramp and the normal operation where temperature remains constant. The systems includes two integrated solar tray driers (dimensions 0.61x1.22x0.095 m) and a residential boiler. Below the tray lies a copper coil whereas hot water (80 °C) circulates to speed the drying.

The study consisted on energy balances to determine the average percent of heat dissipated in each part of the system: trays, connections, and boiler using the system at different ambient and operating conditions, energy supplied came only form the auxiliary source (burn LP gas) supplied by the boiler or by solar radiation as well as the gas boiler.

It was found that the percentage energy dissipated on the tray driers (the heat that speeds the drying (respect the total energy supplied by the gas boiler during normal operation) is in the order of 27% for tests without solar radiation and of 20% for tests including solar radiation. When the comparison is in respect of the energy carried by the heating water coming from the gas boiler the efficiency of average dissipated heat on the trays was in the order of 80% for tests without solar radiation and of 52% for the other conditions.

The average efficiency of the boiler for the heating and normal operation was also determined for operation with and without solar radiation. The efficiency values with and without radiation where 54% for the heating step and 36% for normal operation. Efficiency was slightly higher (3%) when the system operated with solar radiation.

Palabras claves: secador híbrido, comportamiento térmico, serpentín cobre, agua caliente, energía disipada, eficiencia boiler

### INTRODUCCIÓN

El uso de secadores solares híbridos, donde además de la energía solar se utiliza otra fuente auxiliar de energía, ofrece una buena alternativa para mejorar el proceso de secado únicamente solar que puede ser llevado a cabo con una gran diversidad de tipos de secadores solares como lo menciona Ekechukwu y Norton (1999). Esto sin duda ya es una ventaja importante cuando se compara contra el secado

tradicional donde el proceso es lento y normalmente carente de condiciones higiénicas (Gudiño, 2007 y Chávez, 2010), pero también es común que, aunque se usen secadores solares simples, el proceso de secado a veces no llega a completarse totalmente en un solo día de Sol, por lo que éste se interrumpe durante la noche para continuar a completar lo poco que hizo falta hasta la mañana del día siguiente, con su consecuente enfriamiento y rehidratación ocurridos durante la noche, lo que contribuye a disminuir la eficiencia del proceso y a incrementar el tiempo total para tener el producto terminado. Aquí es donde el uso de un secador solar híbrido puede ayudar a mejorar el proceso dándole continuidad para terminar el lote iniciado. También podría pensarse en hacer un proceso semi-continuo, donde se incluya el día y la noche para realizar esta tarea, incluso en días nublados, dependiendo de las necesidades del productor.

Como lo mencionan diversos autores, la fuente auxiliar de energía puede ser obtenida de la biomasa (Benon y Fuller, 2002, Madhlopa y Ngwalo, 2007), de energía eléctrica a través de resistencias que calientan el aire de secado (Boughali, *et al*, 2009), de gas LP (López, 2011 y Gudiño y Calderón, 2014) o de energía geotérmica (Casimiro, 1997, Arellano, *et al*, 2008 y Delgado, *et al*, 2013). Respecto al uso del gas LP como fuente auxiliar de energía, existen dos empresas establecidas en la República Mexicana que ofertan secadores híbridos, que además de utilizar un calentador solar para ayudar a calentar el aire de secado, usan gas LP como fuente auxiliar de energía: SAECSA, Energía Solar (Saecsa.com, 2016) y BRETCON, Ingeniería Solar (Bretconenergiasolar.com, 2016).

El estudio de secadores solares híbridos (SSH) en ITESO inició con la caracterización teórico-práctica de un colector solar (Gudiño, 2012) cuyas curvas características de funcionamiento, teóricas y prácticas, mostraron una buena concordancia. La fuente auxiliar de energía utilizada en este trabajo, y en todos los siguientes estudios aquí referidos, proviene de la combustión de gas LP. Este se utiliza para calentar agua en un calentador doméstico, para después hacerla recircular por un serpentín de cobre ubicado en el fondo de la charola que conforma dicho colector solar (secador), para contribuir a mejorar el proceso de secado.

Este mismo colector se analizó por Gudiño y Calderón, 2014, donde el objetivo consistió en hacer comparaciones entre estudiar el secador en modo híbrido (operado con energía solar y gas) y en modo puramente solar, y donde el secador operó en modo directo (la radiación incide directamente sobre el producto a secar) y con una sola capa de producto a secar. En ese estudio se encontró que los tiempos de secado para llegar a un mismo contenido de humedad son en promedio 31 % menores (2 horas menos) cuando el secador operó en modo híbrido, y que las eficiencias de evaporación tienen un comportamiento inverso dado que cuando el secador operó en modo solar fue en promedio casi el doble de eficiente ( $\eta_{evap} = 23.4\%$  modo solar vs  $\eta_{evap} = 13.4\%$  modo híbrido) respecto de la operación en modo híbrido. Esto indica que, aunque el proceso es más rápido cuando se utiliza la fuente auxiliar de energía (modo híbrido), mucho del calor aportado por el agua caliente obtenida por la combustión de gas LP se pierde al medio ambiente y realmente no se aprovecha en el proceso de secado, haciendo que el sistema sea poco eficiente.

Con base en los resultados anteriores, se llevó a cabo otro estudio que implicó la construcción de dos secadores híbridos del mismo tipo, pero donde se incorporaron algunas modificaciones con la intención de aprovechar mejor la energía proporcionada por la fuente auxiliar de energía (gas LP), para mejorar su funcionamiento térmico e intentar incrementar su eficiencia de evaporación (Roldán y Gudiño, 2014). Se utilizaron dos secadores con la intención de hacer pruebas comparativas donde se puedan cambiar las condiciones de operación entre un secador y otro, pero donde ambos operen bajo las mismas condiciones ambientales de radiación solar, humedad relativa y temperatura ambiente. Las modificaciones consistieron en hacer el secador menos largo, pero con capacidad de procesar una doble capa de producto a secar. También se incorporó la opción de utilizar o no utilizar un disipador de calor dentro de la charola para ayudar a transferir calor del agua de calentamiento al aire de secado, de operar los secadores en modo de recepción de radiación solar directo e indirecto, y de operarlos en modo híbrido (energía solar y gas) o modo puramente solar. Aunque hubo una leve mejoría en cuanto a la eficiencia promedio de evaporación, estuvo entre 13 y 15% independientemente del modo de recepción de radiación solar, en general se encontró que estos secadores tienen un comportamiento similar al obtenido en el primer diseño de secador solar híbrido, y que se sigue desperdiciando mucha de la energía aportada por la fuente auxiliar, por lo que se sugirió que el secador se debe seguir estudiando para conocer mejor su funcionamiento, así como las partes o regiones donde se debe mejorar.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo consistió en realizar balances de energía en las diferentes partes del sistema compuesto por los dos secadores solares mencionados en el estudio anterior, con la intención de conocer los porcentajes de energía promedio disipada en cada parte del mismo (charolas, conexiones y calentador de gas) al trabajarlo bajo diferentes condiciones ambientales y de operación, y donde la energía aportada provenga sólo de la fuente auxiliar de energía (gas LP) a través de un calentador de gas comercial doméstico, o de la radiación solar que incide sobre los secadores solares en conjunto con la del gas.

## MÉTODOS Y MATERIALES

El sistema utilizado para llevar a cabo este estudio está conformado por dos secadores solares híbridos (A y B), un calentador doméstico comercial, una motobomba recirculadora de agua caliente y la interconexión entre ellos. Se decidió utilizar el calentador con gas LP como fuente auxiliar de energía que calienta el fluido de trabajo durante todo el proceso de prueba para lograr tener un mejor control de la temperatura de operación y que el estudio fuera más confiable, pero la idea es que a futuro el agua caliente provenga de algún sistema de calentadores solares de agua. Así se propicia más el uso de las fuentes renovables de energía y se reduce al mínimo posible el uso de fuentes de energía derivadas de combustibles fósiles.

### Características de secadores

Las características de los secadores utilizados en este estudio ya han sido descritas en trabajos anteriores presentados en ANES (Roldán y Gudiño, 2014). Cada secador está conformado por una charola de 0.61 m de ancho, 1.22 m de largo y 0.095 m de alto ( $A_c = 0.744 \text{ m}^2$ ). En el fondo de la parte exterior de la charola está unido un serpentín de tubo de cobre flexible de 12.7 mm de diámetro, por donde fluye agua caliente (80 °C) a razón de 2 LPM en circuito cerrado, que en este caso proviene de un calentador de gas comercial, y que ayuda a mejorar y a dar continuidad al proceso de secado. Cuenta además con una cubierta de vidrio de 4 mm de espesor, aperturas de entrada y salida equivalentes a un medio de la altura total (0.048 m de altura libre), una placa absorbadora entre la cubierta de vidrio y el fondo del secador para hacer un sistema indirecto, aislante térmico de fibra de vidrio en el fondo y partes laterales de cada secador, aislante térmico de espuma de polietileno en toda la instalación hidráulica, y una inclinación de 25 grados al sur para propiciar la convección natural del aire de calentamiento, que en este caso está en contracorriente con el flujo de agua, dado que este último va de arriba hacia abajo en cada secador. Ver figura 1.



Figura 1. Fotografía de sistema de secadores solares híbridos en operación.

### Procedimiento

Las pruebas se llevaron a cabo bajo dos variantes principales: con incidencia de radiación solar más energía proveniente de la combustión de gas LP, y con energía proporcionada únicamente por la fuente auxiliar de energía (gas LP). Esto último con la intención de cuantificar de mejor manera las pérdidas de calor en cada una de las partes del sistema de secadores solares estudiados, dado que esto se torna un poco más complicado cuando el sistema opera bajo condiciones solares donde las variables ambiente pueden ser menos estables.

En cada prueba realizada, primero se procedió a instalar el adquisidor de datos de temperatura y la PC para la captura de los mismos, así como la instalación del piranómetro para medir la radiación solar, cuando procede. Luego se midió la masa inicial de los tanques de gas LP para poder cuantificar la cantidad de gas y energía utilizados en cada etapa de operación (rampa de calentamiento y etapa de operación normal con temperatura estabilizada).

Luego se accionó la bomba de recirculación, se purgó las trazas de aire dentro del sistema, se establecieron los flujos a 2 LPM y, cuando todo estuvo listo, se inició la toma de tiempo de la rampa de calentamiento. Cuando esta terminó por haber llegado a la temperatura de estabilización deseada (80 °C), se hizo cambio de tanque de gas para ahora continuar con la etapa de operación normal (una hora de duración) y poder cuantificar la energía consumida en esta parte. Los datos medidos en cada etapa y prueba son: temperaturas (ambiente, entrada y salida de cada secador, entrada y salida de bomba y boiler), flujos de agua, radiación solar (cuando procede) y masas de gas utilizado por etapa. En la figura 2 se indica la posición de los termopares dentro del sistema, así como los demás aparatos usados. Las masas de los tanques de gas se midieron inmediatamente después de haber terminado cada prueba.

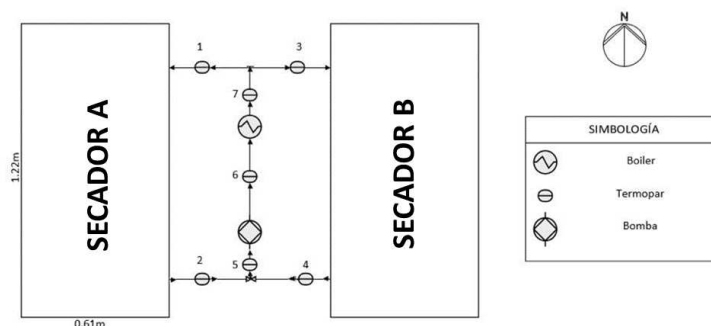


Figura 2. Diagrama del sistema de secadores solares híbridos con ubicación de termopares.

Cuando las pruebas se llevaron a cabo con condiciones solares, se consideró que estas se hicieran alrededor del mediodía solar para asegurar una buena incidencia de radiación solar, mientras que las pruebas con ausencia de radiación solar se realizaron poco después de la puesta del sol, y después de haber mantenido los secadores cubiertos con una capa opaca de fibra de vidrio, de tal manera que la temperatura interna del colector se mantuviera estable, y sin incidencia previa de radiación solar.

Posteriormente se realizaron balances de energía en las diferentes partes que componen el sistema y así se pudieron determinar los porcentajes de calor disipado en cada una de ellas. El balance consistió en hacer cálculos del calor sensible que el flujo de agua gana o pierde en cada elemento, luego se comparó contra la energía aportada, para calcular los porcentajes de disipación de calor. El cálculo de la energía aportada por el gas se obtuvo de multiplicar la masa de gas por su poder calorífico considerado como 49949 kJ/kg (NON-085-ECOL, 1994, 70 % butano-30 % propano), mientras que para la energía solar se multiplicó la irradiancia promedio por el área de colectores.

### Equipos e instrumentos de medición

Los instrumentos de medición utilizados fueron los siguientes: Balanza de 10 kg de capacidad marca ALC para pesar los tanques con gas; piranómetro marca Kipp And Zonen, modelo C3, y sistema de medición de radiación solar modelo CC20, para medir la radiación solar sobre una base con la misma inclinación del secador (25°); rotámetros de polisulfona, con temperatura máxima de operación de 100 °C, demarca Blue and White de 0.5 a 5 LPM y diversas válvulas y conexiones para regular y medir el flujo de agua caliente; termopares tipo T calibrados para medir temperaturas. Estos últimos se encuentran conectados a un registrador USB-TC de 8 canales marca Measurement Computing que envía la señal directamente a una PC, donde mediante los software Instacal y TracerDaq propios para este registrador, se almacena la información para su posterior procesamiento. La velocidad de muestreo fue de 1 dato por minuto.

Otros equipos que conforman el sistema y que permiten su estudio son: bomba recirculadora de agua caliente marca Bell and Gossett, modelo NRF-22, calentador doméstico de paso automático marca Kalotron, modelo KART09, con válvula solenoide para controlar el flujo

de gas al quemador, control automático de temperatura marca GoLink, modelo FY400, que regula dicha válvula solenoide y que permite mantener la temperatura de operación en un valor determinado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron varias pruebas de estudio de los secadores solares híbridos (SSH) durante los meses de octubre a noviembre de 2015, de las cuales solo en 4 se lograron obtener resultados confiables, y son las que se presenta en este trabajo.

### Aportación de energía al sistema

La tabla 1 muestra un resumen de la energía total aportada al sistema de secadores para las 4 pruebas mencionadas. Se muestra la fecha de prueba, la condición en que se llevó a cabo (con y sin radiación solar), la energía aportada por el gas y la energía proveniente de la radiación solar, cuando procede. También se muestra un desglose de la energía aportada en cada etapa: rampa de calentamiento y período de operación normal, donde para esta última etapa la temperatura se mantuvo en aproximadamente 80°C, y el período de duración fue de una hora. También se muestra la temperatura ambiente promedio tenida a lo largo de toda la prueba.

Tabla 1: Resumen de energía total aportada al sistema de secadores híbridos para las 4 pruebas reportadas.

Prueba	Condición	Tambiente °C	Energía de gas LP (kJ)		Energía solar (kJ)		Energía total entregada (kJ)
			Rampa	Op. normal	Rampa	Op. normal	
18/nov/2015	Sin radiación solar	22.4	12237	11588	Np*	Np	23825
19/nov/2015	Sin radiación solar	25.9	14735	10489	Np	Np	25224
19/nov/2015	Con radiación solar	30.7	10739	7243	1567	4611	24160
20/nov/2015	Con radiación solar	30.6	13986	7243	1313	4901	27443

\*No procede

En general se puede observar que la energía total aportada por la combustión de gas es mayor que la energía total proveniente de la radiación solar cuando la prueba se hizo con radiación solar (es en promedio 3.2 veces mayor), que la energía aportada por el gas en la etapa de operación normal es similar a la etapa de rampa de calentamiento cuando la prueba se hizo sin condiciones solares, pero que ésta se reduce casi a la mitad cuando la prueba se hizo con aportación de radiación solar. La otra mitad es aportada precisamente por la radiación solar, haciendo que la energía total entregada al sistema sea similar en todas las pruebas.

También se puede observar que la mayor parte de la energía aportada por el Sol en las pruebas con radiación solar, se da en la etapa de operación normal que duró una hora, siendo 3.3 veces mayor que la energía aportada en la etapa de rampa de calentamiento, que tuvo una duración promedio de 18 minutos.

### Energía disipada por parte del sistema de SSH

Los porcentajes de energía o calor disipado para cada una de las diferentes partes del sistema durante la etapa de operación normal, y respecto a la aportación total de energía suministrada por el gas, o la aportación de energía que logró quedar almacenada como energía interna en el agua a su paso por el calentador, y que denominamos energía o calor transportado por el agua, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Porcentajes de distribución por partes de la energía total aportada por el gas y de la energía que transporta el agua, para la etapa de operación normal. El dato entre paréntesis es la energía, en kJ, correspondiente a cada porcentaje.

Prueba	Condición	Energía de gas LP (kJ)	Energía de agua (kJ)	Respecto a energía de gas (%)			Respecto a energía de agua (%)	
				Secadores	Conexiones	Calentador	Secadores	Conexiones
18/nov/2015	Sin radiación solar	11588	3668	25.7 (2978)	6.0 (695)	68.3 (7915)	81.2 (2978)	18.8 (690)
19/nov/2015	Sin radiación solar	10489	3878	29.1 (3052)	7.9 (829)	63.0 (6608)	78.8 (3056)	21.2 (822)
19/nov/2015	Con radiación solar	7243	2879	20.6 (1492)	19.1 (1383)	60.3 (4368)	51.9 (1494)	48.1 (1385)
20/nov/2015	Con radiación solar	7243	2594	18.5 (1340)	17.3 (1253)	64.2 (4650)	51.8 (1344)	48.2 (1250)

Estos se obtienen del cociente entre el calor disipado y el calor aportado. Entre paréntesis se incluye el dato de energía, en kJ, correspondiente a cada porcentaje disipado, y se observa que aunque los porcentajes disipados en los secadores y conexiones son diferentes

dependiendo del valor al que están referidos, los valores de energía disipada son los mismos para cada parte mencionada. Se muestran sólo los datos de la etapa de operación normal, dado que esta será la etapa de mayor duración dentro de un proceso de secado real. Cabe mencionar que los datos presentados en dicha tabla son datos promedio de todo el período de tiempo utilizado en dicha etapa.

**Respecto a la energía total aportada por el gas.** Como se puede observar de la tabla 2 los porcentajes de energía disipados en los dos secadores respecto a la energía total aportada por el gas no son tan grandes: 27% en promedio para las pruebas hechas sin radiación solar y 20 % para las pruebas donde sí hubo incidencia de radiación solar. Esta disipación de calor en los secadores es la que se pretende ocurra en mayor medida, dado que es la energía que se transfiere al aire de secado y la que realmente se aprovecharía en el proceso de secado. Cabe mencionar que esta energía se disipa prácticamente por partes igual en cada uno de los dos secadores usados (A y B), como se mostrará más adelante. Los porcentajes promedio de pérdidas de calor en conexiones o instalación son de 7 y 18 %, para las mismas condiciones mencionadas. El resto de la energía se disipa en el propio calentador: 66 % en promedio cuando no se usa radiación solar y 62 % cuando sí se usa, lo que hace que éste sea poco eficiente. Se ha observado que cuando el número de secadores por sistema aumenta, se aprovecha de mejor manera la energía aportada por el gas, haciéndolo un poco más eficiente.

Los datos anteriores de calor disipado en los secadores indican que cuando el sistema opera bajo condiciones solares la transferencia de calor del agua de calentamiento hacia el aire de secado se dificulta o disminuye debido a que el aire dentro del secador, y en general todo el secador, se encuentra a una temperatura más elevada por la incidencia de la radiación solar, además de que la temperatura ambiente será mayor que la observada en las pruebas sin radiación solar, lo que también contribuye a una menor transferencia de calor, y provoca que el porcentaje promedio de calor disipado en esta condición donde se recibe radiación solar sea menor (7 % menos).

Por otra parte, los datos de calor disipado en el calentador se pueden utilizar para calcular la eficiencia promedio de calentador por diferencia entre el 100 % de la energía inicial aportada por el gas y el porcentaje total de energía disipada en el mismo calentador.

Haciendo estos cálculos se encuentra que los valores promedio de eficiencia del calentador están entre un 34 % (sin radiación solar) y 38 % (con radiación solar) de eficiencia, para la etapa de operación normal donde la temperatura promedio del agua de calentamiento es de 80 °C. Durante la rampa de calentamiento (datos no mostrados), las eficiencias promedio del calentador de gas son un poco mayores (51 % con radiación solar y 54 % sin radiación solar) debido principalmente a que la temperatura promedio del agua en esa etapa es más baja, y ayuda a que haya menos pérdidas de calor. El valor medio resultante de temperatura de todas las pruebas realizadas en esta etapa de calentamiento, considerado como un promedio entre la temperatura inicial del agua y la temperatura final de estabilización, es 58 °C. Este valor que está 22 °C por debajo de la temperatura de estabilización (80 °C). Cabe mencionar que dicha eficiencia de calentador es ligeramente mayor (3% en promedio) cuando los secadores operaron en condición solar, en cualquiera de las etapas de funcionamiento. La energía solar ayuda un poco a que se gaste menos cantidad de gas en el calentador y a que la energía que este proporciona se aproveche mejor.

El dato de eficiencia que proporciona el fabricante del calentador es de 82 % (DEPSA.com, 2016), pero se tiene que considerar la condición que él maneja: incrementar la temperatura del agua en 25 °C a partir de la temperatura ambiente (25 °C), lo que da una temperatura promedio de operación muy baja (38 °C), que contribuye a incrementar su eficiencia. Sabiendo que en la actualidad el uso de un calentador solar para agua en sustitución de un calentador comercial doméstico es atractivo y rentable, aun con el aliciente de las altas eficiencias que ocurren en las condiciones de hogar mencionadas (bajas temperaturas de operación), resulta pertinente sugerir utilizar calentadores solares de agua en el sistema de SSH para que ayuden en el proceso de secado, donde el calentador de gas es mucho menos eficiente debido a las altas temperaturas de operación que ahí se manejan. Por eso, una de las ideas es que el calentador de gas se use sólo por las tardes para complementar el proceso de secado e incorporar calentadores solares al sistema de secadores solares híbridos, reduciendo a un mínimo el uso de combustibles fósiles. También se puede probar utilizar temperaturas más bajas en el fluido de trabajo, lo que ayudaría a mejorar su eficiencia, pero casi seguro incrementaría los tiempos de secado. Falta hacer pruebas al respecto.

**Respecto a la energía total transportada por el agua.** Considerando ahora los porcentajes de energía disipados en los secadores respecto a la energía almacenada y transportada por el agua que se utilizó como fluido de trabajo, se puede observar de la penúltima columna de la misma tabla 2 que estos valores son mucho más altos que los mostrados anteriormente: 80 % en promedio cuando el sistema operó en condición sin recibir radiación solar, y 52 % para cuando sí recibió dicha radiación solar. El resto, 20 y 48 % de manera respectiva, se disipa en las conexiones del sistema. Esto sin duda es bueno, pero se sigue observando el mismo fenómeno respecto a que el sistema es menos eficiente para disipar calor en los secadores cuando opera en condiciones solares, en parte por las razones ya explicadas respecto a que se dificulta que el agua disipe calor cuando el secador está a una temperatura alta por la incidencia de la radiación solar, y en parte porque se observó que la misma energía solar provoca que la temperatura del agua suba hasta 3 °C por encima de la temperatura de operación establecida (80 °C) generando una mayor pérdida de energía en la instalación. Aunque esta temperatura debió estar controlada por el control automático de temperatura, esto no ocurrió así y provocó el efecto mencionado. También hay que considerar que la cantidad de energía que transporta el agua en esta condición es más pequeña que la transportada cuando no recibe radiación solar (ver columna 4 de tabla 2), y la consecuencia de dividir una cantidad que incrementó su valor (calor perdido en instalación) entre otra que lo disminuyó (calor transportado por agua), provoca que este valor o resultado se incremente sustancialmente. Todo esto sugiere que lo más pertinente para apoyar de mejor manera el proceso de secado va a ser el uso de calentadores solares en sustitución del calentador, que además no es sustentable debido a la quema combustibles fósiles.

### **Presentación gráfica de resultados**

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la prueba realizada sin recibir radiación solar del día 18 de septiembre de 2015, donde se puede apreciar la distribución o disipación del calor aportado por el gas LP (figura 3) y del transportado y almacenado por el agua a su paso por el calentador (figura 4), para cada una de las etapas de funcionamiento. Como se puede observar, aquí se reportan cantidades de energía mostradas entre paréntesis en la tabla 2, y no los porcentajes. El orden de las leyendas de arriba hacia abajo es el mismo que el de las gráficas de izquierda a derecha, empezando por la etapa de calentamiento y terminando con la etapa de operación normal. Los datos de la etapa de calentamiento no se presentan en ninguna tabla.

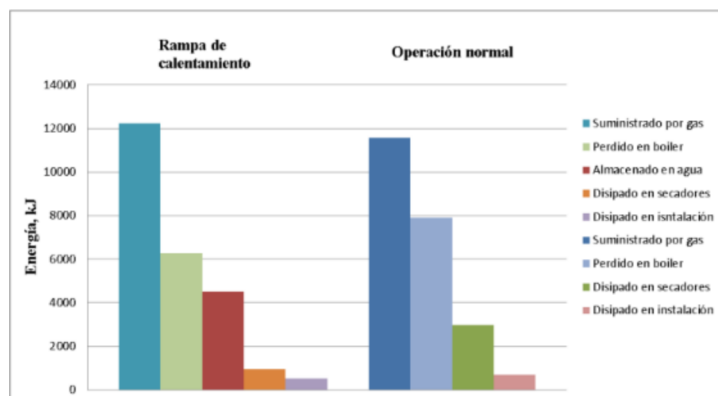


Figura 3. Distribución del calor aportado por la combustión del gas LP. Prueba sin radiación solar, 18/nov/2015.

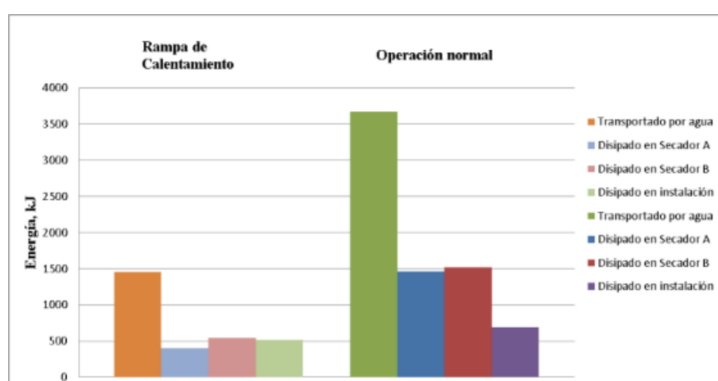


Figura 4. Disipación del calor que el agua gana y transporta a su paso por el calentador de gas. Prueba sin radiación solar, 18/nov/2015.

De la figura 3 se puede observar que durante la etapa o rampa de calentamiento mucha de la energía se utiliza para incrementar la temperatura del agua de calentamiento (tercera barra de izquierda a derecha de la etapa de calentamiento) que inicialmente se encuentra a temperatura ambiente y debe llegar hasta la temperatura de operación normal (80 °C), y queda almacenada como energía interna dentro del agua. Esto a su vez provoca que el calor que se pierde en el calentador de gas no sea tan alto (segunda barra de izquierda a derecha de la misma etapa), como si ocurre en la etapa de operación normal, y que se puede observar en la segunda barra de la etapa de operación normal.

También se observa que el calor disipado en los secadores para la etapa de operación normal está agrupado en una sola barra (tercera de esa etapa), pero su valor equivale a la suma de las dos barras que representan las pérdidas de calor en cada uno de los secadores cuando la pérdida se calcula en base a la energía transportada por el agua de calentamiento, y que se muestran en la figura 4 como secadores A y B.

Graficas similares se pueden obtener para las demás pruebas realizadas. Cuando la prueba utiliza radiación solar y el análisis se hace sobre la energía total aportada al sistema, la primera barra de esta gráfica se tendría que subdividir entre la energía aportada por el gas y la energía aportada por la radiación solar, pero todo lo demás sería similar dado que la suma de estas aportaciones es similar a la que se tiene cuando se usa sólo gas como fuente de energía (ver tabla 1).

## CONCLUSIONES

La energía promedio disipada en los secadores en la etapa de operación normal, respecto a la energía total entregada por la combustión del gas LP, es poca (23.5 %, promedio de las pruebas con y sin radiación solar), comparada con la que en promedio se pierde en el calentador de gas (64 %, misma consideración), debido, entre otros factores, a que este opera con una temperatura alta (80°C), generando grandes pérdidas de calor.

Este porcentaje de disipación de calor en los secadores se incrementa mucho cuando el cálculo se hace respecto a la energía que transporta y almacena el agua de calentamiento, llegando a ser hasta de 80 % cuando no se recibe radiación solar.

La incidencia de la radiación solar en la etapa de operación normal hace que el calor perdido en los secadores disminuya (pasa de 80 a 52 %) debido a que el calentamiento generado por dicha incidencia dificulta la pérdida de calor del agua de calentamiento hacia el aire de secado, y a que el agua termina calentándose más de lo previsto, incrementando así sus pérdidas de calor.

La eficiencia del calentador de gas no mejora mucho (3 %) aun cuando el sistema opera con radiación solar en conjunto con la energía del gas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los alumnos Alonso Villalobos Echevarría y Sergio Garmendia Lemus por su participación en la caracterización de este sistema de secadores solares híbridos. También se agradece al Técnico Russell Segovia Ley por su valiosa colaboración y gran interés mostrados durante el desarrollo de este proyecto.



## REFERENCIAS

- Arellano G.V.M., Iglesias R.E. y García G.A. (2008). La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. Boletín IIE, Tendencias Tecnológicas. [http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-30\\_12-52-09111174.pdf](http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-30_12-52-09111174.pdf); (vi: 16 junio de 2016).
- Benon B. y Fuller R.J. (2002). Natural convection solar dryer with biomass back-up heater. *Solar Energy*, Vol. 72, No. 1, p. 75-83.
- Boughali S, Benmoussa H, Bouchekima B, Mennouche D, Bouguettaia H, Bechki D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar-electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*, Vol. 83, p. 2223-2232.
- BRECTON, Ingeniería solar. Empresa Mexicana dedicada a la energía solar e ingenierías alternas. <http://www.brectonenergiasolar.com/deshidratador.php>; (vi: 16 junio de 2016).
- Casimiro E.E. (1997). Uso de la energía geotérmica para la deshidratación de frutas y legumbres, experiencia en Los Azufres, Mich., México. *Geotermia, Rev. Mex. de Geoenergía*, Vol. 13, No.1, p. 57-59.
- Chávez P.E. (2010). Secado solar de alimentos. Jornada Técnica sobre Assecatge Solar de Material Vegetal. [https://www.ruralcat.net/c/document\\_library/get\\_file?uuid=d65214b8-a03b-428b-8a8d-382a57558aa3&groupId=10136](https://www.ruralcat.net/c/document_library/get_file?uuid=d65214b8-a03b-428b-8a8d-382a57558aa3&groupId=10136); (vi: 16 junio de 2016).
- DEPSA, Desarrollo de Productos S.A. de C.V. Kalotron. (2016). <http://www.depsa.com.mx/pdf/depaso2.pdf>; (vi: 24 de junio de 2016).
- Delgado, E., Barriga, A., Peralta, J. y Aveiga, G. (2013). Utilización de energía solar e intercambiador enterrado como fuente de calor para cámaras de secado. Primer Congreso Internacional y Expocientífica, Guayaquil, Ecuador. [http://iner.ec/congreso/images/documentos/Articulos/ISEREE2013\\_Delgado\\_Em%C3%A9rita.pdf](http://iner.ec/congreso/images/documentos/Articulos/ISEREE2013_Delgado_Em%C3%A9rita.pdf); (vi: 16 junio de 2016).
- Ekechukwu O.V. y Norton B. (1999). Review of Solar Energy Drying Systems II: an Overview of Solar Drying Technology. *Energy Conversion & Management* 40, p. 615-655.
- Gudiño A.D. (2007). Secador Solar Indirecto Tipo Charola para el Secado de Piña. Memorias de la XXXI Semana Nacional de Energía Solar, Zacatecas, Zac., p. 489-494.
- Gudiño A.D. y Calderón T.A. 2014. "Pineapple drying using a new solar hybrid dryer". 2013 ISES Solar World Congress. *Energy Procedia*, Vol. 57, Elsevier, p. 1642-1650. Este artículo tiene libre acceso y derechos de autor, y se puede visualizar en la siguiente liga: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214015227>.
- López V.E.C. (2011). Caracterización y evaluación de la eficiencia térmica y de secado en un deshidratador híbrido (solar-gas). Tesis de Maestría en Ciencias. IPN. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, Oaxaca, México. [http://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/sites/default/files/pdf/tesis\\_erick\\_lopez\\_vidania.pdf](http://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/sites/default/files/pdf/tesis_erick_lopez_vidania.pdf); (vi: 16 junio de 2016).
- Madhlopa A, Ngwalo G. (2007). Solar dryer with thermal storage and biomass heater. *Solar Energy*, Vol. 81, No. 1, p. 449-462.
- SAECSA, Energía Solar. Deshidratador solar SAECSA. <http://saecsa.com/> y <http://saecsaenergiasolar.com/catalogo/deshidratador/>; (vi: 16 junio de 2016).
- NOM-085-ECOL. (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL. Contaminación atmosférica-Fuentes fijas. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4769948&fecha=02/12/1994](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4769948&fecha=02/12/1994); (vi: 25 junio 2016)