

SIMULACIÓN TÉRMICA DE UN ACUMULADOR CON PARAFINA MEDIANTE COMSOL MULTIPHYSICS PARA UNA COCINA SOLAR

Kléber Janampa Quispe, Octavio Cerón Balboa

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

Programa de Física Aplicada – Área: Energías Renovables

E-mail: kleber_jq@yahoo.es

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y evalúa el comportamiento térmico de un acumulador solar térmico con parafina como material de cambio de fase mediante el uso del COMSOL Multiphysics 5.3. El diseño parte del concepto de disponer unidades modulares con una estructura rectangular compacta, en las que se evalúa la influencia térmica del espesor del módulo y el tamaño de las aletas internas y/o externas. Se resuelve los procesos de transferencia de calor a través del acumulador, en 3D y en condiciones estacionarias, considerando una de las bases del módulo a temperatura constante. El análisis de las distribuciones de temperatura obtenidas a través de las opciones gráficas del COMSOL, ha permitido determinar las dimensiones geométricas como el espesor del módulo y las aletas que optimizan la transferencia de calor desde el interior del acumulador hacia el fluido caloportador que es el aire circundante. Se propone dos configuraciones geométricas de acumulador térmico de 30 cm x 30 cm x 3 cm, que incorpora aletas internas para mejorar la conductividad térmica en el módulo debido a la baja conductividad térmica de la parafina; el primer módulo dispone aletas internas de 25 mm y el segundo, aletas internas y externas de 25 mm.

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

THERMAL SIMULATION OF AN ACCUMULATOR WITH PARAFFIN THROUGH COMSOL MULTIPHYSICS FOR A SOLAR KITCHEN

ABSTRACT

In the present work, the thermal behavior of a paraffin-based solar thermal accumulator is designed and evaluated as a phase change material using COMSOL Multiphysics 5.3. the design is based on the concept of modular unit devices with a compact rectangular structure, in which the thermal influence of the module thickness and the size of the internal and / or external fins is evaluated. The heat transfer processes through the accumulator are solved, in 3D and under stationary conditions, on a modulus base at constant temperature. The analysis of the temperature distributions obtained through the COMSOL graphic options, has allowed determining the geometric dimensions such as the thickness of the module and the fins that optimize the transfer of heat from the interior of the accumulator to the heat transfer fluid, which is air. Surrounding Two geometric configurations of 30 cm x 30 cm x 3 cm thermal accumulator are proposed, which incorporate internal fins to improve the thermal conductivity in the module due to the low thermal conductivity of the paraffin; the first module has 25mm internal fins and the second module has 25mm internal and external fins.

Keywords: Thermal accumulator, phase change material, solar cooker.

INTRODUCCIÓN

La energía solar es un recurso dependiente del tiempo, es decir estacional, concordante con ello los requerimientos de energía solar también son dependientes del tiempo y muchas veces no coinciden la disponibilidad del recurso solar con la demanda de energía (Nacif, 2011), por lo que los sistemas basados en energía solar, muestran limitaciones asociadas con la entrega de energía, lo que causa un rendimiento inestable y diseños poco confiables. Estas variaciones dependen de las condiciones climáticas propias de cada zona (Ochoa, 2016), fluctuaciones que contribuyen a la inestabilidad en la cantidad de energía disponible (Escobar et al, 2017). Específicamente las aplicaciones de cocinas solares muestran su mayor dependencia temporal del sol, por lo que hay la necesidad de incorporar sistemas de almacenamiento de energía, acumuladores térmicos que permitan estabilizar el requerimiento de energía para la cocción de alimentos. Para determinar las características morfológicas y térmicas del acumulador existen herramientas computacionales que permiten simular el comportamiento del sistema, en donde se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo y observando los

efectos que esas alteraciones generan en el comportamiento del acumulador, se permite determinar el diseño y/o geometría que permita optimizar la transferencia de calor desde el interior del acumulador hacia el exterior.

En el presente trabajo se diseña y evalúa dos prototipos de acumulador solar térmicos que puedan ser utilizados en una cocina solar. El acumulador utiliza la parafina comercial de Ayacucho como material de cambio de fase (PCM).

Se asume el modelo físico que describe los mecanismos de transporte de calor en el acumulador, las ecuaciones diferenciales resultantes de la transferencia de calor, se resuelve numéricamente utilizando COMSOL Multiphysics 5.3. La selección del modelo físico y el dibujo de la geometría se realizan en 3D y se considera un flujo de transferencia de calor en condición estacionaria, asumiendo que la base inferior del módulo permanece a una temperatura constante de 100° C. Se estudia la capacidad de transferencia de calor por convección, conducción y radiación del módulo hacia el aire exterior; de acuerdo a los resultados obtenidos, que se muestran a través de herramientas gráficas de curvas o superficies de corte de interés, se evalúa las distribuciones de temperatura parametrizadas en función a características geométricas, como el espesor del módulo y altura de las aletas. En base a ello, se definen las dimensiones geométricas que optimiza la transferencia de calor del módulo. Se propone dos diferentes configuraciones geométricas de acumuladores térmicos con parafina, que se caracterizan por ser de estructura rectangular compacta cuyas dimensiones modulares son de 30 cm x 30 cm x 3 cm y modular. Como espesor apropiado del módulo se ha asumido 3cm para evitar mayor estratificación de la parafina y su fácil construcción, las aletas internas compensan la baja conductividad térmica de la parafina y las aletas externas para mejorar la transferencia radiativa y convectiva. El primer prototipo de acumulador diseñado dispone aletas internas de 25 mm espaciadas a 3.7 cm y el segundo prototipo contiene aletas internas y externas de 25 mm las aletas. El COMSOL ha alcanzado un nivel de sofisticación por las diversas herramientas que ofrece y que permite resolver problemas multifísicos (Pryor, 2011, mencionado por Fernández 2012).

A la actualidad, se han desarrollado diversas aplicaciones del COMSOL tanto en la ciencia e ingeniería. En el campo de las aplicaciones solares, se tiene por ejemplo: La simulación multifísica del secado de madera en COMSOL Multiphysics 3.4 realizado por Sandoval et al (2012). Arias et al (2012) realizan un modelado de un colector solar plano de aire con Comsol Multiphysics. En Chile Acuña (2012) desarrolla un modelo de un sistema tipo muro trombe para calefacción solar, en el cual crea un modelo termo-fluidodinámico para el flujo de aire al interior del canal de colección de energía y en el espacio habitable de un sistema Tipo Muro Trombe convencional utilizando el COMSOL. Campos et al (2014) desarrolla módulos rectangulares compactos en aluminio con aletas internas. En el Perú, en la Universidad Nacional del Altiplano de Puno se desarrolló la tesis de pre grado que simula mediante COMSOL MULTIPHYSICS, la calefacción de un ambiente familiar tipo rural del departamento de puno, mediante el sistema muro trombe (Anara, 2017).

MATERIAL Y MÉTODO

Método

La simulación del comportamiento térmico del módulo de acumulador solar térmico, se realiza mediante el software COMSOL MULTIPHYSICS que se basa en el método de solución de ecuaciones diferenciales planteadas mediante elementos finitos; la física establecida por COMSOL permite un análisis acoplado, personalizado y proporciona una cantidad significativa de funcionalidades en la modelación. El modelo físico planteado, considera un acumulador solar térmico rectangular de cobre que contiene parafina como material de cambio de fase, en la que se estudia el proceso transferencia de calor en condiciones estacionarias, en base a los resultados de la distribución de temperatura que optimicen el proceso de acumulación y de su capacidad de transferencia de calor al aire circundante, se determina la configuración geométrica apropiada.

Se siguieron los siguientes procesos:

- Se caracteriza la morfología del acumulador con material de cambio de fase (Parafina), en base al diseño de dos prototipos de unidades básicas.
- Se define la física del problema, selección de materiales y se establecen las condiciones iniciales y de frontera. Luego se hace el mallado para la solución de las ecuaciones diferenciales; se resuelve y se visualizan los resultados.
- Se evalúa la distribución de temperatura en el acumulador, caracterizando el grado de influencia de parámetros geométricos como el espesor del módulo, altura de las aletas internas y externas, que optimicen la transferencia de calor del acumulador.
- Se simula el comportamiento térmico de los módulos PCM en el interior de la cámara que representa la cámara de cocción de una Cocina solar tipo caja.

- Luego, se evalúa y contrasta los parámetros térmicos de funcionamiento de los módulos de acumulador térmico entre los resultados obtenidos de la simulación del COMSOL y datos experimentales.

Materiales e Instrumentos

Para la simulación térmica se usa el software COMSOL MULTIPHYSIC 5.3. Para la construcción de los módulos prototipo se ha utilizado placas de cobre de 2 mm, parafina comercial de Ayacucho y pintura negro mate. Para la evaluación térmica se ha utilizado los siguientes instrumentos: Radiómetro: UNI-100mV $\approx 1000\text{W}/\text{m}^2$, con lectura mínima de $10\text{ W}/\text{m}^2$; 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: 0.001 A ; Medidor de conductividad térmica KD2 Pro.

RESULTADOS Y DISCUSION

1. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO

Para definir las dimensiones de los módulos de acumulador térmico propuestos, se simula el comportamiento térmico del módulo relacionando a sus parámetros geométricos que optimicen la transferencia de calor, acumulada en la parafina hacia el fluido caloportador (aire), que se realiza mediante el software Comsol Multiphysics 5.3.

1.1 Creación del modelo y selección de la dimensión

Se apertura el software, seleccionando el tipo de modelo. Para la aplicación se elige el “Asistente de modelo”, a través del cual se determina la configuración de la dimensión espacial como 3D.

1.2 Selección de la física y el tipo de estudio

Se selecciona la interfaz de “Transferencia de calor en sólidos”. El tipo de estudio seleccionado es el estacionario, y cuando fue necesario se realizó el barrido paramétrico de ciertas variables definidas; así mismo en algunos casos se programa el estudio temporal.

1.3 Definición de parámetros y variables

Definimos los parámetros que se van a utilizar para controlar el modelo, como el espesor del módulo y el espesor o altura de las aletas internas y externas. El valor de los parámetros para las condiciones iniciales es básicamente temperatura ambiente 20° C , temperatura de referencia en una de las bases del módulo 100° C , etc.

1.4 Selección de la geometría

Para determinar la geometría más apropiada del acumulador solar térmico, tomamos de referencia los aportes desarrollados por Campos et. al. (2014) que menciona de todas las posibles combinaciones entre formas y técnicas de sistemas de almacenamiento térmico en general, las placas rectangulares compactas muestran un óptimo comportamiento térmico en la transferencia de calor. Dado la baja conductividad térmica de la parafina se propone aletas internas y se incorpora también aletas externas para mejorar la transferencia de calor al aire. La estructura geométrica propuestas son de dos tipos: placas rectangulares compactas con aletas internas y otras aletas internas- externas como muestra la figura 1.

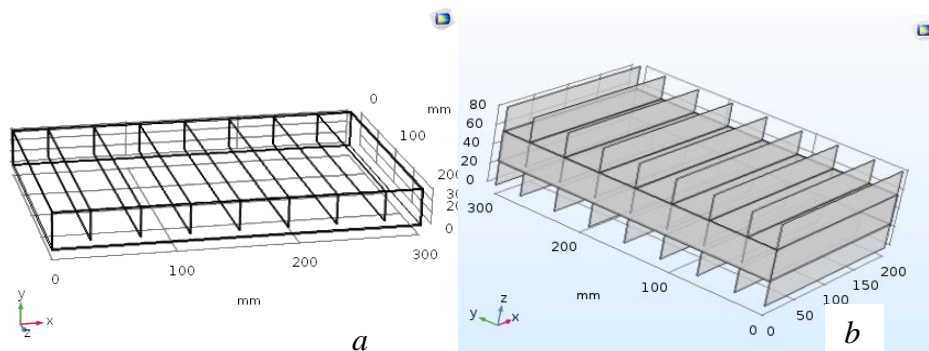


Figura 1. Dimensiones base de los dos tipos de módulos propuestos (a) con aletas internas (b) con aletas internas y externas a los extremos.

1.5 Selección de materiales

Se utiliza el banco de datos de la librería del COMSOL, de donde se elige las propiedades térmicas necesarios de los materiales considerados, cobre para la estructura del módulo, aire circundante, y las de la parafina se tomó los valores de Campos et al (2014) con los que concuerdan los valores térmicos obtenidos experimentalmente de la parafina comercial local. Estos valores fueron manualmente introducidos en la interfaz de propiedades físicas.

Tabla 1. Propiedades térmicas de la parafina utilizada en el módulo de PCM (Campos et al, 2014).

Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
Rango de temperatura para cambio de fase	T	53-61	°C
Calor latente	L_f	123.506	kJ / kg
Conductividad térmica	k	0.2	W / mK
Densidad sólida	Rho	880	kg / m ³
Densidad líquida	Rho	770	kg / m ³
Calor específico sólido	C_p	2660	J / kgK
Calor específico líquido	C_p	2340	J / kgK
Viscosidad dinámica	μ	3.705×10^{-5}	kg / ms

1.6 Definición método físico

Se estudia la capacidad de transferencia de calor a través de la estructura del acumulador al aire circundante, para lo cual se selecciona la interfaz de “Transferencia de calor en sólidos” en los que se emplea los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. La ecuación de temperatura definida en dominios sólidos corresponde a la forma diferencial de la ley de Fourier que contiene contribuciones adicionales, como la fuente de calor en la base del módulo. En esta etapa definimos las condiciones del sólido, valores iniciales, aislamiento térmico y flujo de calor.

Para simular la influencia del espesor de las placas compactas rectangulares, así como la altura de las aletas internas y externas, se considera un suministro de calor constante en la base del módulo (la cara de la base se encuentra a una temperatura constante). El calor fluye por conducción a la parafina que absorbe parte del calor y otra parte cede al aire por convección y radiación.

1.6.1 Simulación de las características geométricas del módulo

Para definir la configuración geométrica del módulo se parametriza el espesor del módulo, la longitud de las aletas interna y externa. El modelo asume la transferencia de calor desde la base del módulo considerada a 100° C, flujo de calor por convección en la superficie superior de coeficiente de convección 5.7 W/m²K para un flujo natural libre, emisividad de la superficie superior, lados laterales y aletas de 0.97 (color negro) (figura 2).

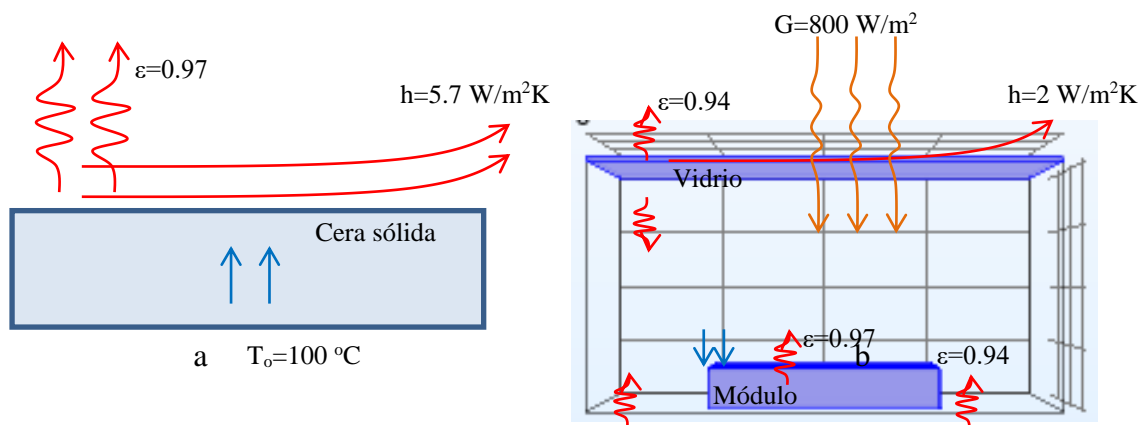


Figura 2. Condiciones iniciales sobre el módulo (a) libre (b) al interior de la cámara de la cocina solar

1.6.2 Simulación del comportamiento térmico de los módulos PCM en una cocina solar.

Para la simulación del comportamiento térmico de los módulos PCM en el interior de una Cocina solar tipo caja; se considera el módulo instalado sobre la placa colectora de la cocina solar, la cocina se comporta como una cámara de 80cmx40cmx30cm, aislada térmicamente por la base y

lados laterales; en la cara superior de la cámara tiene una cubierta de vidrio sobre la que incide una intensidad de radiación solar para el medio día solar. La figura 2-b muestra los valores iniciales con se produce el intercambio de calor, se considera incidencia normal y constante de la radiación solar de 800 W/m^2 .

1.7 Mallado del modelo

Se realiza el mallado, seleccionando una malla de elementos discretos triangulares. La malla se presenta en modo normal de acuerdo a la física planteada, figura 3.

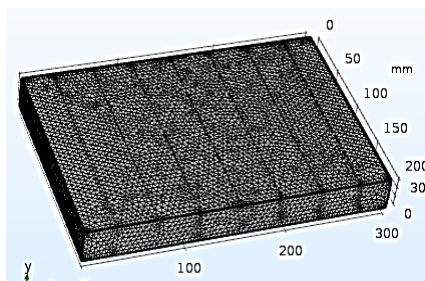


Figura 3. Mallado triangular del modelo seleccionado.

1.8 Resolución del problema

Para la resolución del problema se dispone en la barra de herramienta el botón resolver, que calcula las ecuaciones discretizadas para los diferentes elementos discretos planteados. Cuando fue necesario se eligió la solución paramétrica para evaluar la influencia de un parámetro como el espesor del módulo, o el tamaño de las aletas. También se utilizó el estudio temporal para observar la evolución de la temperatura en el módulo en función del tiempo.

1.9 Postprocesado y análisis de resultados

Resuelto el problema, el COMSOL permite visualizar los resultados a través de gráficos parametrizados linealmente, gráficos de superficie en puntos, líneas o áreas de corte.

1.9.1 Determinación del espesor del módulo PCM

Para definir el espesor óptimo del módulo se parametriza la solución en razón al espesor del módulo manteniendo constante el número de aletas. Se ha considerado como espesor inicial del módulo 10 mm y con una aleta interna de 5 mm, gradualmente se va cambiando el espesor del módulo en valores de 20 mm, 30mm hasta 60 mm y correspondientemente cambia la longitud de la aleta a 15 mm, 25 mm hasta 55 mm; en todo este proceso se mantiene constante la separación entre la aleta y la base en 5 mm. Para una temperatura de 100° C (373° K) de la placa base, se simula la variación de la temperatura en la cara superior en relación al espesor del módulo.

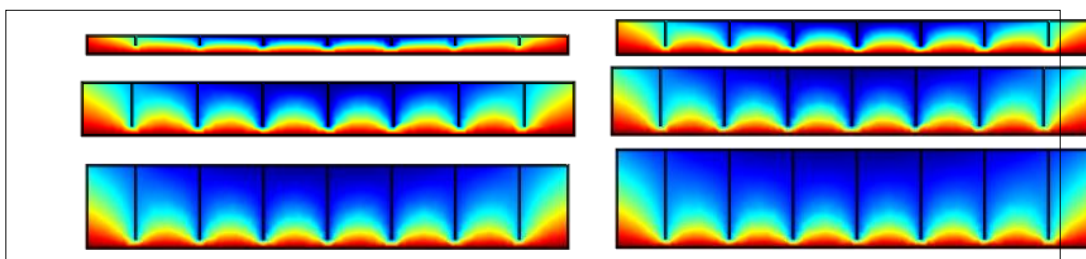


Figura 4. Distribución de temperatura en un corte vertical para diferentes espesores del Módulo PCM de 10 mm a 60 mm.

La figura 4 muestra la variación de la temperatura en corte vertical en la parte central del módulo; se encuentra que, la temperatura está más estratificada a medida que aumenta el espesor del módulo, concordante con el aumento el espesor de la parafina; dicha estratificación es debido a la baja conductividad térmica de la parafina, observándose una mayor diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior del módulo.

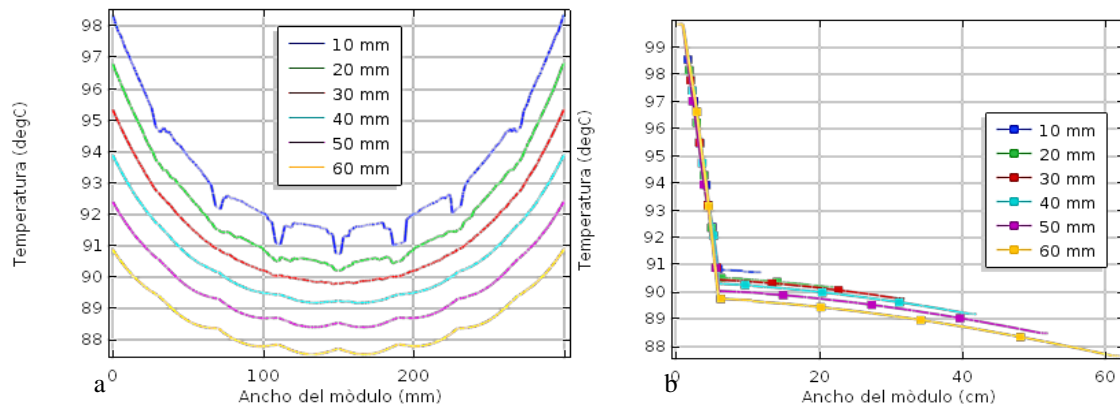


Figura 5. Distribución de temperatura en (a) la línea central horizontal en la superficie superior del Módulo (b) en la línea central vertical en la aleta interna del Módulo, en relación al espesor del módulo de 10 mm a 60 mm.

La figura 5-a muestra la variación de la temperatura en la superficie superior del módulo, a lo largo de la línea central horizontal, muestra que, para un espesor de 3 cm, la temperatura de la superficie está en el orden de 90°C y 95°C , con una diferencia de temperatura entre el centro y los extremos de 5°C . La figura 5-b, caracteriza la variación de la temperatura a lo largo de la aleta interna central en corte vertical, muestra que la temperatura en la parafina hasta 5 mm está estratificada en 9°C , en tanto **que el la aleta** hay una gradiente de 1 a 2°C entre el extremo inferior de la aleta y la superficie superior.

Los resultados anteriores, muestran que, para menor espesor del módulo hay una baja estratificación de la temperatura en la parafina encapsulada, lo que influye en la mayor capacidad de cambio de estado de la parafina; a su vez, se encuentra una mayor temperatura en la superficie superior y en las aletas, lo que indica que hay una mayor rapidez de transferencia de calor. Se toma como valor óptimo del espesor módulo PCM con parafina a 30 mm; si bien para espesores menores a 30 mm mejora la conductividad, sin embargo, presenta mayor dificultad de construirla, con la consecuente disminución de la masa de parafina y con ella, la capacidad de almacenamiento térmico. La figura 6 muestra la distribución de temperatura, la radiosidad y las superficies isométricas del módulo para un espesor de 30 mm.

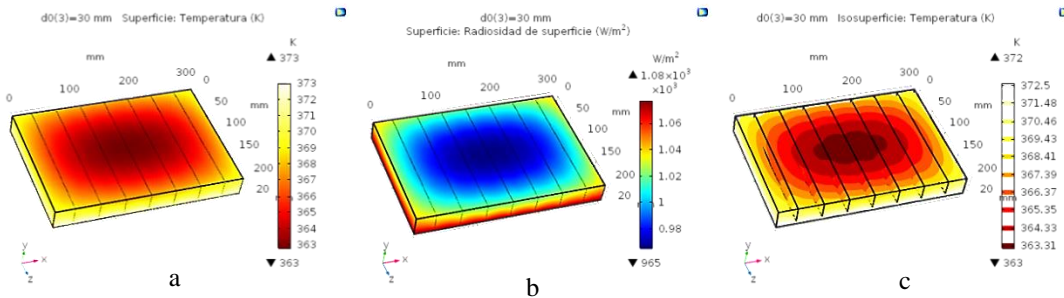


Figura 6. (a) Distribución de temperatura (b) radiosidad y (c) superficies isométricas para un espesor del módulo de 30 mm

1.9.2 Determinación del tamaño de las aletas internas del módulo PCM

Para determinar el tamaño de las aletas internas, se ha simulado la variación de la temperatura en relación a la altura de aleta interna considerando el espesor del módulo constante e igual a 3 cm, parametrizado con rango de variación de 5 mm, de 5 a 25 mm. La figura 7, muestra la variación de la temperatura en la superficie vertical de corte, se encuentra que cuanto menor sea la aleta interna hay mayor estratificación de la temperatura en la parafina, de manera que cuanto mayor es la aleta mejora la conducción térmica a través de ella hacia el exterior.

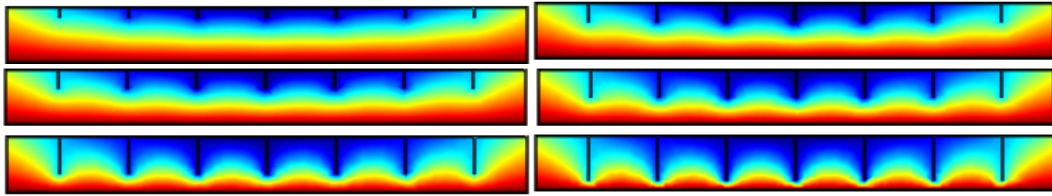


Figura 7. Distribución de temperatura en un corte vertical para diferentes longitudes de la aleta interna de 5 mm a 25 mm.

La figura 8-a, muestra que la temperatura de la superficie del módulo es mayor cuanto mayor sea la longitud de la aleta interna, se encuentra que para 25 mm la temperatura en la superficie varía entre 363 K y 368 K (90° C y 92° C). La figura 8-b, caracteriza la variación de la temperatura a lo largo de la línea central vertical en la aleta, cuando la aleta interna es de 25 mm la temperatura está en el orden de 90° C, mientras que para 5 mm está entre 86° C.

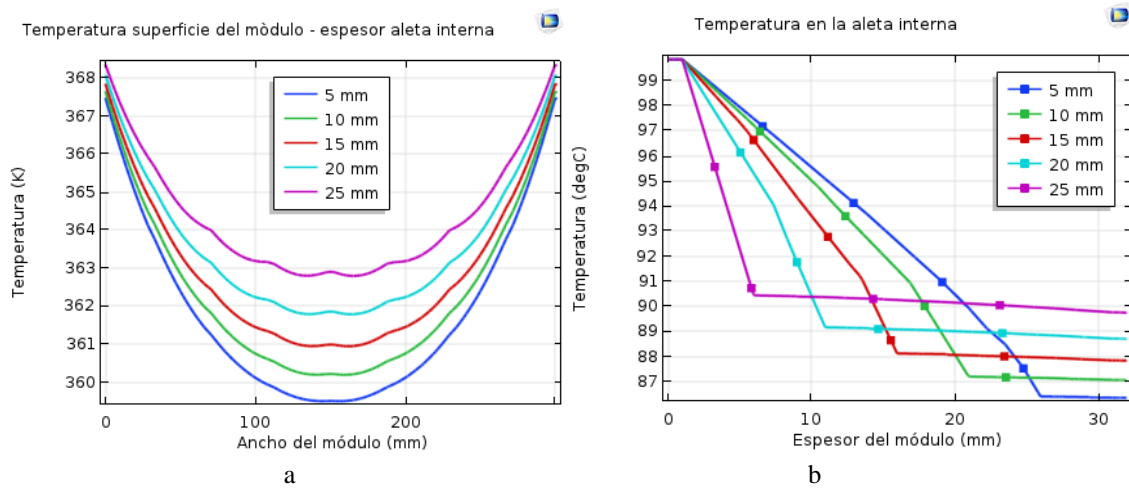


Figura 8. Variación de la temperatura en (a) una línea central horizontal en la superficie del módulo (b) una línea central vertical en la aleta, a razón de la variación de la altura de la aleta de 5 a 25 mm.



Figura 9. Variación de la temperatura en un punto ubicado en el interior del PCM a 20 mm de la base en razón al tamaño de la altura de la aleta interna.

De la figura 9, se tiene la temperatura de un punto de la parafina ubicado en el interior del módulo a 20 mm de la base en relación al tamaño de la altura de la aleta interna, se verifica que la temperatura de dicho punto aumenta más rápidamente con la mayor altura de la aleta interna. Los resultados, permiten asumir que a medida que aumenta el tamaño de la aleta, la temperatura de la superficie del módulo es mayor, dado que las aletas facilitan la conducción térmica a través de ella, lo que permite la menor estratificación de la temperatura del material de cambio de fase, consecuentemente, habría una menor estratificación de estados de agregación sólido líquido del material y que permanezca por mayor tiempo en dicha condición. Estos resultados permiten determinar como la longitud adecuada de la aleta interna 25 mm.

1.9.3 Determinación del tamaño de las aletas externas del módulo PCM

Se dimensiona una unidad básica de acumulador de cambio de fase, con estructura de cobre de 20cmx30cmx3cm y aletas internas de 25 mm lleno de parafina, al cual se incorpora aletas externas, cuya influencia en el comportamiento térmico del módulo, se determina haciendo variar la altura de las aletas en un rango de 5mm de 10 a 35 mm.

La figura 10-a, muestra la distribución de temperatura a lo largo de una línea horizontal en la superficie superior del módulo paralela al ancho del módulo de 30 cm; para 25 mm de altura de la aleta exterior, la temperatura del centro del módulo es de 86.5° C y en los extremos de la línea de referencia es de 95° C (variación de 8. 5° C). Para 35 mm de la altura de la aleta externa la temperatura de la superficie varía entre 85° C y 95° C (variación de 10° C), en tanto que para 10 mm se encuentra un variación de temperatura de la superficie entre 88.5° C y 95° C (variación de 6.5° C). De acuerdo a la figura 10-b, la variación de la temperatura a lo largo de la línea vertical en la aleta central del módulo, muestra que la temperatura en las aletas va disminuyendo en relación al aumento de la altura de la aleta externa del Módulo PCM.

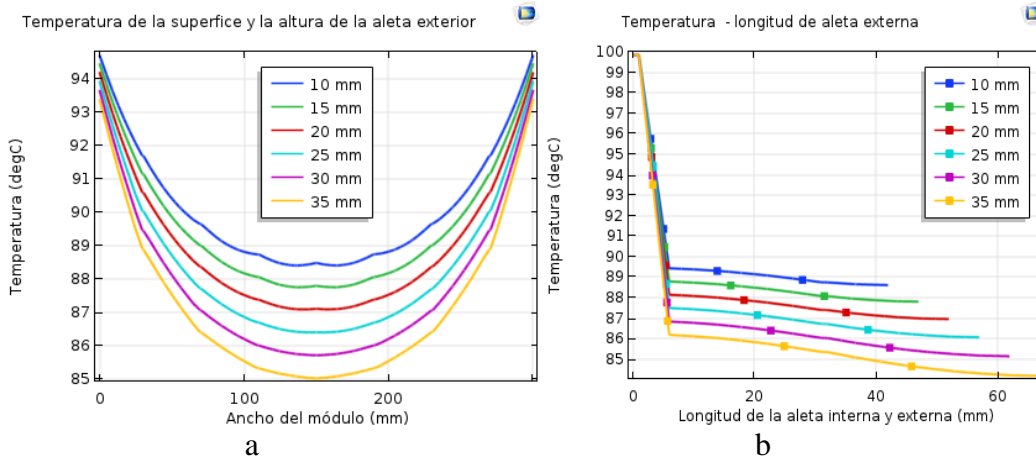


Figura 10. Variación de la temperatura en (a) una línea horizontal central en la superficie superior y (b) una línea vertical en la aleta central del módulo, en relación a la variación de la altura de la aleta externa del Módulo PCM.

El hecho que la temperatura en la superficie superior del módulo sea menor con el aumento de la altura de la aleta externa, es porque aumenta el área efectiva de convección y radiación; el área de la superficie superior del módulo es 600 cm², para la aleta de 1cm de altura se aporta un área adicional de 280 cm² en todas las aletas (7 aletas espaciadas simétricamente), para 1.5 cm 420 cm² y para 2.5 cm el área efectiva de convección es de 700 cm² con la que incrementa el área de transferencia en 1.2 veces más, para 3 cm incrementa en 1.4 y con 3.5 cm, 1.8 veces más. Sin embargo, se determinó como altura óptima de las aletas externas la longitud de 25 mm, por criterios simétricos y de material, dado que no hay una mayor diferencia de temperatura por ejemplo para alturas de 30 y 35 mm de la aleta.

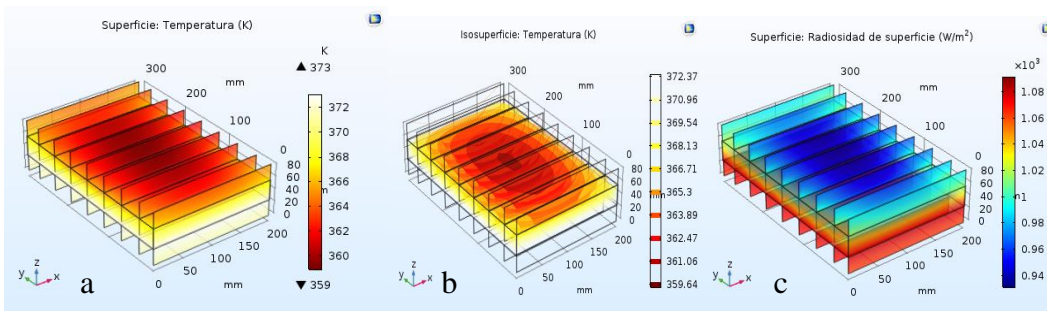


Figura 11. (a) Distribución de temperatura, (b) isosuperficies térmicas y (c) la radiosidad de superficie. Módulo de aletas externas (25 mm) en ambas bases.

De acuerdo a los resultados anteriores, se dimensiona un módulo con PCM de parafina con aletas externas de 25 mm a ambos lados de la base superior e inferior del módulo. La figura 11 ilustra la distribución de temperatura, isosuperficies térmicas y la radiosidad de superficie sobre el módulo para aletas externas en ambas bases del módulo.

1.9.4 Determinación del comportamiento térmico del módulo PCM en una cocina solar.

Los módulos con PCM diseñados, el primero que sólo dispone de aletas internas y el segundo que además tiene aletas externas en ambas bases, se coloca al interior de una cámara de 40 cm x 80 cm x 30 cm aislada térmicamente por los lados y base, ubicada sobre la placa colectora metálica negra y expuesta por la parte superior a la incidencia de radiación solar normal de 800 W/m^2 que atraviesa una cubierta de vidrio, en las condiciones estacionarias se evalúa el comportamiento térmico del módulo y del ambiente interior de la cámara.

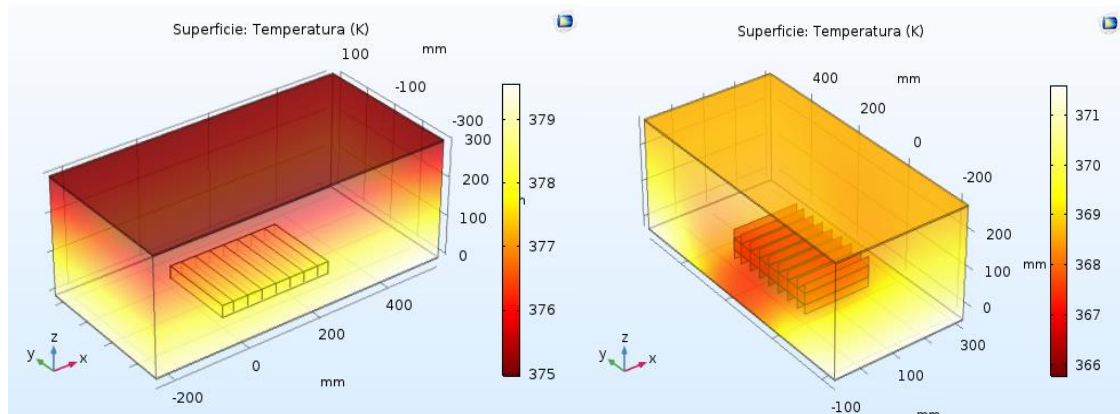


Figura 12. Dimensiones de la cámara y el gráfico de colores de la distribución de temperatura en el interior de la cámara con el módulo PCM que tiene sólo aletas internas y el que dispone aletas internas-externas.

La figura 12, muestra las dimensiones de la cámara y el gráfico de colores de la distribución de temperatura en el interior de la cámara de los prototipos de módulos. La figura 12, muestra la distribución de temperatura sobre una sección de corte vertical en el centro de los módulos, se deduce que la temperatura de la placa colectora es mayor y va disminuyendo gradualmente en el aire sobre el módulo PCM.

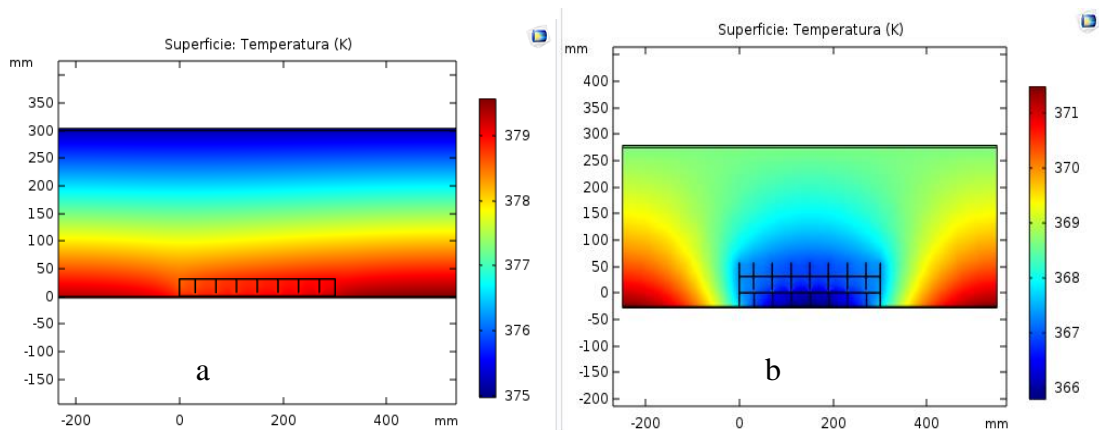


Figura 12. Distribución de temperatura sobre una sección de corte vertical en el centro del módulo (a) módulo con aletas internas (b) módulo con aletas internas-externas

Para aplicaciones térmicas como las cocinas solares, se necesita conocer la distribución de temperatura en la placa colectora que transmitirá calor a los recipientes de cocción y al aire circundante. La figura 13 indica la distribución de temperatura en líneas de corte vertical desde el centro del módulo, sobre la aleta central, sobre la parafina y sobre dos puntos de la placa colectora separados cada 100 mm. Para el módulo de aletas internas, se muestra que la temperatura sobre la

aleta es aproximadamente constante del orden de 105.7°C y que sobre el aire va disminuyendo linealmente hasta 102°C . Para el módulo de aletas internas-externas, la temperatura sobre la aleta central es aproximadamente constante del orden de 93.7°C ligeramente menor a la parafina circundante. La temperatura de la placa es mayor a la del módulo y gradualmente va disminuyendo la temperatura del aire circundante hasta 95.5°C , valores obtenidos para una intensidad de radiación solar 800 W/m^2 .

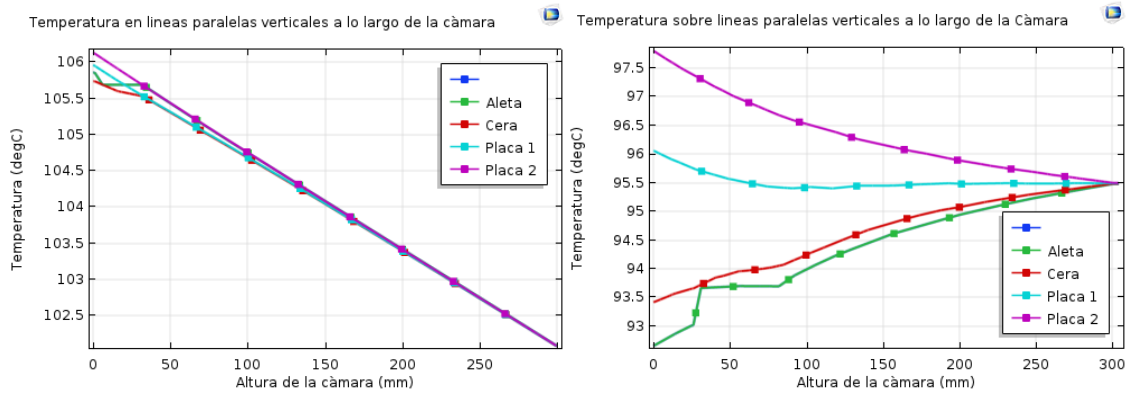


Figura 13. Distribución de temperatura en líneas de corte vertical desde el centro del módulo sobre una aleta y separados cada 100 mm, a lo largo de la longitud de la cámara

De la figura 14, se obtiene la distribución de temperatura sobre líneas horizontales paralelas a la longitud de la cámara de 60 cm y para alturas de 2, 32, 62 a 152 mm desde el centro del módulo, se muestra para el módulo que dispone sólo de aletas internas que, la temperatura media sobre la placa colectora está en el orden de 106°C y es mayor a la temperatura media del módulo, la temperatura del aire está estratificada disminuyendo hasta 104°C . Para el módulo de aletas internas-externas, la temperatura en el módulo es menor en 4°C que la placa y la del aire está estratificada hasta alcanzar un valor de 95.5°C en la parte superior de la cámara.

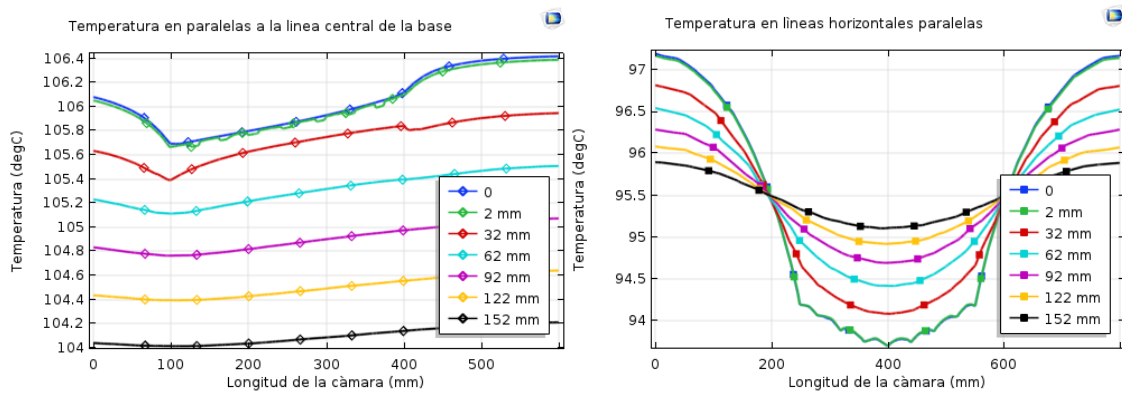


Figura 14. Distribución de temperatura sobre líneas horizontales paralelas a la longitud de la cámara de 60 cm, a alturas de 2, 32, 62 a 152 mm desde el centro del módulo.

2. COMPARACION CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la evaluación experimental del comportamiento térmico de los módulos diseñados, se han construido los prototipos en base a una estructura de cobre rectangular compacta de $30\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 3\text{ cm}$, aletas internas y/o externas de 2.5 cm y pintado de negro mate conteniendo un kilogramo de parafina comercial de Ayacucho lleno hasta un 80% de su volumen.



Figura 15. (a) Módulo con PCM con aletas internas-externas (b) Módulo con PCM con aletas internas. (c) Cocinas solares de igual dimensión y comportamiento térmico.

Para contrastar los resultados obtenidos de la simulación en COMSOL MULTYPHISICS con la experimentación, se ha medido datos de la evolución temporal de la temperatura sobre puntos de la superficie superior e inferior del módulo.

2.1 Módulos con la base expuesta a temperatura constante (91° C)

Para la parte experimental se controla la temperatura constante de la base del módulo exponiendo a agua hirviendo en las condiciones de Ayacucho, que corresponde a 91° C, resultados que se comparan con la solución en COMSOL en las mismas condiciones iniciales.

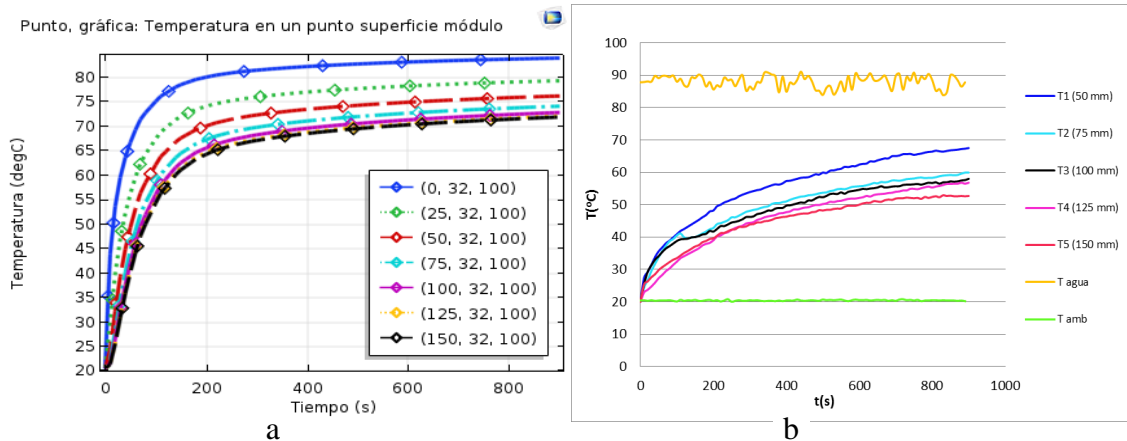


Figura 16. Variación de la temperatura en puntos de la línea horizontal central en la superficie superior del módulo. (a) Comsol Multiphysics y (b) experimental

La figura 16, muestran el perfil de temperatura en puntos correspondientes a la línea central de la superficie superior del módulo PCM con aletas internas, en puntos distribuidos del extremo en un rango de 25 mm de 25 a 150 mm, cuando la base inferior permanece constante. Los resultados muestran 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; por ejemplo, la temperatura a 50 mm es de 75° C obtenido de COMSOL y de 70° C experimentalmente al cabo de 1000s.

2.2 Módulos expuestos libremente a radiación solar directa.

Los módulos con aletas internas y/o externas son expuestos a una intensidad de radiación solar directa media de 1050 W/m², que se controla cuando la incidencia se da alrededor del mediodía solar y el COMSOL simula para la latitud local y la fecha de experimentación.

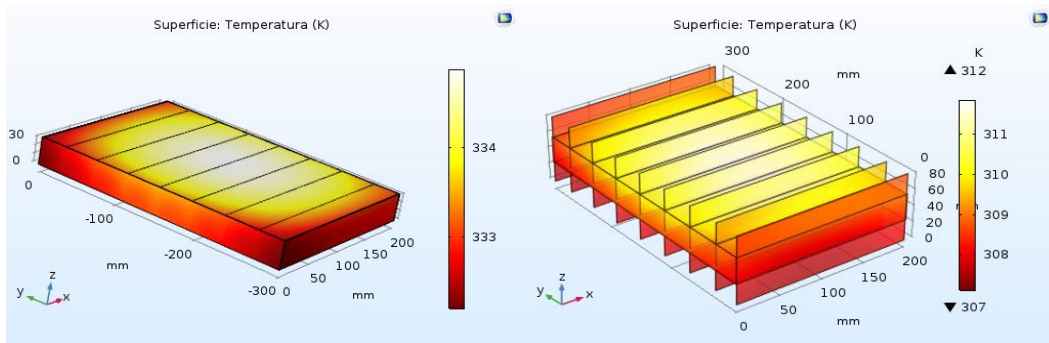


Figura 17. Distribución de temperaturas y las isosuperficies de los módulos con aletas internas y/o externas expuestas a radiación solar libre de 1050 W/m^2 (COMSOL).

La figura 17 muestra la distribución de temperatura de colores de ambos módulos, se puede observar que en el módulo con aletas internas alcanza una temperatura máxima de 334 K y en el otro módulo, 311 K , determinado por COMSOL en condición estacionaria. La figura 18, corresponde a la evolución temporal de las temperaturas en el centro de la base y la superficie superior del módulo con aletas internas, expuestas a radiación solar libre media de 1050 W/m^2 , obtenido por el COMSOL.

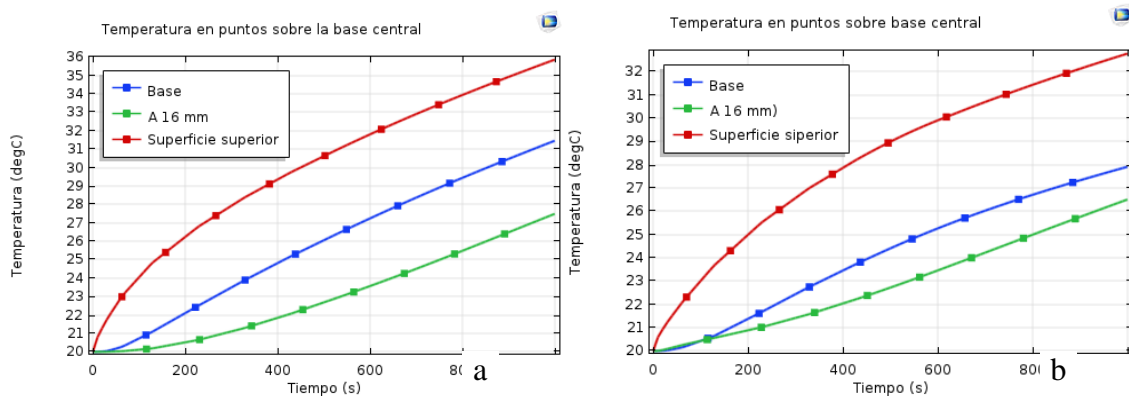


Figura 18. Evolución temporal de la distribución de temperaturas en el centro de la base y la superficie superior del módulo con (a) aletas internas (b) aletas internas-externas; expuestas a radiación solar libre, obtenido por el COMSOL MULTHYPPISIC.

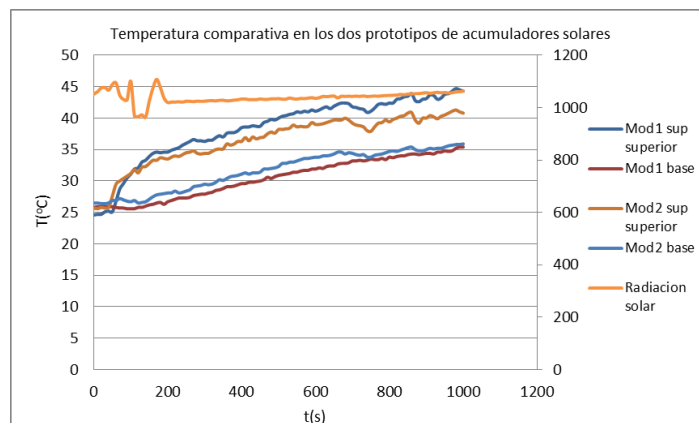


Figura 19. Temperaturas en el centro de la base y la superficie superior del módulo con aletas internas (Mod 1) y del módulo con aletas internas-externas (Mod 2) expuestas a radiación solar libre, obtenido experimentalmente (11/03/20)

Las figuras 18 y 19, indica que los valores registrados experimentalmente sobre la evolución temporal de la temperatura en un punto central de la base y superficie superior de los módulos, tienen una tendencia de comportamiento equivalente con lo que muestra COMSOL; por ejemplo, la temperatura en la base, al cabo de 1000 s son 36° y 33° C para el módulo con aletas internas y el de aletas internas-externas

respectivamente, y experimentalmente se obtienen 36° y 35° C para los módulos mencionados. La temperatura que muestra COMSOL en la superficie superior del módulo, al cabo de 1000s, son 41° y 37° C para el módulo con aletas internas y el de aletas internas-externas respectivamente, y experimentalmente se obtienen 45° y 40° C para los módulos mencionados. Diferencias que puede deberse a la intensidad de radiación que experimentalmente ha oscilado entre 1000 a 1100 W/m².

2.3 Módulo con aletas internas ubicado al interior de la cocina solar y expuesta a radiación solar media de 800 W/m².

La figura 20, muestra la variación de la temperatura en un punto central de la superficie superior del módulo, de un punto en la base inferior y la temperatura del aire a 20 cm sobre la superficie superior del módulo. Se encuentra, que la temperatura del aire en 1000s alcanza el valor de 58° C en el COMSOL y experimentalmente se obtiene 65° C; en el centro de la superficie superior la temperatura obtenido por el COMSOL es 50° C y experimentalmente 55° C y en la base del módulo el COMSOL muestra un valor de 47° C y experimentalmente 42° C, nuevamente podemos resaltar la correspondencia entre lo simulado en COMSOL y lo obtenido experimentalmente, las diferencias pueden corresponder al mayor valor de la radiación solar que oscila entre 790 y 850 W/m².

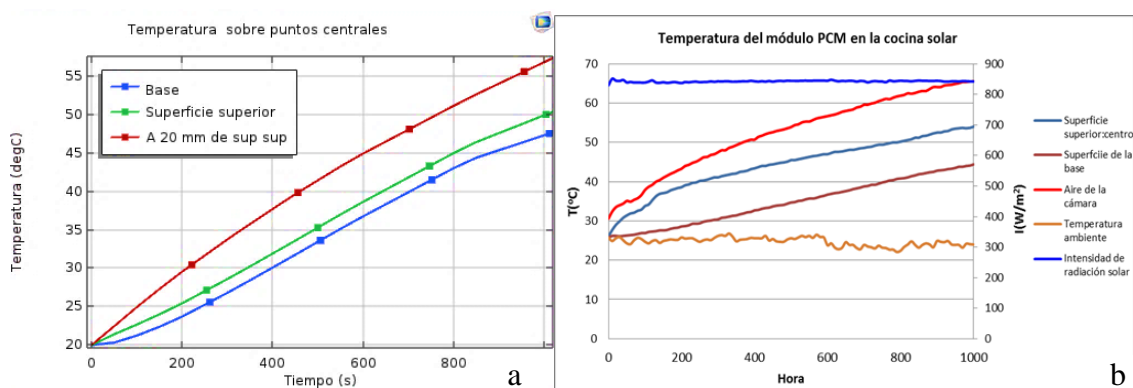


Figura 20. Temperatura en el punto central de la superficie superior, la base del módulo con aleta interna y en el aire interior de la cámara de cocción a 20 de la superficie superior (a) COMSOL (b) experimentalmente.

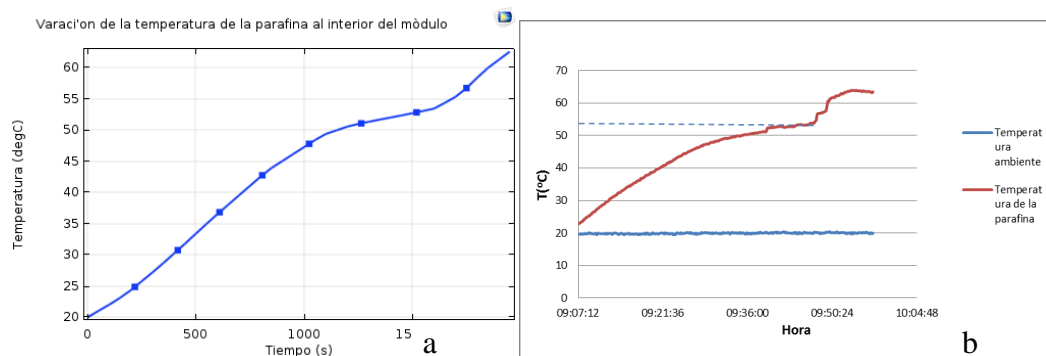


Figura 21. Variación de la temperatura de la parafina en un punto interior del módulo con aletas internas, que muestra el proceso de cambio de estado (a) del COMSOL (b) experimentalmente.

Un resultado resaltante es la evolución de la temperatura de un punto de la parafina al interior del módulo con aletas internas, que muestra el proceso de cambio de estado de la parafina indicando la temperatura de fusión, se puede observar que el COMSOL predice adecuadamente el proceso, equivalente al resultado experimental (figura 21).

DISCUSIÓN

Para determinar el diseño de los prototipos de acumulador solar térmico se elige como material de cambio de fase la parafina comercial, por las características térmicas apropiadas que lo configuran como un material PCM, temperatura de fusión es de 53° C, calor latente de fusión 123.5 kJ/kg, calor específico en fase sólida 2660 J/kg K y en fase líquida 2340 J/kg K y conductividad térmica de 0.2 W/m K (Campos et al, 2014). La parafina tiene la

desventaja de su baja conductividad térmica y limita la acumulación de energía térmica del módulo en torno a la temperatura de fusión de la parafina de 53° C a 60° C, que corresponde a aplicaciones de mediana temperatura entre 15-90°C (Grande, 2016) rango en la que se encuentran las aplicaciones solares.

El diseño del acumulador térmico, parte de la concepción de establecer una estructura modular de placa rectangular compacta que encapsule la parafina; el carácter modular permitirá combinar la disposición de ellas según el requerimiento energético y se pueda adaptar al espacio disponible en los sistemas solares térmicos.

El diseño de las características geométricas del módulo, se desarrolló en base a la simulación del comportamiento térmico de los módulos mediante el software Comsol Multiphysics 5.3. Para contrarrestar la baja conductividad térmica de la parafina, se incorpora aletas rectangulares al interior del módulo, además se incorpora aletas externas, para mejorar la transferencia de calor al aire circundante. Se determina el espesor del módulo y el tamaño de las aletas internas y externas, cuando optimiza la transferencia de calor desde la base (100° C, constante). Los resultados que muestra la figura 5, han permitido establecer el espesor del módulo en 30 mm, dado que a mayor espesor se ve mayor estratificación de la parafina y para menores espesores habría menor masa de parafina y, consecuentemente menor capacidad de acumular energía. La figura 8 muestra, que el espesor o altura óptima de las aletas internas es de 25 mm dado que disminuye la estratificación de la parafina y mejora la transferencia de calor. Para la altura de las aletas externas, la figura 10 muestra que, a mayor altura mejora la transferencia de calor por radiación y convección hacia el aire circundante, por lo que se toma como altura de las aletas externas 25 mm.

Se desarrolla dos tipos de módulos PCM, uno que dispone sólo de aletas internas y otro con aletas internas-externas. Las dimensiones de los módulos son equivalentes, contienen 1 kg de parafina, que acumula 0.06 kWh de energía térmica en calor sensible y latente cuando se calienta de 20° C a 56° C, su densidad de energía por unidad de volumen es 51.81 kWh/m³ para operar a temperatura de 53° C a 60° C. Comparando con modelos desarrollados por otros autores para ver su efectividad, encontramos, el modelo de Campos et al (2014) que es 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. Otro modelo que se hace referencia en Moscoso (2016), son módulos de aluminio con aletas externas de la empresa Climator de dimensiones superiores al propuesto en el presente trabajo. Igualmente, Moscoso (2016) 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; compuestas por dos placas de aluminio.

La comparación de los resultados obtenidos mediante el COMSOL y los datos medidos experimentalmente en las condiciones más próximas a lo dimensionado, permiten validar el modelo físico planteado en Comsol Multiphysics 5.3, dado que muestra un comportamiento equivalente del perfil de temperaturas en puntos tomados de referencia medidos experimentalmente (Figuras 16 al 21).

Como conclusión podemos establecer:

1. La simulación en condiciones estacionarias de la transferencia de calor, en el acumulador solar térmico con parafina; mediante el software COMSOL MULTIPHYSICS 5.3, han permitido obtener un conjunto de herramientas gráficas para analizar y evaluar la distribución de temperaturas en las distintas componentes del módulo para definir las características geométricas que optimicen la transferencia de calor del material acumulador PCM al aire como fluido caloportador.
2. Se ha diseñado dos prototipos de acumulador solar térmico con parafina como material de cambio de fase, la estructura geométrica se caracteriza por ser rectangular compacta y modular, se propone una estructura metálica de cobre de 30 cm x 20 cm x 3 cm. Un prototipo dispone únicamente de aletas internas de 25 mm. El segundo prototipo dispone además de aletas externas de 2.5 cm dispuestas simétricamente a una distancia de 3.7 cm una de otra. Cada módulo encapsula 1 kg de parafina, garantizando una acumulación de energía térmica hasta el punto de fusión del orden de 0.06 kWh por módulo y densidad de energía de 51.81 kWh/m³. El prototipo que se acondiciona mejor a las cocinas solares es el que presenta sólo aletas internas por su rapidez en la acumulación energética y el mayor valor de la temperatura media alcanzado del aire de la cámara 104°C y en de aletas internas-externas 96° C, éste segundo módulo estaría más apropiado para secadores solares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña Zapata, F.E. (2012). Modelo de un sistema tipo muro trombe para calefacción solar. Universidad de Chile.
- Anara Curasi, R. (2017). Simulación mediante un software, la Calefacción de un ambiente familiar tipo Rural del departamento de Puno, mediante el sistema muro trombe. Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- Arias Barreto A; Gastón A; Abalone R. (2012). Modelado de un Colector Solar Plano de Aire con Comsol Multiphysics. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 16, 2012. Impreso en la Argentina.
- Campos A, Diarceb G, Terés J, Bandosc T, Garcia A, Lopez L, Salac J. (2014). Design of a finned plate latent heat thermal energy storage system for domestic applications. Energy Procedia 48. 300 – 308.
- Escobar O. M, Cuervo A.S; Rincon P. S. (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*. 17 (1) 9-20.
- Fernández R, W. (2012). Análisis del comportamiento del perfil de temperatura de material de cambio de fase (PCM) en el almacenamiento de energía solar utilizando herramientas computacionales. Universidad Autónoma del Caribe. Colombia.
- Grande, A. (2016). Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura (tesis de master). Universidad de Sevilla, España
- Moscoso M. (2016). Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura (tesis de máster). Escola Técnica Superior D'arquitectura de Barcelona. España.
- Nacif H, JA. (2011). Acumulación térmica para un sistema solar de calefacción activo (tesis de grado). Universidad de Chile. Santiago, Chile
- Ochoa H, A. (2016). Evaluación de parafina comercial como material de cambio de fase para almacenamiento de energía (tesis de maestría). Universidad Libre, Bogotá, Colombia.
- Sandoval Torres S; Hernández Bautista E; Rodríguez Ramírez J. (2012). Simulación multi-física del secado de madera en COMSOL Multiphysics 3.4. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 3), julio-septiembre 2013: 389-398.