

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ACUMULADOR SOLAR TÉRMICO MEDIANTE CAMBIO DE FASE PARA OPTIMIZAR EL SECADO EN UN SECADOR SOLAR

Kléber Janampa Quispe, Octavio Cerón Balboa, Julio Oré García, Oswaldo Morales Morales

Unidad de Investigación e Innovación de Ingeniería de Minas Geología y Civil

Programa de Física Aplicada – Área de Energías Renovables

E_mail: kleber_jq@yahoo.es

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y construye un acumulador solar térmico mediante el principio de cambio de fase para optimizar el secado de productos de consumo familiar en un secador solar; el material de cambio de fase utilizado fue la parafina (cera) por sus propiedades térmicas y temperatura de fusión que se encuentra en torno a la temperatura de operación de un secador solar que es de 53 °C. El sistema acumulador incorporado en el secador dispone unidades modulares de doce cilindros de aluminio reciclados obtenidos del recipiente de bebidas gaseosas. Cada cilindro se llena con parafina, en cuyo interior se incorporaron aletas conductoras térmicas, lo que permite el flujo de calor al exterior. Como resultado se ha mejorado la inestabilidad de la disponibilidad de la energía solar y se ha logrado aumentar el tiempo de secado en un orden de 2 h sin intervención de la radiación solar, con una temperatura del aire mayor a 30 °C previamente sometido a una radiación solar media de 533 W/m².

Palabras clave: Acumulador térmico, material de cambio de fase, secador solar.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THERMAL SOLAR ACCUMULATOR THROUGH PHASE CHANGE TO OPTIMIZE DRYING IN A SOLAR DRYER

ABSTRACT

In the present work, a solar thermal accumulator is designed and built using the principle of phase change to optimize the drying of products for family consumption in a solar dryer; The phase change material used was paraffin (wax) for its thermal properties and melting temperature that is around the operating temperature of a solar dryer that is 53 °C. The accumulator system incorporated in the dryer has modular units of twelve recycled aluminum cylinders obtained from the gaseous beverage container. Each cylinder is filled with paraffin, inside which thermal conductive fins were incorporated, which allows the flow of heat to the outside. As a result, the instability of the availability of solar energy has been improved and the drying time has been increased by an order of 2 h without the intervention of solar radiation, with an air temperature greater than 30 °C previously subjected to radiation average solar of 533 W/m².

Keywords: Thermal accumulator, phase change material, Solar dryer.

INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de la energía solar, tiene entre sus mayores limitaciones la disponibilidad de energía intermitente que genera un rendimiento inestable y diseños poco confiables sobre todo en el horario nocturno (Escobar-Ochoa, et al 2017). Por lo que es necesario generar alternativas que permitan alargar el proceso de secado durante horas que no hay incidencia de la radiación solar acumulando la energía durante las horas de sol. Los acumuladores solares térmicos se presentan como una alternativa para contrarrestar la inestabilidad temporal de la disponibilidad energética solar. Los acumuladores que actualmente genera mayor interés son los acumuladores que utilizan materiales de cambio de fase (PCM), donde se almacena la energía solar térmica durante el cambio de fase de ese material en forma de calor latente del fusión, estos acumuladores presentan una mayor densidad energética térmica acumulada en comparación a los acumuladores de calor sensible, a su vez presenta mayor estabilidad en la temperatura. Un material que abunda en nuestra localidad muy utilizado tradicionalmente es la parafina, cuyas propiedades térmicas son apropiadas para ser utilizadas como material de cambio de fase a temperaturas del orden de 53 °C a 61 °C (Campos et al, 2014) que corresponde a su temperatura de fusión; esta temperatura

corresponde a los valores apropiados del aire para la optimización del secado en horas adicionales a partir de momento que se interrumpe la radiación solar directa incidente sobre el secador.

En el presente trabajo se ha diseñado y construido un sistema de almacenamiento de energía térmica solar para optimizar el proceso de secado en un secador solar de uso familiar; el sistema dispone como unidades modulares, de doce cilindros de aluminio reciclados obtenidos del recipiente de bebidas gaseosas, estas unidades se encuentran espaciados simétricamente. Cada cilindro está lleno de parafina como material de cambio de fase. Para mejorar la transferencia de calor de la parafina al aire exterior, dado que la conductividad térmica de la parafina es menor, se ha dispuesto al interior un mallado de aluminio que tiene aletas conectando el interior del cilindro hacia el exterior. Se ha logrado aumentar el tiempo de secado en un orden de 2 h con una temperatura del aire del orden de 30 °C, para una radiación solar de 533 W/m².

Por otro lado, el presente trabajo se desarrolla dentro del marco de colaboración con el proyecto trianual 2015-2018 “La Energía Solar, Irradia Calor Para Alimentarnos” conjuntamente con El Comité Régional D'éducation Pour Le Développement International De Lanaudière (CREDIL –

JOLIETTE) Canada y la Red Ecologica Interinstitucional Hatun Sacha (REIHS). Asimismo este trabajo está en concordancia con los objetivos de la Asociación Peruana de Energía Solar y del Ambiente (APES), del cual somos socios activos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Método

Se ha utilizado la parafina (cera) como material de cambio de fase, dado que la conversión del estado sólido a líquido de la parafina tiene alto calor de fusión y su punto de transición de fase está en torno a la temperatura de operación de un secador solar de productos.

Para el diseño del acumulador de cambio de fase:

- Se caracteriza las propiedades térmicas del PCM seleccionado.
- El acumulador se basa en el principio de acumulación por calor latente e intercambiadores de calor.
- El dimensionamiento geométrico del sistema se caracteriza por ser modular y con materiales reciclados.

Para el secador solar:

- Se dimensiona sobre la concepción de secador solar familiar, que aprovecha la energía solar de modo directo e indirecta mediante flujo por efecto de gradiente de temperatura (pasivo y mixto).
- Se define la estructura y morfología del secador solar de manera que acondicione el óptimo funcionamiento del acumulador de cambio de fase.
- Se evalúa y optimiza los parámetros térmicos de funcionamiento del secador solar de cambio de fase:

Protocolos.

Materiales e Instrumentos

Para la construcción de un secador solar se ha utilizado madera prensada, aluminio anonizado, vidrio, estructura metálica. Para el sistema acumulador térmico, latas de aluminio reciclado, cera y pintura negra. Para la evaluación térmica se ha utilizado los siguientes instrumentos: Radiómetro: UNI-100 mV 1000 W/m², con lectura mínima de 10 W/m²; Anemómetro digital de copas giratorias de lectura mínima de 0.5 m/s; Data Logger de temperatura marca EBRO EBI 40 con sensibilidad de 0.1° C; Multímetro Fluke 179, sensibilidad voltaje: 0.01 V, intensidad de corriente: 1 mA; Medidor de conductividad térmica KD2 Pro y otros accesorios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. SECADOR SOLAR

1.1. Dimensionamiento del Secador Solar Mixto

Para dimensionar el secador solar se tomó en cuenta el contenido en base humedad del producto, la masa seca que corresponda a las condiciones climáticas del lugar. Del mismo modo para el dimensionamiento energético y dimensiones geométricas del secador se partió de la condición de un secador familiar, que permita secar productos en escala familiar, por ejemplo, secar papa, maíz, lúcuma, plantas aromáticas, etc. Para este trabajo se toma como referencia el secado de 1.5 kg de lúcuma. Por otro lado, se ha tenido en cuenta que la temperatura del aire para un mejor secado es de 40 a 70 °C (UNESCO, 2005).

Tabla 1. Dimensionamiento del secador solar mixto.

Características	Símbolo	Valor
Peso del material sin secar (kg)	W _o	1.500
Humedad en base húmeda inicial (kg agua/kg prod hum)	M _{wb1}	0.667
Humedad en base húmeda final (kg agua/kg prod hum)	M _{wb2}	0.093
Peso de la materia seca en el producto (kg)	W _d	0.503
Humedad en base seca inicial (kg agua/kg prod.seco)	M _{db1}	2.004
Humedad en base seca final (kg agua/kg prod.seco)	M _{db2}	0.102
Tiempo (s)	t	5
Cantidad de agua retirada (kg agua/h)	W _a	0.190
Temperatura ambiente (°C)	T _a	24.000
Temperatura del aire de salida (°C)	T _s	50
Humedad absoluta del aire; entrada (g/m ³)	w ₁	0.0144
Humedad absoluta del aire; salida (g/m ³)	w ₂	0.0185
Consumo de aire seco (kg/h)	m _a	46.318
Entalpía del aire: entrada (kJ/kg)	h ₁	82
Entalpía del aire: salida (kJ/kg)	h ₂	98.6
Energía consumida (kJ/h)	Q _a	768.9
Radiación solar (W/m ²)	I _h	700
Radiación solar efectiva (W/m ²)	I _e	280
Radiación solar efectiva (KJ/hm ²)	I _e	1008
Área requerida (m ²)	A	0.76

La cantidad de agua que se requiere retirar del producto en este caso elegido la fruta como la lúcuma, se obtienen de:

$$W_a = \frac{W_o \left(\frac{M_{wb1} - M_{wb2}}{1 - M_{wb2}} \right)}{t} = W_d (M_{db1} - M_{db2}) / t$$

El consumo de aire seco, necesario es:

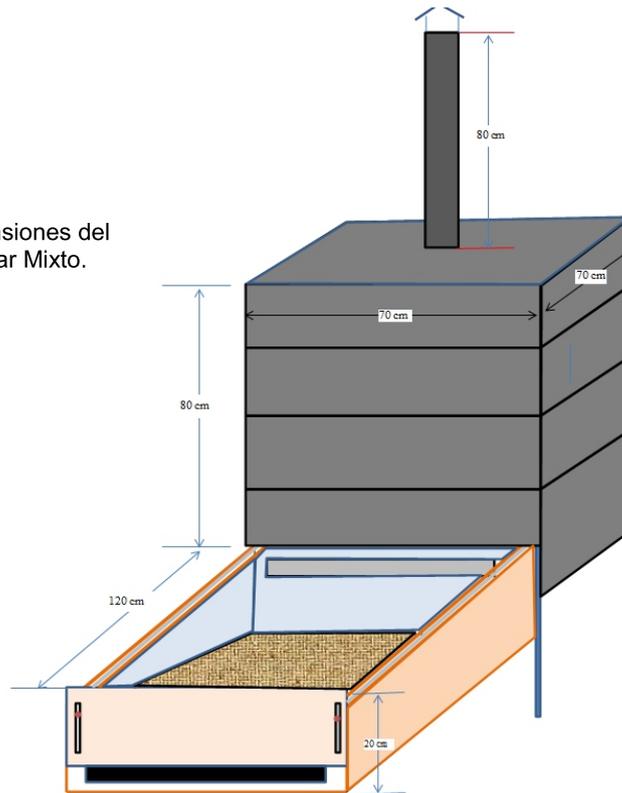
$$m_a = \frac{W_a}{w_2 - w_1}$$

La energía consumida en el proceso por hora es de:

$$Q_a = m_a (h_2 - h_1)$$

1.2. Diseño y Construcción del Secador Solar Mixto

Fig.1. Dimensiones del secador solar Mixto.



Este diseño consta de:

- Colector solar plano que incorpora una placa metálica negra y que sobre ella se coloca una parrilla como bandeja para el secado directo de productos como frutos. Está con doble cubierta de vidrio (secador solar mixto pasivo).
- Una cabina para secado indirecto de productos como

plantas aromáticas, papa, etc. En ella se disponen las bandejas en niveles para optimizar el secado con el flujo de aire que ingresa por la base de la cabina.

- Tiro. Para la salida del aire húmedo se utiliza un tubo que optimice el flujo del aire del interior al exterior, por el efecto de gradiente de temperatura y el efecto Venturi.

Fig.2. Secador solar Mixto construido en funcionamiento.



1.3. Diseño de Acumulador Cambio de Fase

La unidad básica del acumulador se comporta como un intercambiador de calor entre el material PCM y el aire. Tiene la forma cilíndrica de 2.7 cm de radio y 430 cm³ de volumen y está llena de parafina como material de cambio de fase. Dado que la conductividad térmica de la parafina es de 0.2 W/m°C (Vidal, 2007) que no facilita la

conducción térmica a través de la cera, se construye una malla metálica de aluminio de manera que une el interior de la cera con la superficie del cilindro para mejorar el proceso de conducción térmica. Al absorber calor la cera va acumulando la energía térmica hasta cambiar de fase.

Unidad del acumulador de cambio de fase:

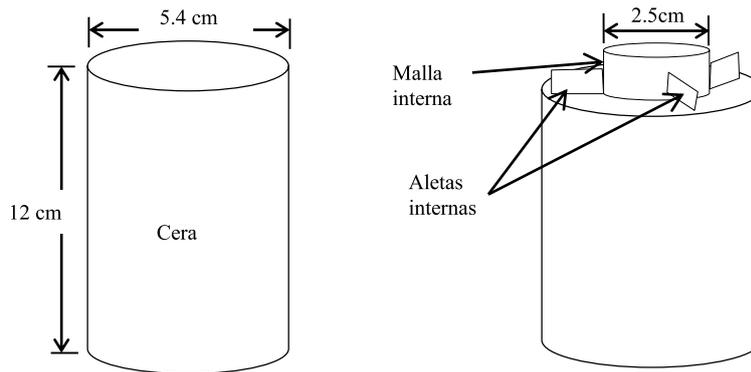


Fig. 3. Dimensiones y estructura de los dos prototipos de unidades de acumulación cilíndrica de aluminio.

Sistema de acumulación térmica con PCM de parafina.

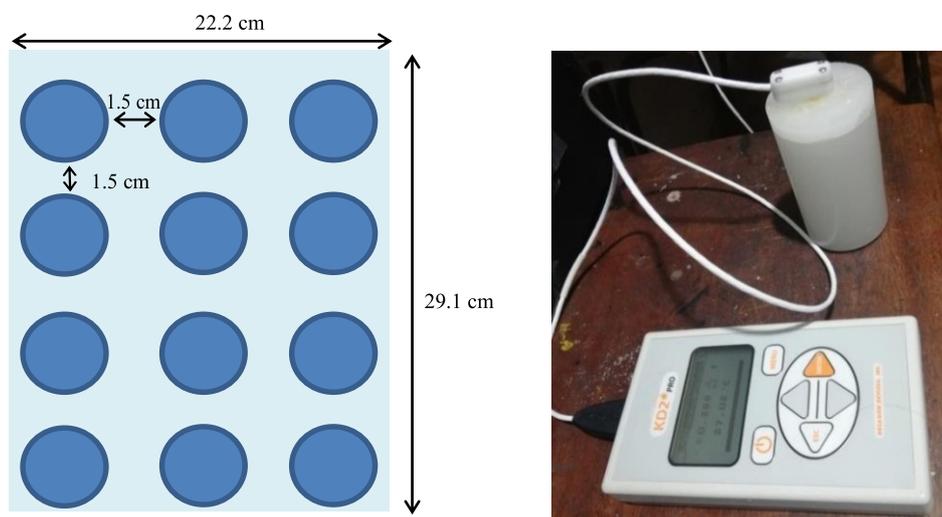


Fig.4 Medida de la conductividad térmica de una muestra de parafina y al lado derecho la distribución de estas unidades del sistema de acumulación térmica: vista superior.

1.4. Parámetros de la Parafina Calculados

Tabla 2. Densidad de la parafina comercial.

	Fase sólida	Fase líquida (70°C)
m (g)	220.92	220.92
h (cm)	9.8	11.2
r (cm)	2.86	2.86
V (cm ³)	251.82	287.80
ρ (g/cm ³)	0.877	0.768

Tabla.3. Medida de la conductividad térmica de la parafina (k) y resistividad térmica (ρ_r) Sensor KS1.

k (W/m K)	ρ_r (°C cm/W)	T (°C)	Err
0.192	506.4	23.08	0.0012
0.194	516.7	21.11	0.0017
0.193	518.2	20.24	0.0012
0.193	519.2	20.04	0.0012
0.193	519.1	20.050	0.0013
0.192	521.3	20.12	0.0013
0.192	521.8	20.22	0.0013
0.192	520.5	20.29	0.0011
0.193	517.9	20.64	0.0013

De manera que la conductividad térmica de la muestra de parafina comercial es de

$$k = (0.193 \pm 0.01) \frac{W}{mK}$$

Tabla 4. Medida del calor específico volumétrico (C) y difusividad de la parafina (D). Sensor SH1.

D(mm ² /s)	C (MJ/m ³ K)	T (°C)	Err
0.157	1.852	25.74	0.0012
0.159	1.823	25.05	0.0013
0.162	1.783	24.06	0.0012
0.164	1.748	23.28	0.0012
0.159	1.717	24.15	0.0013
0.164	1.738	23.21	0.0012
0.165	1.723	22.71	0.0012
0.167	1.704	22.17	0.0011
0.162	1.761	23.80	0.0012

Resultando que la difusividad térmica de la parafina comercial es de:

$$D = (0.162 \pm 0.016) \frac{mm^2}{s} \text{ y el calor específico volumétrico: } C = (1.761 \pm 0.176) \frac{MJ}{m^3K}$$

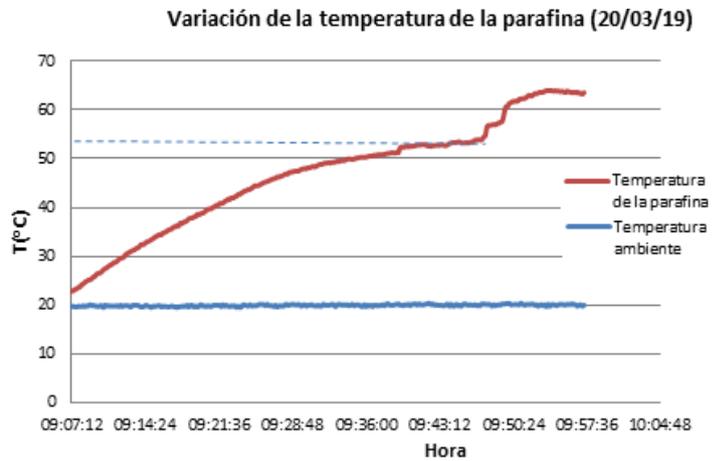


Figura 5. Arreglo experimental y la Curva de calentamiento de la parafina de 11.18 g, para determinar la temperatura de fusión de la muestra.

Utilizando la curva de calentamiento de la parafina de 11.18 g, se determina la temperatura de fusión de la parafina comercial que está en el orden de 53°C como se puede ver en la figura 5 y 6.

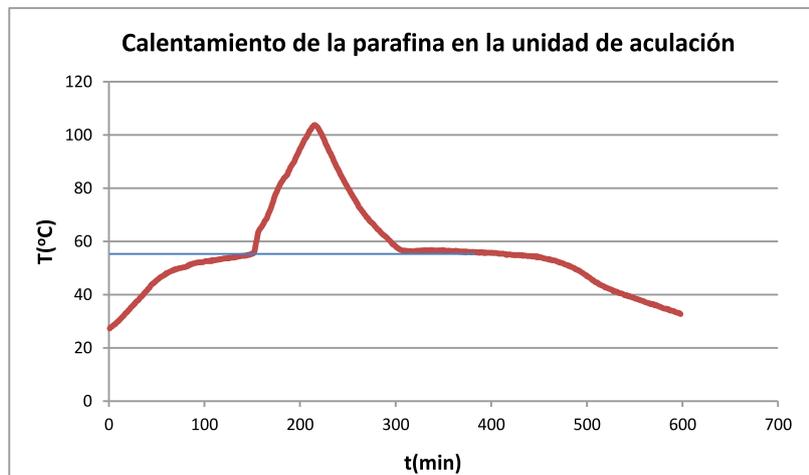


Figura 6. Curva de calentamiento y enfriamiento de la parafina en el interior de la unidad de acumulación con aletas o malla metálica.

1.5. Acumulador de Cambio de Fase y Parámetros Térmicos

Se ha construido dos modelos de unidades de acumulación, el primero que fue llenado completamente de parafina en tanto que el otro además de la parafina

tiene una malla metálica ubicada concéntricamente en la lata. Los dos prototipos se colocaron en agua hirviendo a 90-91°C en Ayacucho, luego se registró la curva de enfriamiento de cada prototipo.

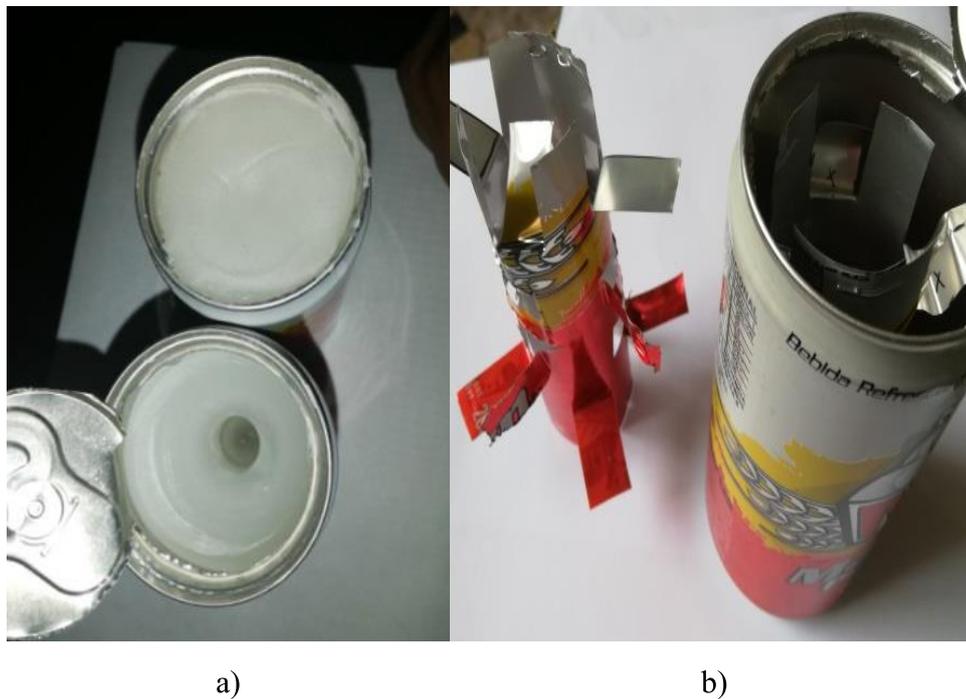


Figura 7. Prototipos de unidades de acumulación (a) llenado sólo con parafina (b) llenado con parafina y malla metálica de la lata de aluminio.

Las figuras 8 y 9 muestran que el prototipo que dispone la malla metálica se enfría más rápido que el que contiene sólo la parafina, ello debido a que la malla metálica aumenta la conductividad térmica del interior al exterior del cilindro lo que facilita mejor transferencia de calor al aire circundante.

El sistema de acumulación que consta de 12 unidades cilíndricas, que se ubican sobre una placa metálica en el colector del secador solar, distribuyéndolas simétricamente a 1.5 cm de cada una en 3 columnas por 4 filas (figura 10).

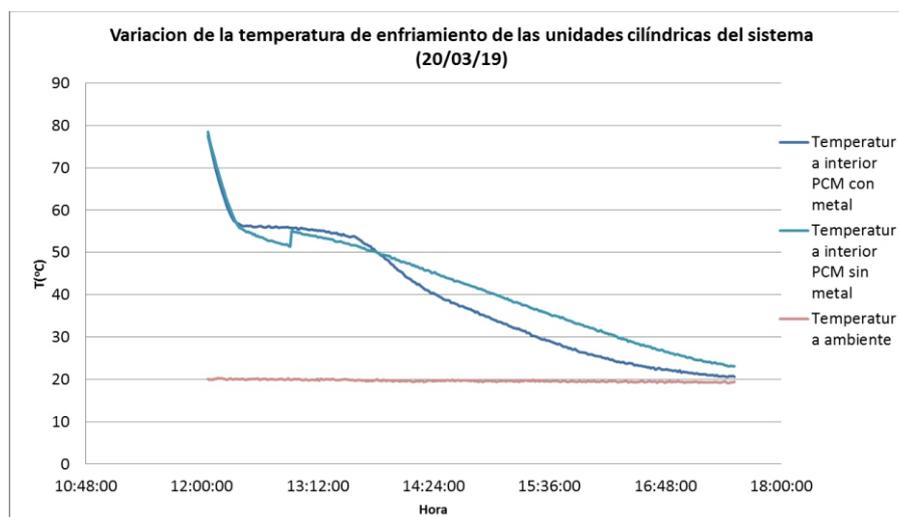


Figura 8. Variación de la temperatura en el interior del prototipo con PCM - malla metálica y del prototipo sólo con PCM (Parafina).

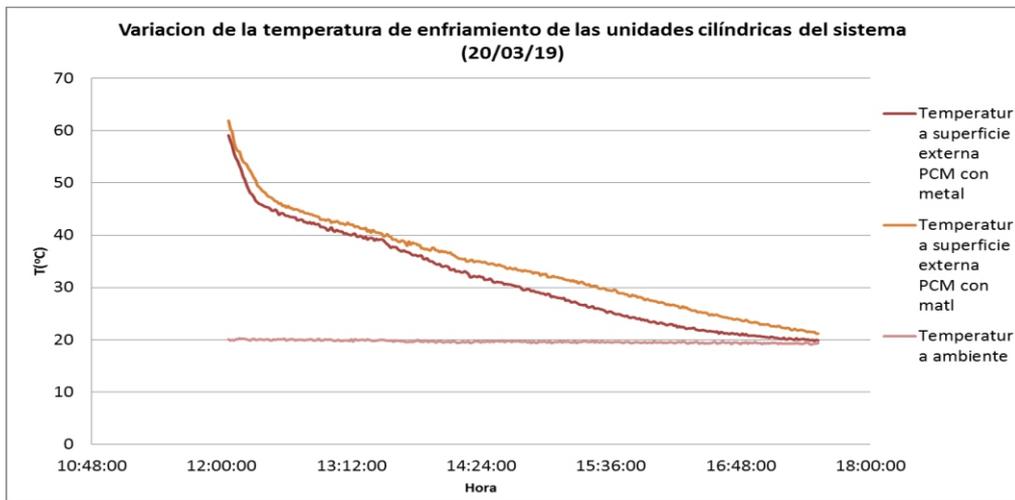


Figura 9. Variación de la temperatura en la superficie exterior del prototipo con PCM - malla metálica y del prototipo sólo con PCM (Parafina).



Figura 10. Acumulador solar térmico con PCM (Parafina), doce unidades e instalada en el colector del secador.

El espaciado óptimo entre las latas del acumulador se determina simulando, en torno al COMSOL MULTIPHYSICS 5.3, el intercambio térmico por

convección, conducción y radiación entre la superficie de la lata y el aire como fluido caloportador. De donde se obtiene 1.5 cm como la distancia más adecuada y práctica.

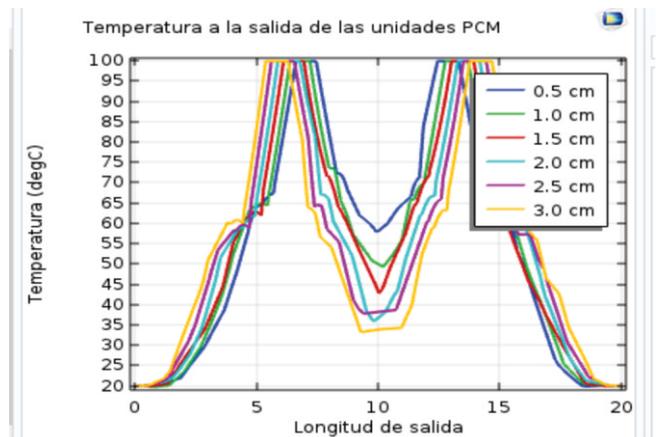
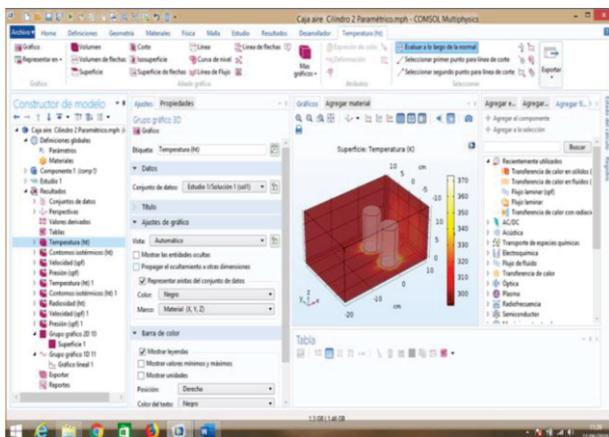


Figura 11. Variación de la temperatura del aire entre 0.5 cm a 3 cm de distancia entre las latas. Simulación COMSOL MULTIPHYSICS 5.3.

2. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SECADOR SOLAR CON Y SIN ACUMULADOR DE CAMBIO DE FASE

Para determinar la influencia del acumulador solar térmico con material de cambio de fase (Parafina), en el secado del producto; se ha caracterizado la evolución temporal de la temperatura del aire a la salida del colector del secador cuando cesa la incidencia de la radiación solar sobre el colector. Este resultado es fundamental dado que

el aire a la salida del colector del secador es el aire caliente que ingresa a la cámara de secado acelerando o retardando el proceso de secado del producto.

Las medias realizadas corresponden al caso en que el secador utiliza el acumulador solar térmico con PCM y cuando no utiliza el acumulador. En estos casos se permite la incidencia de la radiación desde las horas de la mañana hasta las 2.30 pm en la que se cubre con un material opacado el colector del secador.

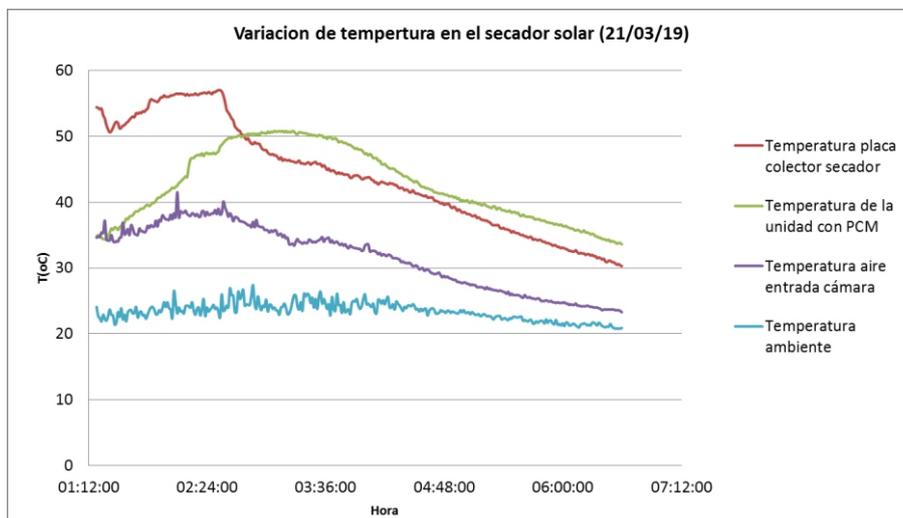


Figura 12. Variación de la temperatura del secador con acumulador con PCM, para una incidencia media de radiación solar desde las 10.00 am a 2:30 pm de 533 W/m².

Dada las condiciones ambientales en las que se realizó la prueba, la intensidad de radiación solar en ambos casos estuvo en el orden de 400 a 600 W/m², de manera que no se alcanzó el potencial pleno del acumulador solar térmico con parafina.

La figura 12 corresponde a la variación de la temperatura en el secador solar cuando se incorpora el sistema de acumulación térmica con PCM, en tanto que la figura 13, corresponde al secador sin PCM.

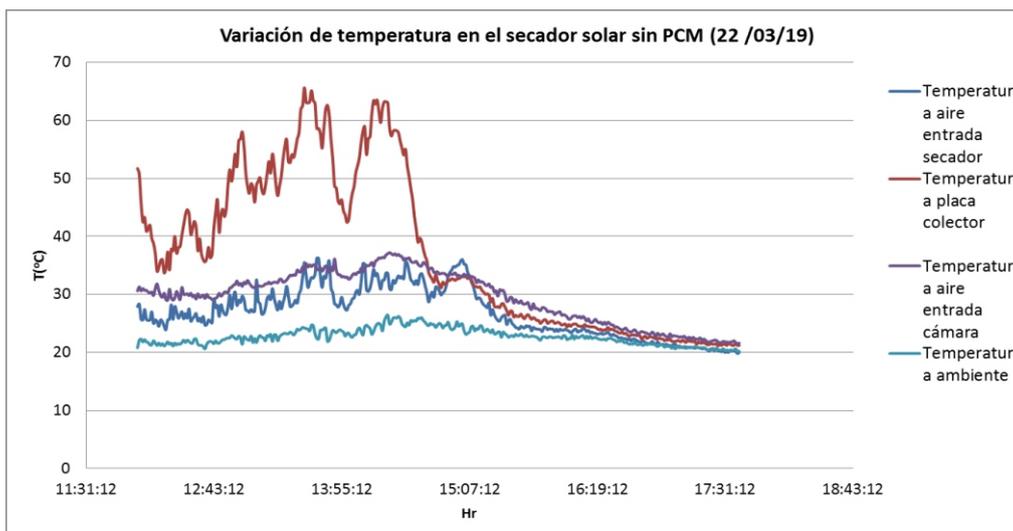


Figura 13. Variación de la temperatura del secador sin acumulador con PCM, para una incidencia media de radiación solar desde las 10:00 am a 2:30 pm de 500 W/m².

Tabla 5. Tiempo en que la temperatura de ingreso a la cámara de secado se mantiene mayor a 30° C a partir de que se interrumpe la incidencia solar.

Secador	Máxima T ₁ (°)	Mínima T ₂ (°)	Ambiente T _a (°)	t (min)	I(W/m ²)
Con Acumulador-PCM	38.1	30.0	23.8	124	533
Sin acumulador-PCM	36.6	30.0	25.3	57	500

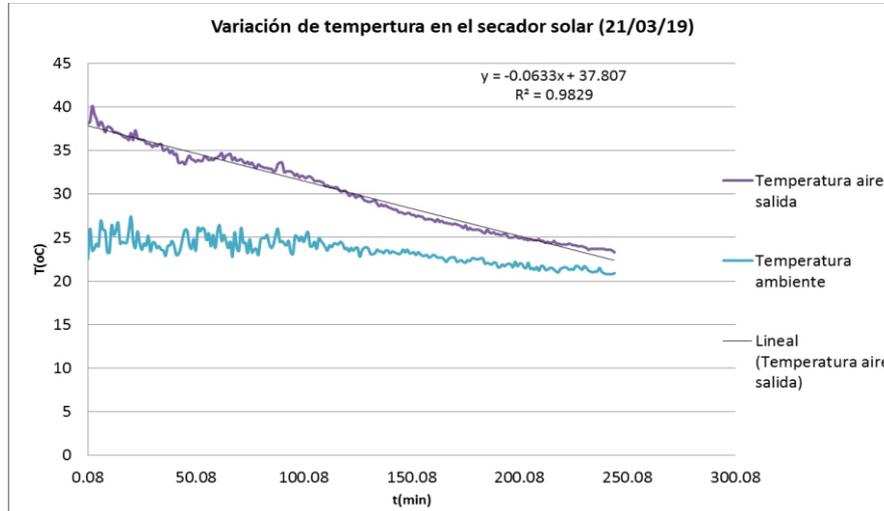


Figura 14. Velocidad de enfriamiento del aire de salida del colector solar con acumulador de cambio de fase (PCM).

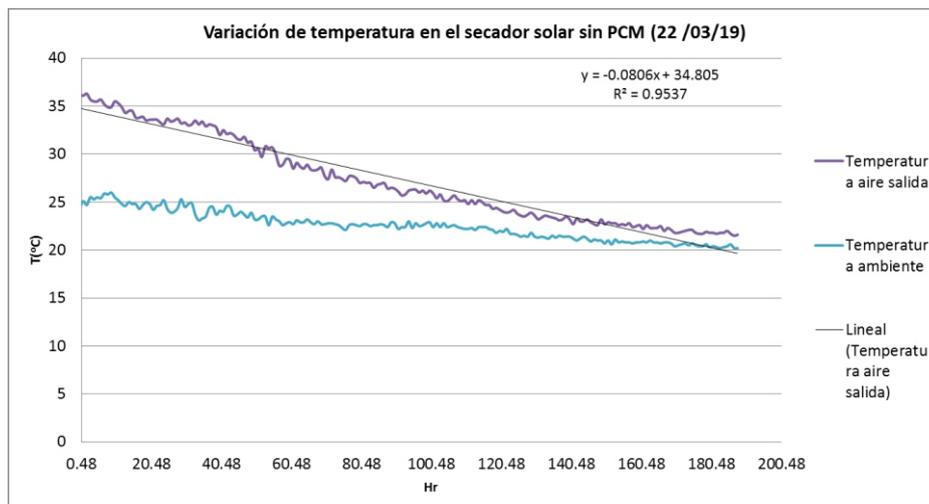


Figura 15. Velocidad de enfriamiento del aire de salida del colector solar sin acumulador de cambio de fase (PCM).

Las figuras 14 y 15 muestran la rapidez de variación de la temperatura del aire a la salida del colector en relación a la temperatura ambiente que es la temperatura a la que ingresa el aire al colector del secador.

El aire que sale del colector es la que ingresa a la cámara de secado, de manera es el indicador del grado de eficiencia del proceso de secado.

DISCUSIÓN

Las características térmicas de la parafina comercial, que ha permitido elegir como un material de cambio de fase,

medidos mediante el KD2 Pro, resultan: conductividad térmica de $k = (0.193 \pm 0.01) \frac{W}{m K}$, difusividad térmica $D = (0.162 \pm 0.016) \frac{mm^2}{s}$ y calor específico volumétrico $C = (1,761 \pm 0,176) \frac{MJ}{m^3 K}$. En lo referente a la conductividad térmica concuerda por el reportado por Campos et al (2014) que indica 0.20 W/m K así como también Fernández (2012), pero en lo referente al calor específico volumétrico Campos obtiene un calor específico de 2660 J/kg K en fase sólida; mientras que el que calculamos tomando en cuenta la relación $C = \rho c_p$ con ρ la densidad medida de la parafina, resultó ser igual a 2111 J/kg

K que difiere en un 20%, sin embargo el calor específico que reporta Vidal (2007) es de 2100 J/kg K. Estos resultados nos muestran que la cera (parafina) comercial distribuida en Ayacucho si tiene las características térmicas apropiadas para ser considerado un material de cambio de fase.

La gráfica de las figuras 8 y 9 muestra que el comportamiento de las unidades de acumulación cilíndrica con parafina y mallas o aletas internas, intercambia calor con mayor rapidez con el exterior que las unidades de acumulación sólo con parafina. Las figuras mencionadas muestran una diferencia de temperatura en el orden de 5 ° luego de un periodo de 5 horas.

El comportamiento térmico del sistema de acumulación solar térmico con PCM (parafina) mostrada en la figura 13, establece que la temperatura del aire a la entrada a la cámara de secado se ha mantenido del orden de los 30 pc, por un periodo adicional de 2 h sin la intervención de la radiación solar. En tanto que en el secador que no utiliza el acumulador de cambio de fase la temperatura decae más rápidamente (figura 14). Las figuras 15 y 16 caracterizan la rapidez de variación de la temperatura del aire de salida del colector del secador mostrando un decaimiento de 0.063 °/min para el secador que usa PCM y en caso no usa PCM 0.081 °/min.

Las conclusiones del presente trabajo son:

1. Se ha dimensionando y optimizado un prototipo de un acumulador solar térmico que utiliza la parafina como material de cambio de fase, se caracteriza por ser modular y está compuesto de 12 cilindros metálicos de aluminio reciclado y que para mejora la conductividad térmica de la cera (0.198 W/m K) se ha incorporado al interior del cilindro una malla metálica de aluminio (como aletas) que optimiza la transferencia de calor homogénea de la cera al aire. La temperatura de fusión de la parafina está entre 53 pc y 56 pc, con un calor específico volumétrico de 1.762 MJ/m³K (Tabla 4).
2. Se ha diseñado y construido un secador solar sobre la concepción de ser de uso familiar para secador de excedentes familiares como papa, maíz y/o plantas aromáticas, este secador se caracteriza por ser mixto, para el secado de productos de modo directo e indirecto y utiliza el flujo natural por efecto termosifón (sistema pasivo). Dispone de una chimenea para generar el efecto de tiro.
3. El acumulador térmico con PCM, optimiza el proceso de secado debido a que cuando se interrumpe la incidencia de la radiación solar, la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se mantiene mayor a 30 ° durante 2h, mayor en 1 h que cuando no usa el acumulador, para una radiación de 500-600 W/m².

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campos-Celadora, Álvaro; Gonzalo Dicare, Jon; Teres Zubiaga, Tatiana V. Bandos, Ane M. García-Romero, L.M. López, José M. Salac. (2014). Design of a finned plate latent heat thermal energy storage system for domestic applications. *Energy Procedia* 48. 300–308. Science Direct.

Escobar-Ochoa, Mario; Cuervo-Andrade, Sandra; Rincon-Prat, Sonia. (2017) Metodología para el diseño de un módulo de acumulación térmica usando materiales de cambio de fase (PCM) para un secador solar de túnel. *Revista UIS Ingenierías*, [S.l.], v. 17, n. 1, p. 9-20, nov. ISSN 2145-8456.

Fernández Rodríguez, William. (2012) Análisis del comportamiento del perfil de temperaturas de material de cambio de fase (PCM) en el almacenamiento de energía solar utilizando herramientas computacionales. Universidad Autónoma del Caribe. Tesis. Colombia.

Montero Puertas, Irene. (2005). Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. España.

Torres-Gallo, Ramiro; Miranda-Lugo, Pedro J. y Martínez-Padilla, Keimer A. (2017). Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca. *Tecnológicas*. Colombia.

Vidal Jiménez, Bárbara. (2007). Modelización del cambio de fase sólido líquido. Aplicación a sistemas de acumulación de energía térmica. Universitat Politècnica de Catalunya. TESIS DOCTORAL.

UNESCO. (2005). Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes. Asunción, Paraguay.