

ACUMULADOR SOLAR TÉRMICO DE PLACA COMPACTA CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA SECADORES FAMILIARES

SOLAR THERMAL ACCUMULATOR WITH COMPACT PLATE WITH PHASE CHANGE MATERIAL FOR FAMILY DRYERS

Kléber Janampa-Quispe¹ 

¹Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

Recibido (Received): 23 / 02 / 2021 Aceptado (Accepted): 22 / 06 / 2021

RESUMEN

En el presente trabajo se ha diseñado un acumulador solar térmico para mejorar la inestabilidad temporal de la energía solar en el secado familiar de productos. La estructura del acumulador se define mediante la simulación térmica en Comsol Multiphysics. El acumulador es modular, de placa compacta rectangular de cobre, cuyas dimensiones determinadas son 30 cm x 20 cm x 3 cm que encapsula 1 kg de parafina como material de cambio de fase. Para mejorar la transferencia de calor desde el material de cambio de fase, debido a la baja conductividad térmica de la parafina, se incorpora aletas internas y/o externas en el acumulador para acelerar el proceso de carga y descarga de la energía térmica. Cuando se incorporan dos unidades del acumulador en la placa colectora de un secador solar de cabina, se logra estabilizar la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado durante el proceso de carga del acumulador y cuando cesa la intervención de la radiación solar, la energía acumulada permite disponer de aire que ingresa a la cámara de secado con una temperatura mayor a 30 °C por un intervalo de 2 h, energía adicional que optimiza el proceso de secado del producto.

Palabras Clave: Comsol Multiphysics, acumulador térmico, material de cambio de fase

ABSTRACT

In the present work, a solar thermal accumulator has been designed to improve the temporary instability of solar energy in the family drying of products. The structure of the accumulator is defined by thermal simulation in Comsol Multiphysics. The accumulator is modular, with a compact rectangular copper plate whose dimensions are 30 cm x 20 cm x 3 cm that encapsulates 1 kg of paraffin as phase change material. To improve the heat transfer from the phase change material, due to the low thermal conductivity of the paraffin, internal and / or external fins are incorporated into the accumulator to accelerate the process of charging and discharging the thermal energy. When two accumulator units are incorporated in the collector plate of a cabin solar dryer, the temperature of the air entering the drying chamber is stabilized during the accumulator charging process and when the solar radiation ceases, the accumulated energy allows air to enter the drying chamber with a temperature greater than 30 °C for an interval of 2 h, additional energy that optimizes the product drying process.

Keywords: Comsol Multiphysics, thermal accumulator, phase change material

1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables constituyen una importante fuente de energía cuya demanda va incrementándose. Para implementar las tecnologías renovables se debe considerar su disponibilidad en el lugar de la aplicación; entre las energías renovables tenemos la energía solar cuyas aplicaciones tecnológicas son diversas y son consideradas ambientalmente sostenibles e importantes para la diversificación energética.

Una de las mayores limitaciones de la tecnología solar es la disponibilidad de la energía conforme a la demanda, dado que esta energía es intermitente y temporal genera un rendimiento inestable y diseños poco confiables [1].

En el secado de productos, cuando se interrumpe la radiación solar surgen problemas como el secado incompleto del producto, la condensación nocturna de la humedad dentro del secador, desacelerando el secado logrado en el día; por lo que es necesario alargar el secado durante las horas que cesa la intervención de la radiación solar.

El uso de acumuladores solares térmicos con materiales de cambio de fase constituye una alternativa al problema de la inestabilidad de la energía solar. Un material de cambio de fase que

¹ Corresponding author.:
E-mail: kleberjanampaispe@gmail.com

abunda en Ayacucho, que es muy utilizado tradicionalmente, es la parafina; cuyas propiedades térmicas permiten ser utilizadas como material de cambio de fase en aplicaciones térmicas solares de mediana temperatura.

El uso de sistemas de almacenamiento es fundamental para evaluar la eficiencia y operación del sistema solar como conjunto y en cada una de las unidades que lo componen [2], los sistemas de almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase son una alternativa para desarrollar aplicaciones solares familiares que oferte sistemas eficientes, confiables, de bajo costo, que incremente la capacidad de almacenamiento térmico y reduzca las elevadas variaciones de temperatura. Sin embargo, existen condiciones que limitan la selección del material de cambio de fase, como el calor de fusión, temperatura de fusión, la baja conductividad térmica [3] y por otro lado el costo y disponibilidad del PCM (“Phase Change Material”) para desarrollar un modelo apropiado [4]. También, se debe tomar en cuenta las condiciones que deben darse para que la aplicación con PCM tenga un desempeño óptimo tomando en cuenta las condiciones existentes del lugar donde se pretende utilizar [5].

Actualmente se desarrollan aplicaciones tecnológicas que utilizan sistemas de almacenamiento de energía térmica de calor sensible de un fluido o sólido, o calor latente de cambio de fase [3]. Se vienen desarrollando investigaciones teóricas y experimentales para modelar el comportamiento térmico de materiales de cambio de fase, para caracterizar el desempeño térmico de las unidades de almacenamiento, investigar nuevas geometrías y proponer unidades modulares para aplicaciones residenciales y comerciales [6].

Los sistemas de almacenamiento con materiales de cambio de fase tienen una gran variedad de tipos y clasificaciones, los que generalmente se utilizan son materiales de cambio fase de sólido a líquido [4], cuya ventaja es su punto de fusión y solidificación que tiene un amplio rango de temperatura, elevado calor latente de fusión por unidad de volumen y alto calor específico. Entre estos materiales se encuentran las parafinas, hidrocarburos saturados [7], ácidos grasos, mezclas eutécticas orgánicas e inorgánicas y polímeros. Los sistemas que utilizan almacenamiento en forma de calor latente tienen mayor capacidad de almacenamiento que los que utilizan calor sensible en las mismas condiciones. Sin embargo, la mayoría de los PCM tienen el inconveniente de una baja conductividad térmica, que genera una baja velocidad de carga y descarga de la energía térmica [4].

Se han desarrollado diversos sistemas de acumulación térmica con materiales de cambio de fase aplicados a los diferentes usos de la energía solar,

como secadores, termas, cocinas, invernaderos y a la arquitectura bioclimática, dentro del enfoque de media y alta temperatura [4]. Gopi et al. [8] mencionan los trabajos de Bal et al., quienes desarrollaron un secador solar que usa parafina como PCM donde secaron productos a temperaturas constantes y moderadas de 40-75 °C. Gopi et al. [8] desarrollan un colector solar de doble paso en modo de convección natural integrado con una unidad de almacenamiento de calor para el secado de rábanos con una unidad de almacenamiento de energía sensible (guijarros) y una unidad de almacenamiento de energía de calor latente (parafina). Ramiro Torres et al [9] desarrolla un secador de yuca que dispone un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM parafina contenidas en latas. Campos et al (2014) [10] desarrolla un módulo PCM con parafina y estructura de placa plana con aletas internas, estos módulos componen un sistema compuesto por 12 placas, dispuestas 6 en paralelo y 2 en serie. Utiliza agua como fluido caloportador que fluye a través de los canales formados entre las placas.

2. METODOLOGÍA

El acumulador se basa en el principio de acumulación de energía térmica por calor latente de la parafina como material de cambio de fase (PCM), que se carga durante el periodo de incidencia de radiación solar y descarga, en horas que se interrumpe la radiación solar, para su uso en un secador familiar. La estructura del acumulador constituye el intercambiador de calor cuya geometría se optimiza por simulación mediante COMSOL Multiphysics 5.3 considerando al aire como fluido caloportador.

Para determinar la disponibilidad energética del acumulador, se caracteriza las propiedades térmicas de la parafina comercial local y se considera atender la demanda energética de un secador solar familiar de mediana temperatura. Luego, se evalúa comparativamente el comportamiento térmico del secador solar cuando incorpora el acumulador y cuando no lo incorpora.

2.1 MATERIALES

Software COMSOL Multiphysics 5.3, es una herramienta informática para la simulación de fenómenos multifísicos [11]. KD2 Pro: Analizador de propiedades térmicas, que mide la Conductividad Térmica, Resistividad Térmica, Calor Específico y Difusividad Térmica. Cumple las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334-08. EBI 40 TC-01. EBRO ELECTRONIC. Registrador de datos de temperatura de 12 canales para termocuplas tipo K. Radiómetro UNI con interfaz y memoria, que mide la intensidad global de la radiación solar, a través de su célula fotovoltaica calibrada, con sensibilidad nominal de $\pm 1 \text{ W/m}^2$.

2.2 PARÁMETROS TÉRMICOS DE LA PARAFINA

En Ayacucho, la cerería es una de las actividades tradicionales para la elaboración de velas, adornos religiosos, etc. de manera que la parafina es un producto accesible en la zona. Las características térmicas de la parafina toman valores diversos dependiendo de su peso molecular. La parafina comercial tiene un peso molecular intermedio, que oscila en el rango de 350-420. Las propiedades termofísicas de la parafina comercial de Ayacucho (Presión atmosférica de Ayacucho 71.3 kPa) se muestran en la Tabla I y la Fig. 1 caracteriza la temperatura de fusión y solidificación de la parafina al interior del acumulador.

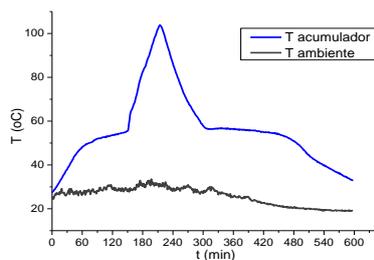


Fig. 1. Curva de calentamiento y enfriamiento de la parafina en el interior de un módulo.

Tabla I.
Propiedades termo físicas de la parafina comercial de Ayacucho

Propiedad	Valor	Unidad
Rango de temperatura para cambio de fase	53-56	°C
Calor latente	132.4 ± 1.5	kJ/kg
Conductividad térmica (sólido)	0.208 ± 0.01	W/mK
Conductividad térmica (líquido: 67.23°C)	0.186 ± 0.01	W/mK
Densidad, sólido	877 ± 17	kg/m ³
Densidad, líquido	768 ± 15	kg/m ³
Calor específico sólido	2628 ± 54	J/kgK
Calor específico líquido	2379 ± 81	J/kgK

Nota: Las propiedades termofísicas de la parafina se mide con KD2 Pro. La conductividad térmica de la cera en estado líquido es menor que en estado sólido.

2.3 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE ACUMULADOR SOLAR TÉRMICO PASIVO DE MEDIANA TEMPERATURA CON PCM PARAFINA.

La concepción del diseño del prototipo de acumulador térmico solar es:

- Para un requerimiento energético de mediana temperatura (15-90 °C) [4], que concuerda con la temperatura del aire óptima de secado en la entrada de la cámara de secado a partir de 30 °C [12].
- La geometría que se ha considerado es de carácter modular, de configuración compacta de placa plana, que optimice el proceso de acumulación e intercambio de calor.

2.4 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO CON COMSOL MULTIPHYSICS.

Se simula el comportamiento térmico del módulo en relación a sus parámetros geométricos mediante COMSOL Multiphysics 5.3, que toma en cuenta las siguientes etapas:

Preprocesamiento: Se crea el modelo, se elige la dimensión 3D, se selecciona la física de “Transferencia de calor”, el tipo de estudio estacionario, y cuando fue necesario, el temporal. Se define los parámetros y variables que se utilizan para controlar el modelo. Mediante la interfaz gráfica se construye el módulo del acumulador, rectangular compacta de placa plana con aletas internas y externas como se muestra en la Fig. 2.

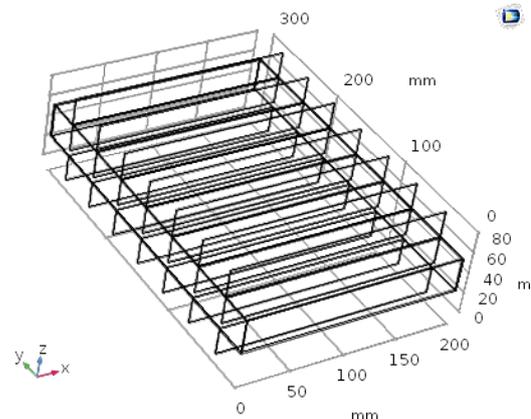


Fig. 2. Prototipo modular de acumulador térmico con PCM con aletas internas y externas.

Para la selección de materiales; se utiliza la librería del software para determinar las propiedades del cobre para la estructura del módulo pintado de negro mate (Tabla II) y la del aire circundante como fluido caloportador. Para la parafina se toma los valores de la Tabla I.

Tabla II.
Propiedades térmicas del cobre

Cobre	Nombre	Valor	Unidades
Conductividad	k	401	W/(mK)
Densidad	Rho	8933	kg/m ³
Calor específico	C _p	385	J/(kgK)

Emisividad de superficie pintado de negro mate	ϵ	0.97
------------------------------------------------	------------	------

Nota: Se obtiene de la librería del COMSOL. La emisividad de la superficie corresponde a la cubierta pintada negro mate.

Procesamiento: Se simula la capacidad de transferencia de calor por conducción, convección y radiación desde el material de cambio de fase hacia la estructura del sistema y al aire circundante. La ecuación de la temperatura definida en dominios sólidos corresponde a la forma diferencial de la ley de Fourier, que contiene una fuente de energía que mantiene la base del acumulador a una temperatura definida. En esta etapa se define las condiciones de frontera.

Los valores iniciales establecidos son:

- Temperatura inicial de la placa base del módulo PCM 100 °C.
- Coeficiente de convección sobre las superficies del módulo 5,7 W/°C.
- Temperatura ambiente 20 °C.

Se selecciona el mallado normal que por defecto establece COMSOL.

Postprocesamiento: Los resultados de la simulación se muestran gráficamente, estos resultados corresponden a la:

- Determinación del espesor del módulo.
- Determinación de la longitud de la aleta interna del módulo.
- Determinación de la longitud de aletas externas del módulo PCM.

Espesor del módulo: Se toma como espesor inicial del módulo 10 mm y la longitud de la aleta interna 5 mm, gradualmente se va cambiando el espesor en intervalos de 10 mm hasta 60 mm, correspondientemente se varía la longitud de la aleta manteniendo constante la separación entre la aleta y la base en 5 mm.

La Fig. 3 muestra la variación de temperatura en la superficie exterior del módulo a medida que varía su espesor; el espesor de la placa de cobre que constituye la estructura del módulo es 1 mm. Para menor espesor del módulo hay una mayor temperatura en la superficie, lo que implica que hay una mejor conductividad térmica de la placa caliente al exterior. La temperatura en corte vertical en la parte central del módulo, muestra que la temperatura del PCM está más estratificada a medida que aumenta el espesor del módulo; dicha estratificación es debido a la baja conductividad térmica de la parafina.

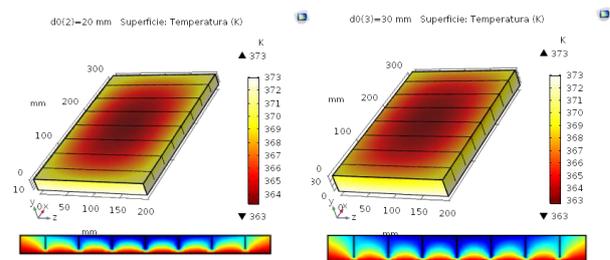


Fig. 3. Variación de la temperatura en el módulo PCM con aletas internas en relación al espesor del módulo de 10 mm a 60 mm y la distribución de temperatura en un corte vertical.

La Fig. 4 muestra la variación de la temperatura en la línea de corte en la parte central de la superficie superior del módulo, se observa que la diferencia de temperatura entre el centro y los extremos de 5 °C para espesor de 30 mm y para un espesor de 60 mm hay una diferencia de 3,5 °C. La Fig. 5, corresponde al gráfico de la variación de la temperatura en una línea de corte vertical a lo largo de la aleta interna central, muestra que a mayor espesor del módulo la temperatura en la parte superior de la aleta es menor. Para 30 mm de espesor del módulo, la temperatura de la aleta central interna cambia de 90,5 °C a 89,7 °C.

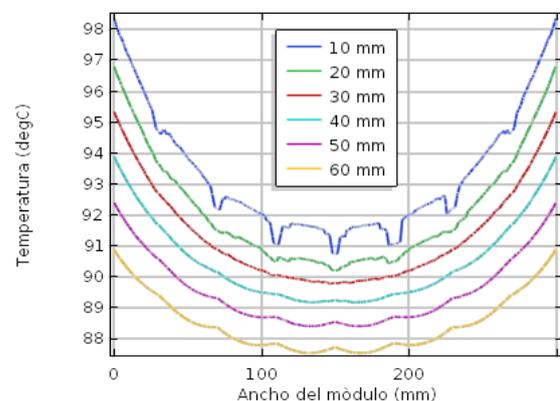


Fig. 4. Distribución de temperatura sobre la línea de central de la superficie superior del Módulo PCM, en relación al espesor del módulo de 10 mm a 60 mm.

En base al resultado de las figuras 3, 4 y 5, se elige como espesor del módulo 30 mm, dado que permite menor estratificación de la temperatura, alcanzando mayor rapidez de transferencia de calor que espesores de 40 mm a 60 mm, y pueda acumular mayor cantidad de PCM que espesores menores como 10 y 20 mm.

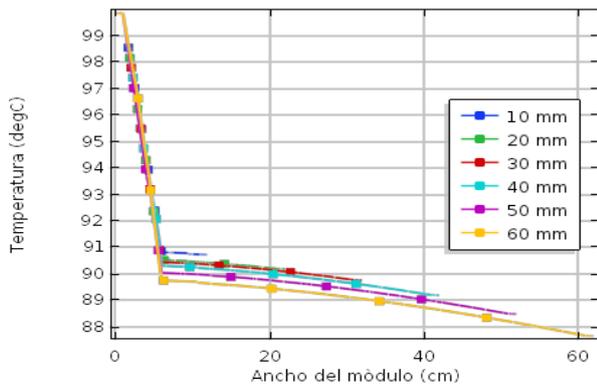


Fig. 5. Distribución de temperatura en la línea central vertical de corte sobre la aleta interna del Módulo PCM en relación al espesor del módulo de 10 mm a 60 mm.

Longitud de la aleta interna del módulo. De acuerdo al resultado anterior, se considera 30 mm como espesor del módulo PCM. Se simula la variación de la temperatura en relación a la longitud de la aleta interna, que se parametriza de 5 mm a 25 mm de longitud de la aleta interna a razón de 5 mm.

La Fig. 6 muestra la variación de la temperatura sobre la superficie superior del módulo respecto a la variación de la longitud de la aleta interna; a medida que aumenta el tamaño de la aleta la temperatura de la superficie es mayor, dado que la aleta metálica facilita la conducción térmica hacia el exterior. A su vez, permite la menor estratificación de la temperatura del material de cambio de fase.

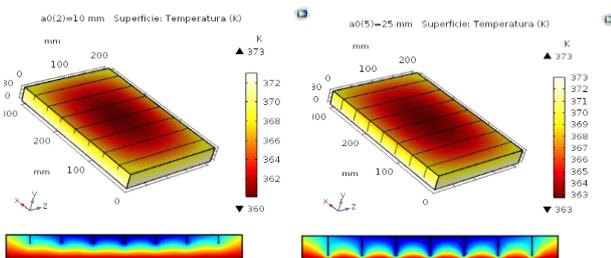


Fig. 6. Distribución de temperatura en relación a la variación de a longitud de la aleta interna del Módulo PCM de 5 mm a 25 mm y la distribución de temperatura en un corte vertical. Elaboración propia.

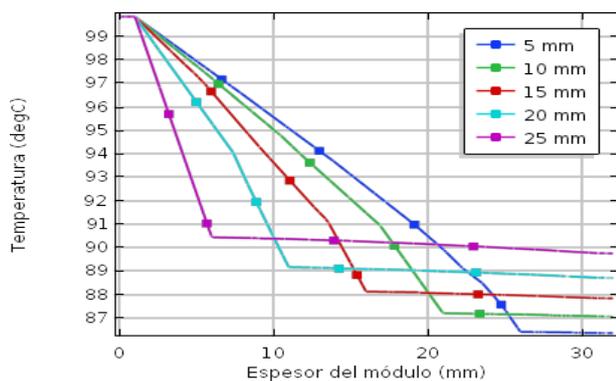


Fig. 7. Variación de la temperatura en la aleta interna central para diferentes longitudes de la aleta.

La Fig. 7, muestra la variación de la temperatura en línea de corte vertical a lo largo de la longitud de la aleta central. Para la aleta interna de 25 mm la temperatura está en el orden de 90 °C, mientras que para 5mm está entre 86 °C.

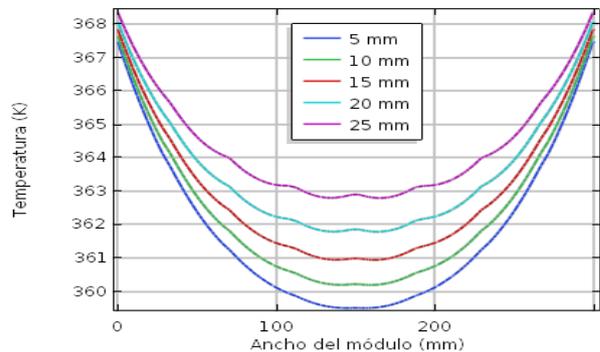


Fig. 8. Variación estacionaria de la temperatura sobre la línea central de la superficie superior del Módulo PCM para diferentes longitudes de la aleta interna.

La Fig. 8, establece que la temperatura de la superficie es mayor cuanto mayor sea la longitud de la aleta interna, para 25 mm la temperatura en la superficie varía entre 90 °C y 92 °C. En base a estos resultados se considera como la longitud adecuada de la aleta interna 25 mm

Determinación de la longitud de aletas externas del módulo PCM. Considerando las dimensiones del acumulador de 20cmx30cmx3cm y aletas internas de 25 mm, se simula la variación de temperatura cuando el módulo incorpora aletas externas que varían de 10 mm a 35 mm a razón de 5 mm (Fig. 9).

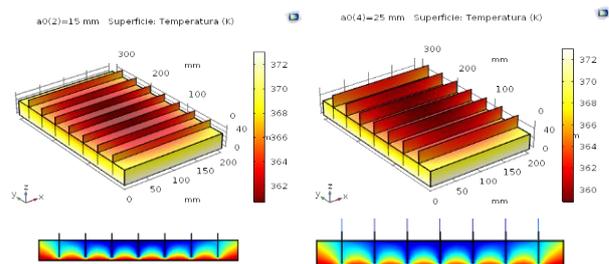


Fig. 9. Distribución de temperatura en relación a la variación de a longitud de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm y la temperatura en corte vertical.

Las aletas externas permiten aumentar la rapidez de transferencia de calor entre el módulo PCM y el aire circundante, lo que se muestra en la Fig. 9, a medida que aumenta la longitud de la aleta disminuye la temperatura de la superficie superior, dado que va aumentando el área efectiva de convección. El área de la superficie superior del módulo es 600 cm², para 7 aletas de 1cm de longitud se aporta, un área adicional de 280 cm², incrementando el área de transferencia en 1.2 veces, para 3 cm de longitud de la aleta externa se incrementa en 1.4 veces.

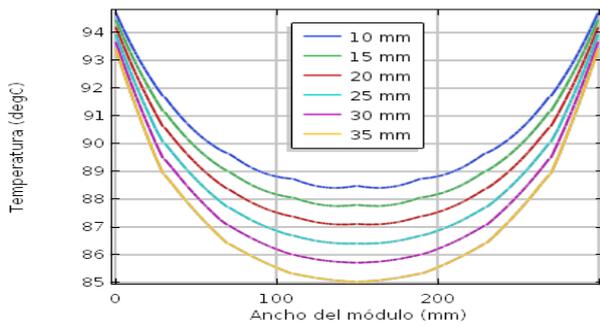


Fig. 10. Distribución de temperatura en la superficie del módulo en relación a la variación de la longitud de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.

La Fig. 10, muestra la variación de la temperatura en línea de corte horizontal sobre la superficie superior central del módulo, a mayor longitud de la aleta externa hay mayor enfriamiento, para una longitud de la aleta de 25 mm se genera una diferencia de 1.5 °C respecto a 35 mm (Fig. 11). Por lo que se considera como longitud de las aletas externas 25 mm, considerando además la cantidad de cobre que tendría que utilizarse para mayor longitud de la aleta, con el consiguiente aumento del peso del módulo.

Módulo de PCM con dos aletas externas.

Teniendo en cuenta los resultados anteriormente, se diseñó un módulo con PCM de parafina de placas compactas rectangulares de 30 cm x 20 cm x 3 cm, con aletas internas y externas (en los extremos del módulo) de 25 mm, y espaciadas simétricamente a 3.7 cm (Fig. 11). La Fig. 12, muestra la distribución de temperatura sobre una línea de corte horizontal sobre la superficie superior, paralela al ancho de 30 cm del módulo en relación a diferentes alturas respecto de la base; a 10 mm de la base la temperatura disminuye en 7° C respecto al material PCM. Para 30 cm de la base, la temperatura mínima es de 86 °C en el centro del módulo y una temperatura máxima de 93 °C.

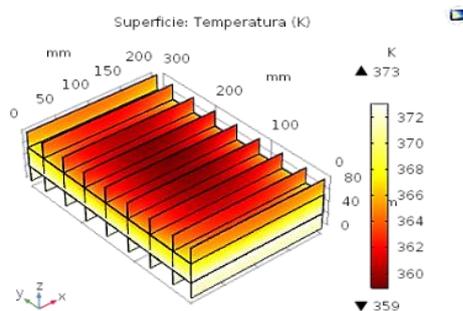


Fig. 11. Distribución de temperatura en módulo PCM de dos aletas exteriores.

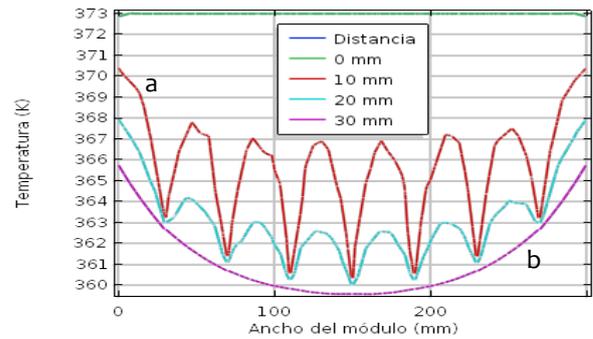


Fig. 12. (a) Distribución de temperatura en módulo PCM de dos aletas exteriores. (b) Distribución de temperatura en líneas de corte horizontales paralelas al ancho del módulo.

2.5 SECADOR SOLAR

El secador solar, en el que se implementa el funcionamiento del módulo de acumulador térmico, es de tipo cabina (Fig. 13) con colector solar plano de 0.72 m², en cuya placa metálica se ubican los módulos.

Para dimensionar el requerimiento de energía necesario para secar, se asume la temperatura ambiente media de 18 °C y humedad relativa media del aire 64% correspondiente al mes de marzo (Centro Meteorológico de la UNSCH). El proceso de secado indirecto, considera el calentamiento del aire hasta 40 °C, para luego intercambiar energía con el producto haciendo que el aire se enfríe adiabáticamente hasta la saturación, correspondiendo la temperatura final del aire 19.3 °C, obtenido de las cartas psicrométricas para la zona, con la que se tiene una capacidad de remoción de agua de hasta 8.4 g de agua/kg de aire. La TABLA IV, muestra la cantidad de energía necesaria para secar lúcuma y papa cocida a escala familiar. La humedad en base húmeda inicial y final de la lúcuma se obtuvo experimentalmente; en tanto que para la papa se tomó la referencia de la guía para el desarrollo de proyectos de secado solar en comunidades rurales [13].



Fig. 13. Secador solar Indirecto-Pasivo.

TABLA III
Dimensionamiento de la energía necesaria para el secado de Lúcumá y papa

Característica		Lúcumá	Papa
Peso del material sin secar (kg)	W_o	1.000	1.000
Humedad en base húmeda inicial (kg _{agua} /kg _{prod hum})	M_{wb1}	0.667	0.75
Humedad en base húmeda final (kg _{agua} /kg _{prod hum})	M_{wb2}	0.093	0.130
Tiempo (h)	t	5	5
Cantidad de agua retirada (kg _{agua} /h)	W_a	0.127	0.143
Humedad absoluta del aire: entrada	w_1	0.0117	0.0117
Humedad absoluta del aire: salida	w_2	0.0201	0.0201
Consumo de aire seco (kg/h)	m_a	15.072	16.968
Entalpía del aire: entrada (kJ/kg)	h_1	47.7	47.7
Entalpía del aire: salida (kJ/kg)	h_2	70.4	70.4
Energía consumida (kJ/h)	Q_a	342.1	385.2

Nota: La humedad en base húmeda inicial y final de la lúcumá, se obtuvo con un analizador de humedad Ohaus MB35.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 MÓDULO PCM

Se construye el módulo en una estructura de cobre y contiene parafina comercial como PCM. La Tabla III muestra las dimensiones finales del módulo y la Fig. 14, muestra el módulo construido.

Tabla IV.
Dimensiones del módulo PCM con aletas externas.

Largo	l	0.20	m
Espesor	e	0.03	m
Ancho	a	0.30	m
Espesor de la plancha de cobre	-	0.001	m
Masa de la estructura	m	2.10	kg
Volumen externo	V_{externo}	0.0018	m ³
Volumen interno	V_{interno}	0.0015	m ³
Volumen de cera	$V_{\text{cera}} (20\% V_{\text{interno}})$	0.0012	m ³
Masa de cera	m_{cera}	1.0	kg
Aleta	Área	0.005	m ²

Nota: El volumen interior del módulo no se llena completamente de parafina, debido a que el encapsulado de la parafina se hace en estado líquido y al solidificarse aumenta su volumen.



Fig. 14. Módulo con PCM de 30cmx20cmx3cm con aletas externas en los extremos del módulo con estructura de cobre pintado de negro mate.

La energía térmica acumulada en el módulo es de 222.35 kJ, cuando el kilogramo de parafina se calienta

de 22 °C a 60 °C con la fusión completa del PCM (Tabla IV), energía que corresponde al calor sensible de 1.4 kg de agua en el mismo rango de temperatura, que equivale a una masa de agua de 40% más de la masa de parafina.

Tabla V.
Energía acumulada en cada unidad PCM.

Temperatura inicial	T_i	22	°C
Temperatura de fusión de la cera	T_{fu}	53	°C
Temperatura final	T_f	60	°C
masa de cera	m	1	kg
Calor latente de fusión de la cera	L_f	123.506	kJ/kg
Calor específico cera sólido	C_{ps}	2.66	kJ/kg°C
Calor específico cera líquida	C_{pl}	2.34	kJ/kg°C
Energía acumulada	Q	222.346	kJ

Nota: La energía acumulada por la parafina es equivalente a 1.4 lit de agua en el mismo intervalo de temperatura.

Las características térmicas de la parafina, obtenidas mediante la experimentación, muestran valores de calor latente de fusión 132.5 kJ/kg y conductividad térmica de 0.021 W/mK en estado sólido que se aproxima a las obtenidas por Campos et al [10] de 123.5 kJ/kg y conductividad térmica de 0.02 W/mK. Para ser considerado como un material apropiado de cambio de fase, entre otras de sus propiedades termofísicas, debe tener un calor latente de cambio de fase (fusión) elevado y alta conductividad térmica. En lo referente al calor latente de la parafina, corresponde al 37% del calor latente de fusión del agua (334 kJ/kg a 0 °C) y sólo a un 5% del calor latente de vaporización del agua (2257 kJ/kg a 97 °C). La conductividad térmica de la parafina resulta muy baja, lo que disminuye la velocidad de la carga y descarga de la energía durante los ciclos de fusión y solidificación de la parafina.

La parafina comercial es un material que reúne las características térmicas básicas para ser considerado como material de cambio de fase, pero sus aplicaciones van a estar limitadas a la temperatura de fusión de la parafina entre 53 °C a 60 °C, que para nuestro caso corresponden a la temperatura de operación de aplicaciones solares de mediana temperatura [1].

El diseño del acumulador térmico, parte de la concepción de establecer una estructura modular de placa rectangular compacta que encapsula la parafina como material de cambio de fase; el carácter modular del acumulador permitirá combinar la disposición de ellas según el requerimiento energético y el espacio disponible en el sistema solar térmico donde se utilice. La unidad modular se construye con una estructura de cobre y dispone de aletas internas y externas para optimizar la acumulación y extracción de la energía térmica y aumentar la conductividad térmica efectiva del módulo.

El diseño geométrico del módulo, se obtuvo en base a la simulación del comportamiento térmico del módulo mediante el software Comsol Multiphysics 5.3. El Comsol proporciona un alto nivel de detalle térmico que ha permitido optimizar el diseño y las condiciones operacionales. Para validar el modelo físico planteado en el diseño del software Comsol Multiphysics 5.3, se caracteriza el perfil de temperatura en puntos correspondientes a la línea central de la base superior del módulo PCM sin aletas externas cuando la base inferior permanecía constante a 91 °C. Dicho resultado se compara con la medida experimental reproduciendo las condiciones establecidas en el modelo, manteniendo la temperatura de la placa base del módulo a 91 °C cuando está en contacto con agua hirviendo.

La Fig. 15 muestra un comportamiento equivalente entre lo que predice el modelo físico del Comsol y el resultado experimental, el grado de correspondencia se manifiesta en la tendencia de comportamiento de la variación de la temperatura a lo largo de la línea central del módulo PCM. Las diferencias que se muestran, se deben a que en el desarrollo experimental el espacio comprendido entre las placas del módulo no está completamente llenas de parafina, se deja un espacio de aire del 20% debido el aumento de volumen de la parafina al enfriarse.

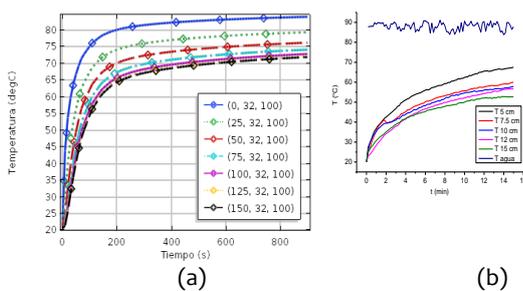


Fig. 15. Variación de la temperatura en puntos de la línea central de la base superior del módulo PCM (a) obtenido mediante el Comsol Multiphysics (b) obtenido experimentalmente.

Se determina las dimensiones finales del módulo PCM, considerando las que presentan mayor rapidez de transferencia de calor y asumiendo su mayor posibilidad y facilidad de construcción. En lo referente al tamaño de las aletas se asumieron 2,5 cm tanto para las aletas internas y externas; dado que se optimiza la transferencia de calor por conducción a través de las aletas internas desde el interior del PCM hacia el aire exterior. En tanto que, las aletas externas aumentan la relación área de convección en relación al volumen del módulo y representan un incremento de 25% del área total del módulo.

Las dimensiones del módulo PCM, permiten encapsular 1 kg de parafina con la que se acumula 0.06 kWh de energía térmica en calor sensible y latente, tiene una densidad de energía por unidad de volumen

de 51.81 kWh/m³ para operar a temperatura de 53 °C a 60 °C. El módulo desarrollado lo comparamos con modelos de otros autores para ver su efectividad, por ejemplo, el modelo desarrollado por Campos [10] se caracteriza por ser un acumulador también compacto de parafina RT60 desarrollado con aluminio y sólo con aletas internas de 2.5 cm de longitud, espaciados unos de otros con 4 cm; las dimensiones del módulo son de 60 cm x 20 cm x 3 cm con volumen efectivo de 0.0036 m³ por unidad, que puede acumular 0.12 kWh de energía térmica con una densidad de 89.4 kWh/m³, estas unidades se constituyen en arreglos de 7 placas en paralelo y 8 en serie con un volumen total de 0.315 m³ y una capacidad máxima de almacenamiento de energía de 8.5 kWh. Otro modelo que se hace referencia en Moscoso [14], son módulos de aluminio con aletas externas de la empresa Climator de dimensiones superiores al propuesto en el presente trabajo. Igualmente, Moscoso hace referencia a los paneles de la compañía alemana Rubitherm Technologies GmbH, de tipo de macro-encapsulación de PCM de 45 cm x 30 cm con 15 mm de espesor. Están compuestos por dos placas de aluminio, conectadas entre sí a través de un marco del mismo material, éstos se pueden adaptar a diferentes aplicaciones, ya que se pueden llenarse con PCM orgánicos o con PCM inorgánicos, permitiendo operar en un rango de temperaturas entre 0 y 45 °C, dependiendo del uso y requisitos particulares.

3.2 EVALUACIÓN TÉRMICA DE LOS MÓDULOS DE PCM EN UN SECADOR SOLAR TIPO CABINA

Se instalan dos módulos PCM con aletas externas sobre la placa colectora del secador, próximos a la entrada de la cámara de secado, luego se expone a la incidencia de radiación solar para su proceso de carga. La Fig. 16 muestra la evolución de la temperatura durante el proceso de calentamiento del módulo PCM, en el colector y en el aire de la cámara de secado; se encuentra para una intensidad de radiación media, en el periodo de carga, de 745 W/m² la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado alcanza valores hasta 60 °C durante un intervalo de tiempo de 5,5h (10.24 a.m. a 4.45 p.m.). En este intervalo, la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se muestra estable, no obstante que varía la radiación solar, lo que permitirá optimizar el proceso de secado. Cuando se interrumpe la incidencia de la radiación solar, cubriendo el colector con un material opaco a partir de las 3.30 pm, se encuentra que la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado es mayor a 30 °C durante 2 h adicionales, y hasta 25 °C durante 1 h más y se mantiene con una temperatura superior en 5 °C a la temperatura ambiente por más 1.5 h adicional.

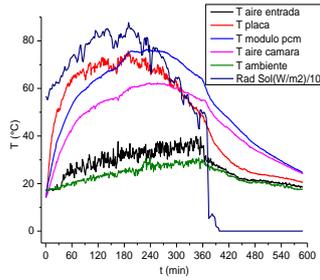


Fig. 16. Temperatura del secador solar que utiliza dos módulos PCM. El proceso inicia las 9:30 am. Radiación solar media en las horas de calentamiento de 745 W/m². (26/05/19).

La Fig. 17 muestra la evolución de la temperatura durante el proceso de calentamiento del colector y del aire en la cámara de secado del secador cuando no incorpora el módulo PCM, se encuentra que, la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se mantiene superior a los 40 °C por un periodo de más 5 h para una intensidad de radiación media de 757 W/m², en el periodo de carga. Cuando se interrumpe la incidencia de los rayos solares a partir de la 4.00 pm, cubriendo la superficie del colector con un material opaco, la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado decae rápidamente en comparación al caso que utiliza el módulo PCM como se ilustra en la Fig. 17.

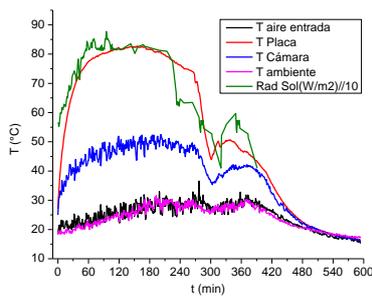


Fig. 17. Temperatura del secador solar que no utiliza el módulo PCM, el proceso inicia las 10 am, con una radiación media en las horas de calentamiento de 757 W/m². (25/05/19).

La Tabla V muestra la comparación de la temperatura del aire en la cámara de secado del secador solar, cuando se usa el módulo PCM y cuando no se utiliza el módulo, se destaca que el efecto del módulo es favorable para el secado, dado que la temperatura media es de 54.46 °C mayor en el orden de 9.38 °C, por un espacio mayor de tiempo.

Tabla VI.

Datos de la temperatura del secador cuando permanece la temperatura del aire de la cámara de secado mayor a 40 °C.

Secador	Temperatura media		Tiempo (>40°C) (hr)	Total, de horas de sol	Radiación (W/m ²)
	Aire entrada cámara secado (°C)	Ambiente (°C)			
Con módulo PCM	54.46	27.6	6.5	6.0	745
Sin módulo	45.08	26.2	5.5	6.0	757

Nota: Se puede observar que la temperatura media del aire que ingresa a la cámara de secado resulta ser mayor en 9 °C cuando se usa el módulo de PCM que cuando no se usa PCM.

En la Fig. 18 se observa, que cuando cesa la incidencia de la radiación solar sobre el secador que utiliza el módulo PCM, la temperatura que ingresa a la cámara de secado mantiene un valor 47 °C a 30 °C por un periodo aproximado de 2 h; además, la temperatura del aire que ingresa a la cámara se mantiene superior a valores entre 40 °C a 25 °C por un intervalo de 3 h, logrando una diferencia de 8 °C superior a la temperatura ambiente. En el caso que el secador funciona sin módulo, la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se mantiene entre 42 °C a 30 °C por un intervalo de 1 h.

Para determinar la curva de eficiencia de los colectores solares de aire del secador solar pasivo tipo cabina, se siguió el procedimiento normado por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) que hace referencia Olivares y Torres [15], la eficiencia del colector solar establece la relación entre el calor transferido al aire en relación a la cantidad de energía total incidente en el colector del secador.

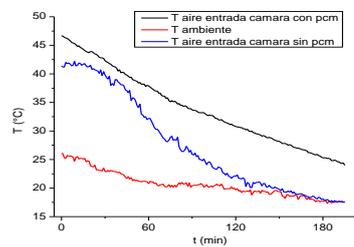


Fig. 18. Comparación de la temperatura que ingresa a la cámara de secado del secador solar cuando cesa la radiación solar. El proceso inicia las 4 pm.

La curva de la eficiencia instantánea del colector, caracteriza el comportamiento de la eficiencia del colector con respecto a los valores de la radiación solar y las temperaturas de ingreso del aire al colector y la temperatura ambiente.

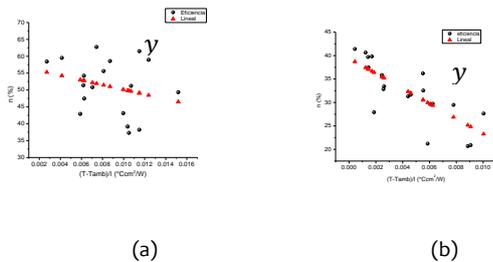


Fig. 19. Eficiencia instantánea de colector solar (a) cuando usa el módulo PCM (745 W/m^2) (26/05/19) y (b) cuando no utiliza el módulo (757 W/m^2) (25/05/19).

La Fig. 19, determina el calor útil instantánea que almacena el aire a partir de las 10.00 am a 03:00 pm, en intervalos de 15 minutos. El flujo másico de aire se ha medido considerando el caso estacionario, cuyo valor está en el orden de 0.0010 kg/s . El calor específico del aire se considera constante e igual a $1009 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, el área del colector solar es de 0.66 m^2 . Se puede observar que la eficiencia máxima del colector cuando utiliza el módulo PCM es de 57.2% mayor que cuando no se usa el módulo cuyo valor es de 39.4%.

Para determinar el grado de influencia del acumulador solar térmico con material de cambio de fase en el proceso de secado, se evalúa el tiempo en el cual la cámara de secado mantiene una temperatura mayor a $30 \text{ }^\circ\text{C}$. La Tabla VI muestra las diferentes mediciones realizadas

Tabla VII.

Tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar y la temperatura de la cámara se mantiene mayor a $30 \text{ }^\circ\text{C}$, el secador usa el módulo PCM.

Fecha	I (W/m^2)	Temperatura entrada cámara de secado			T ambiente ($^\circ\text{C}$)	tiempo (min)
		T _{max} ($^\circ\text{C}$)	T _{min} ($^\circ\text{C}$)	T _{media} ($^\circ\text{C}$)		
12/03/2019	710	51.4	31.2	43.4	23.4	99
12/04/2019	698	47.2	30.1	40.9	26.2	94
29/04/2019	721	43.4	30.3	34.9	24.0	108
30/04/2019	703	41.6	29.7	33.9	22.3	85
16/05/2019	798	48	30.3	39.8	26.9	121
17/05/2019	743	45.8	30.7	39.3	26.9	86
Media	729	46.2	30.4	38.7	25.0	98.8

Nota: La temperatura media de entrada del aire a la cámara de secado es del orden de $39 \text{ }^\circ\text{C}$, para una radiación media de 729 W/m^2 , en el intervalo de carga.

De manera que, al instalar los módulos PCM con aletas internas y externas (dos unidades: 2kg de parafina) en el secador solar tipo cabina e indirecto; se encuentra que durante el proceso de calentamiento los módulos alcanzaron la temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ para una intensidad de radiación media de 745 W/m^2 , con lo que la parafina cambia de estado y logra mantener más estable la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado

(Fig. 16) dado que, en un secador por convección natural, predomina la presencia de fluctuaciones de la velocidad del aire y en la temperatura [14]. La temperatura de aire que ingresa a la cámara de secado permanece por más $40 \text{ }^\circ\text{C}$ durante más de 6 h, generando un flujo másico de 0.01 kg/s de aire en las horas de mayor estabilidad de la temperatura para una intensidad de radiación solar media de 745 W/m^2 . Cuando cesa la influencia de la radiación solar se dispone de más de 1.5 a 2 h de aire que ingresa a la cámara de secado con temperatura por encima de los $30 \text{ }^\circ\text{C}$, que definitivamente optimiza el proceso de secado del producto removiendo el contenido de humedad por mayor tiempo y no se interrumpe el proceso de secado del producto.

CONCLUSIONES

- Las propiedades térmicas de la parafina comercial de Ayacucho, lo configuran como un material de cambio de fase: temperatura de fusión de $53 \text{ }^\circ\text{C}$, calor latente de fusión de 132 kJ/kg , calor específico en fase sólida 2100 J/kgK y en fase líquida 2113 J/kgK ; y conductividad térmica de 0.2 W/mK .
- Se ha diseñado y construido módulos de acumulador solar térmico en base a una estructura rectangular de cobre de $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$, con aletas internas y/o aletas externas de 2.5 cm , dispuestas simétricamente a una distancia de 3.7 cm una de otra con la que se incrementa la relación de área y volumen para facilitar el proceso de transferencia de calor al aire como fluido de intercambio térmico. Presentan un carácter modular para acondicionarse a aplicaciones requeridas de tecnología solar. Encapsula 1 kg de parafina garantizando una acumulación de energía térmica hasta el punto de fusión del orden de 0.06 kWh por módulo con una densidad de energía por volumen de 51.81 kWh/m^3 .
- El acoplamiento de los módulos de acumulador solar térmico con PCM en el secador solar, ha permitido controlar la temperatura de la cámara de secado, logrando además disponer hasta 1.5 a 2 h de aire a una temperatura superior a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ con lo que se acelera el proceso de secado, una vez que cesa la intensidad de radiación solar.

REFERENCIAS

- [1] M. Escobar-Ochoa, S. Cuervo-Andrade, y S. Rincon-Prat, "Metodología para el diseño de un módulo de acumulación térmica usando materiales de cambio de fase (PCM) para un secador solar de túnel", *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 35–42, may. 2008.
- [2] J. Nacif, "Acumulación térmica para un sistema solar de calefacción activo", Tesis de licenciatura, FCFM, UCH, Santiago, 2011.
- [3] A. Oliver, "Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios", Tesis doctoral, E.T.S Arquitectura, UPM, Madrid, 2009.

K. Janampa.

- [4] A. Grande, “Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura”, Tesis de maestría, ETSI, US, Sevilla, 2016.
- [5] E. Rodríguez, “Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y traslúcidas”, Tesis doctoral, E.T.S Arquitectura, UPM, Madrid, 2015.
- [6] A. Macía-Gómez, J. Parra-Alvarez, y F. Chejne-Janna, “Análisis de un sistema de almacenamiento de energía térmica usando cloruro de magnesio hexahidratado”, *Rev. fac. ing. Antioquia*, no. 51, pp. 34–43, feb. 2010.
- [7] A. Ochoa, “Evaluación de parafina comercial como material de cambio de fase para almacenamiento de energía”, Tesis de maestría, Fac. de ing., Unilibre, Bogotá, 2016.
- [8] P. Gopi, T. Balusamy, S. Palanisamy, y P. Raj Shano, “Experimental Analysis of a natural convection mode solar dryer integrated with heat storage unit”, *Adv. Nat. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 6 S1, pp. 461–467, 2017.
- [9] R. Torres-Gallo, P. Miranda-Lugo, y K. Martínez-Padilla, “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”, *Tecnol.*, vol. 20, no. 39, pp. 71–83, may. 2017.
- [10] A. Campos-Celador et al., “Design of a finned plate latent heat thermal energy storage system for domestic applications”, *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 300–308, 2014.
- [11] A. Sánchez, “Influencia del tipo y nivel de mallado sobre el valor y la ubicación de los puntos calientes de un devanado de un transformador de potencia”, Tesis de licenciatura, ETSIIIT, UniCan, Cantabria, 2016.
- [12] Grammer Solar (2018). Sistemas solares de aire caliente para el secado de productos agrícolas en Chile [Online]. Available: https://www.grammer-solar.com/images/Chile/develoPPP_SecadoSolarChile2018_ohne-Anhang.pdf
- [13] L. Blanco y L. Valldecabres, (2016, Febrero). Guía para el desarrollo de proyectos de secado solar en comunidades rurales [Online]. Available: <https://energiasinfronteras.org/wp-content/uploads/2020/03/GuiaSecadoV3.pdf>
- [14] M. Moscoso, “Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura”, Tesis de maestría, ETSAB, UPC, Barcelona, 2016.
- [15] A. Olivares y G. Torres, “Caracterización de un sistema de calentamiento de aire por medio de energía solar con almacenamiento energético”, Tesis doctoral, Fac. de ing. y Arq., UCA, El Salvador, 2010.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe