

Construcción y simulación de un sistema de almacenamiento de energía térmica usando material de cambio de fase

Construction and simulation of a thermal energy storage system using phase change material

SÁNCHEZ-VEGA, Guadalupe O.¹ †*, PINEDA-PIÑÓN, Jorge¹, NIETO-PÉREZ, Martín de J.¹ y MUÑOZ-NAVIA, Milton²

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro

² Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

ID 1^{er} Autor: Guadalupe O, Sánchez-Vega / ORC ID: 0000-0001-5709-4325, CVU CONACYT ID: 502821

ID 1^{er} Coautor: Jorge, Pineda-Piñón / ORC ID: 0000-0003-1392-6534, CVU CONACYT ID: 91313, SNI-CONACYT: 39026

ID 2^{do} Coautor: Martín de J., Nieto-Pérez / ORC ID: 0000-0001-6600-9786, CVU CONACYT ID: 200951

ID 3^{er} Coautor: Milton, Muñoz-Navia / ORC ID: 0000-0003-3254-1824, CVU CONACYT ID: 123289, SNI-CONACYT: 35203

DOI: 10.35429/JTIP.2019.9.3.8.15

Recibido 03 de Noviembre, 2019; Aceptado 18 Diciembre, 2019

Resumen

Un material con cambio de fase tiene la propiedad de almacenar o liberar grandes cantidades de energía en forma de calor latente, hasta 100 veces más que usando calor sensible. En el presente trabajo se reportan los resultados que se obtuvieron en la construcción de un sistema de almacenamiento de energía térmica utilizando eritritol como material de cambio de fase. El prototipo utiliza 31.4 kg de eritritol con un punto de fusión de 188°C y un calor latente de 340 kJ/kg, es calentado hasta 135°C y almacena 17.17 MJ de energía en 9.8 horas con una eficiencia de 48.66%. El sistema almacena la energía durante 2 días solo considerando las pérdidas por el coeficiente de convección natural. Para simular la extracción de energía del sistema se considera un coeficiente por convección forzada de 3000 W/m² K en el intercambiador de calor y el sistema se descarga en 1 día. Se pueden disponer de hasta 10.51 MJ diarios en un periodo de 9.5 horas y al día siguiente volver a cargarlo en un tiempo 6 horas. El prototipo fue simulado con una precisión de 91% en comparación con los resultados obtenidos en las pruebas reales

PCM, Energía, Almacenamiento

Abstract

A material with phase change has the property of storing or releasing large amounts of energy in the form of latent heat, up to 100 times more than using sensible heat. In this paper we report the results obtained in the construction of a thermal energy storage system using erythritol as phase change material. The prototype uses 31.4 kg of erythritol with a melting point of 188°C and a latent heat of 340 kJ / kg, is heated up to 135°C and stores 17.17 MJ of energy in 9.8 hours with an efficiency of 48.66%. The system stored the energy for 2 days only considering the losses by the natural convection coefficient. To simulate the extraction of energy from the system, a forced convection coefficient of 3000 W/m² K is considered in the heat exchanger and the system is discharged in 1 day. We can use 10.51 MJ daily in a period of 9.5 hours at a temperature of 135-118°C and the next day load it in a time 6 hours. The prototype was simulated with an accuracy of 91% compared to the real results.

PCM, Energy, Storage

Citación: SÁNCHEZ-VEGA, Guadalupe O, PINEDA-PIÑÓN, Jorge, NIETO-PÉREZ, Martín de J. y MUÑOZ-NAVIA, Milton. Construcción y simulación de un sistema de almacenamiento de energía térmica usando material de cambio de fase. Revista de Tecnologías en Procesos Industriales. 2019 3-9: 8-15

* Correspondencia del Autor (Correo electrónico: omar_s.v@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El almacenamiento de energía térmica en materiales de cambio de fase es un área de interés internacional ya que se encuentra ligado al ahorro de energía y al uso eficiente y racional de las energías renovables, principalmente la solar térmica. Un material de cambio de fase (Phase change material PCM) se caracteriza por poseer un elevado calor latente, lo cual le permite absorber o liberar una gran cantidad de energía térmica manteniendo una temperatura constante. Esta propiedad permite almacenar más energía que usando el calor sensible de un material, y por lo tanto puede reducir los requisitos de peso y espacio del sistema de almacenamiento de energía (Murray and Groulx, 2014).

Para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica, el cambio de fase de sólido a líquido es el más utilizado debido a que este no presenta un incremento significativo en el volumen del material y por lo tanto su contención es más simple que si se trabaja con gases. Para almacenamiento de calor latente, se prefieren materiales de calidad comercial debido a su bajo costo y disponibilidad a gran escala.

Los materiales de cambio de fase se clasifican en orgánicos e inorgánicos. Dentro de los orgánicos se encuentran las parafinas, no parafinas y polialcoholes, en los inorgánicos se encuentran las sales hidratadas, sales, metales y aleaciones (Hasnain, 1998). Los materiales inorgánicos presentan un calor latente más elevado y un rango más alto en la temperatura de fusión en comparación con los orgánicos, en cambio los orgánicos tienen una mejor estabilidad termoquímica, son menos corrosivos y más accesibles económicamente. En general, los compuestos inorgánicos tienen casi el doble de capacidad de almacenamiento de calor latente volumétrico (250-400 kg/dm³) que los compuestos orgánicos (128-200 kg/dm³).

Actualmente los materiales de cambio de fase más usados son las sales hidratadas en las plantas de concentración solar, estos sistemas hacen circular directamente el material en estado líquido y no permiten que se solidifique ya que podría causar graves daños a las tuberías, por tal motivo sus sistemas son bastante sofisticados y poco viables si se desea aplicarlos a nivel doméstico.

Algunas de las aplicaciones de pequeña escala en las que se han buscado utilizar estos materiales es en cocinas solares usando colectores de placa (Buddhi and Sahoo, 1997, Sharma et al., 2000, Buddhi and Sharma, 2003) y con tubos evacuados calentando de manera indirecta el PCM mediante un fluido de trabajo (Sharma et al, 2005). Las conclusiones a las que llegaron los autores de los trabajos antes mencionados es que los prototipos presentan una eficiencia baja debido al diseño del intercambiador de calor que transfiere la energía al PCM. Una de las principales desventajas es que muchos materiales de cambio de fase presentan una baja conductividad térmica, por lo cual la tasa de carga y descarga del material se realiza lentamente (Velraj et al., 1999). Por este motivo, se requieren técnicas o diseños que mejoren la transferencia de calor para la mayoría de las aplicaciones.

Para hacer más eficiente la transferencia de calor entre el intercambiador y los materiales de cambio de fase, se han realizado estudios utilizando distintos intercambiadores de calor comerciales, donde el intercambiador de placas anulares presentó resultados prometedores para aplicaciones reales. Igualmente se recomienda trabajar con números de Reynolds en régimen turbulento ya que demostraron reducir los tiempos de cambio de fase hasta un 50% en comparación de usar el régimen laminar (Medrano et al., 2009).

Otras investigaciones que se han realizado para aumentar la transferencia de calor en los sistemas, es incrementar la conductividad térmica del material de cambio de fase agregando pequeñas partículas de un material con alta conductividad térmica (Siegel, 1977), o insertando el material en una matriz de metal (Tong, 1996). En ambos casos se obtuvieron resultados favorables, pero como consecuencia se ve reducida la densidad energética del material de cambio de fase, debido al volumen que ocupa el material que añaden para incrementar la conductividad.

Otro aspecto que se debe de tener en cuenta es la viabilidad económica de emplear un material de almacenamiento de calor latente en un sistema, depende de la vida del material de almacenamiento, es decir, no debe haber cambios importantes en la temperatura de fusión y el calor latente de fusión con el tiempo debido a los ciclos térmicos del material de almacenamiento.

Las ceras de parafina y el eritritol han demostrado una fiabilidad térmica bastante buena en vista de los cambios en el calor latente de fusión y la temperatura de fusión con respecto al ciclo térmico.

En el caso del eritritol ha demostrado una degradación gradual desde los 500 hasta 1000 ciclos de carga y descarga. En este rango la temperatura de fusión y solidificación mostraron una disminución de 9-10°C y el calor latente disminuyó aproximadamente 35-40 kJ/kg (Shukla et al., 2008).

El eritritol (C₄H₁₀O₄), es un polialcohol empleado como sustituto de los sabores azucarados. Posee una temperatura de fusión de 118 °C y de ebullición de 275 °C, calor específico en estado sólido de 1.38 kJ/kg °C y 2.76 kJ/kg °C en líquido, calor latente de fusión de 340 kJ/kg, densidad de 1450 kg/m³, conductividad térmica de 0.733 W/m K en estado sólido y de 0.326 W/m K en estado líquido (Haynes, 2016).

Debido a su alto calor latente de fusión, su temperatura de cambio de fase y la disponibilidad del material, se decidió desarrollar un prototipo de un sistema de almacenamiento de calor latente a pequeña escala usando eritritol como material de cambio de fase.

El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad del eritritol como material de cambio de fase, utilizando un intercambiador de aletas anulares de espesor constante.

Dentro de los objetivos particulares están el analizar el comportamiento de carga y descarga del material respecto al tiempo, la cantidad de energía máxima almacenada para el prototipo construido y la cantidad de energía que puede ser extraída del sistema durante un día si se desea recargar el sistema en 6 horas, esto pensando en utilizar energía solar térmica mediante un colector solar para realizar el proceso de carga en un futuro.

En las siguientes secciones se presenta de manera detallada las dimensiones y características del prototipo construido, las pruebas que se realizaron y los resultados que se obtuvieron en las pruebas de carga y descarga, así como la eficiencia del sistema.

Descripción del prototipo

Contenedor PCM

Un cilindro de acero inoxidable 304 con un espesor de 3 mm, diámetro de 28 cm y altura de 35 cm.

Se realizó una perforación en el centro de las caras superior e inferior para insertar un tubo de cobre de 3/4 de pulgada.

Intercambiador de calor

Se diseñó y elaboró un intercambiador de calor de aletas anulares de espesor constante. El intercambiador se conecta de forma concéntrica con el contenedor de PCM por las caras superior e inferior.

Por la parte central del intercambiador se inyecta el fluido de trabajo a una temperatura de 150 °C constantes. La parte central del intercambiador es un tubo de cobre de 3/4 de pulgada y 35 cm de altura, las aletas igualmente de cobre y con un diámetro de 26 cm distribuidas simétricamente a lo largo del tubo de cobre y soldadas a este con plata.

Fluido de trabajo

Mobiltherm603[®], aceite térmico comercial. Tiene una densidad de 862 kg/m³, un calor específico promedio de 0.425 kJ/kg °C para un rango entre los 100 y 150 °C, la temperatura de descomposición en sistemas abiertos es de 200 °C. El fluido se inyecta al intercambiador de calor a una tasa de 0.25 L/s. El fluido de trabajo es calentado mediante una resistencia eléctrica de 1000 W.

Aislante

Lana mineral, debido a su estructura fibrosa multidireccional permite albergar aire relativamente inmóvil en su interior. Presenta una conductividad térmica de 0.034 W/m K, un calor latente de 0.80 kJ/kg K y una densidad de 40 kg/m³. Este aislante recubre el contenedor de PCM para minimizar las pérdidas y tiene un espesor de 1 pulgada.

Eritritol

Se utilizaron 31.4 kg de eritritol grado alimenticio.

Metodología

Para determinar los tiempos de carga y descarga se realizaron pruebas en el prototipo y aparte se hicieron simulaciones. Las pruebas al prototipo en laboratorio se monitorearon mediante Dataloggers que recolectaban los datos de temperatura cada 5 segundos dentro del eritritol. Las simulaciones se realizaron usando los datos reales de los materiales usados y también variando datos de las pérdidas por convección natural y forzada.

Caso ideal

Para determinar la cantidad ideal teórica de energía térmica que es posible almacenar en el sistema, suponiendo que la totalidad del material es fundido, la temperatura inicial de 25°C y la temperatura final de 145°C, se utiliza la ecuación 1:

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m\Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (1)$$

Siendo; Q la energía almacenada, T_m la temperatura de fusión del material (°C), T_i la temperatura inicial del material (°C), m la masa del material (kg), C_{ps} el calor específico en estado sólido (J/kg °C), a_m la fracción fundida del material, Δh_m el calor latente por unidad de masa (J/kg), T_f la temperatura final y C_{pl} el calor específico en estado líquido (J/kg °C).

Diseños y simulación

Se realizaron los diseños en Solidworks de todos los elementos que conforman el sistema de almacenamiento (Figura 1), se definieron los materiales para cada uno y en el caso del eritritol se definieron dos, uno para el material en estado sólido y otro en estado líquido con sus propiedades térmicas correspondientes.



Figura 1 Ensamblaje en Solidworks de los distintos elementos que conforman el sistema de almacenamiento de energía térmica

La simulación térmica se realiza en estado transitorio para determinar el tiempo y la temperatura final que alcanza el eritritol hasta lograr el estado estacionario donde las variaciones son menores. Se definió un coeficiente de pérdidas por convección natural de 10 W/m² K para todas las caras expuestas al ambiente del contenedor. Se estableció una temperatura constante en el fluido de trabajo de 145°C (dato obtenido del monitoreo del prototipo en pruebas realizadas) y se propuso un tiempo de 14 horas con intervalos de 60 segundos. Una vez que finalizó la simulación se tomaron muestras aleatorias de la temperatura en los puntos medios entre todas las aletas, se obtuvieron los datos numéricos del comportamiento a lo largo del tiempo y se obtuvo el valor promedio.

Pruebas al prototipo

El eritritol se debe depositar en estado líquido al contenedor, ya que su estado original es granulado y presenta problemas para fundirse de manera uniforme la primera vez si no se utiliza un sistema de agitación. Una vez que el material es fundido por primera vez este solidifica y forma un bloque compacto, el cual al momento de cambiar de fase nuevamente lo hace de manera uniforme. Durante las pruebas realizadas al prototipo, primero se calienta el fluido de trabajo hasta 145°C mediante una resistencia de 1000W. Una vez que se alcanza la temperatura objetivo se hace circular el aceite por el intercambiador de calor de aletas anulares.

Dentro del contenedor se instalaron una serie de termopares tipo K, estos envían la información de la temperatura a una serie de Dataloggers cada 5 segundos, los sensores están ubicados en los espacios entre cada aleta sin llegar a tener contacto directo con ellas solo con el eritritol. Las pruebas se realizan hasta que la temperatura deja de tener incrementos significantes a lo largo del tiempo, al igual que la simulación. Una vez que finaliza la prueba se obtienen los datos de temperatura de todos los sensores y se obtiene un valor promedio.

Prueba y simulación de descarga natural

Una vez que el prototipo está a 135°C se detiene el flujo del aceite en el intercambiador mediante válvulas colocadas justo en la entrada y salida del tanque.

Los sensores continúan tomando lecturas y se mantienen así hasta que el sistema por medio de convección natural pierde toda la energía almacenada. Para realizar la simulación del proceso de enfriamiento se realizan los cálculos de manera inversa, se supone que todo el eritritol y el intercambiador de calor se encuentran a una temperatura de 135°C y el coeficiente de pérdidas por convección natural es de 10 W/m² K en todas las caras expuestas al ambiente, se utiliza una temperatura ambiente de 25°C.

Extracción de energía por convección forzada

Se realizaron simulaciones donde se plantea que por el tubo central se tiene un elevado coeficiente de pérdidas por convección forzada, de igual forma se sigue teniendo el mismo valor para la convección natural en las paredes expuestas al ambiente del sistema.

Los coeficientes de pérdidas por convección forzada que se aplican al tubo central del intercambiador son de 50, 150, 500, 1200 y 3000 W/m² K. La temperatura inicial del sistema (eritritol e intercambiador de calor) para todos los casos es de 135°C. Las pérdidas por convección natural se mantienen en 10 W/m² K con una temperatura ambiente de 25°C. La simulación se realiza en estado transitorio hasta que se alcanza una temperatura cercana al ambiente.

Resultados y discusión

Caso ideal

Realizando el cálculo para determinar la energía ideal teórica, se obtuvo que la energía total que puede ser almacenada en el sistema es de 18.12 MJ. El comportamiento de la temperatura dependiendo de la energía que va siendo almacenada se muestra en el Gráfico 1.

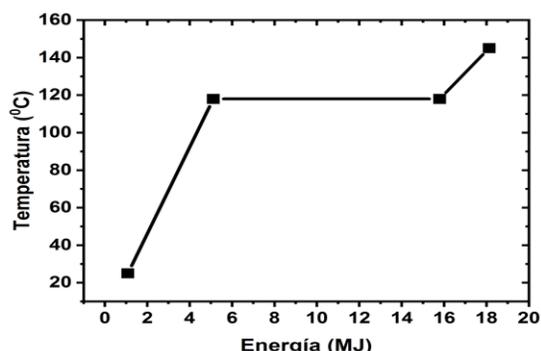


Gráfico 1 Almacenamiento de energía térmica en 31.4 kg de eritritol y su comportamiento (caso ideal)

Como se observa en el Gráfico anterior, el 59% de la energía almacenada lo hace en forma de calor latente a una temperatura constante de 118°C, mientras que el 41% restante lo hace en forma de calor sensible.

Diseños y simulación

Con los datos y perfiles de temperatura que obtuvieron mediante la simulación, se generó el Gráfico 2, donde se muestra el comportamiento de la temperatura del eritritol a lo largo de 14 horas.

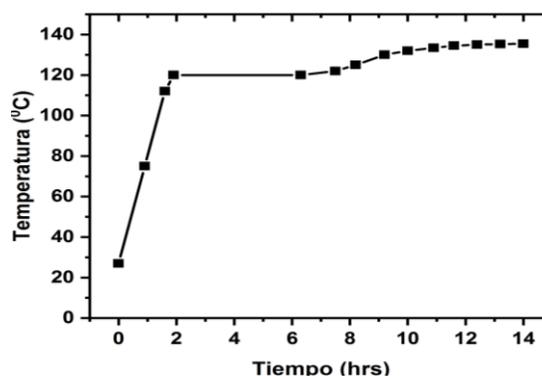


Gráfico 2 Comportamiento de la temperatura del eritritol a lo largo del tiempo, en una simulación de 14 horas

En el Gráfico 2 se observa que a las 9 horas el eritritol tiene una temperatura de 135°C y en las siguientes 5 horas solo aumenta 5°C, lo cual ya no representa un incremento significativo. Por tal motivo podemos suponer que para las condiciones establecidas el estado estacionario se alcanza en 9 horas.

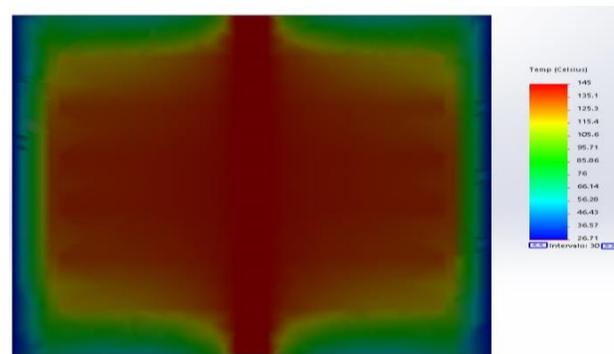


Figura 2 Comportamiento del eritritol después de 14 horas de simulación (temperatura inicial del eritritol de 25°C, temperatura constante del tubo de 145°C)

En la Figura 1 se puede observar que el aislante se mantiene a temperatura ambiente después de 14 horas de simulación, el eritritol alcanza una temperatura promedio de 135°C a la cual se encuentra totalmente en estado líquido.

El eritritol a una temperatura de 135°C idealmente contiene una energía almacenada de 17.26 MJ. La fuente de energía para mantener el aceite a 145°C es de 1000 W, si consideramos las 9 horas que dura la simulación se tiene una energía inyectada al aceite de 32.4 MJ. Con estos datos podemos calcular la eficiencia teórica del sistema de almacenamiento mediante la ecuación 2, donde se obtiene un resultado de 53.27%.

$$\eta = \frac{Q_{aprovechada}}{Q_{total}} \quad (2)$$

Prueba y simulación de descarga natural

Los valores de la temperatura obtenidos se grafican contra el tiempo que duró la prueba. Estas pruebas de carga y descarga del material se repitieron 10 veces. las variaciones entre el tiempo y las temperaturas que se obtuvieron en cada una no sobrepasaban un margen de $\pm 5\%$. Y los datos se pueden representar con ese margen de error (Gráfico 3).

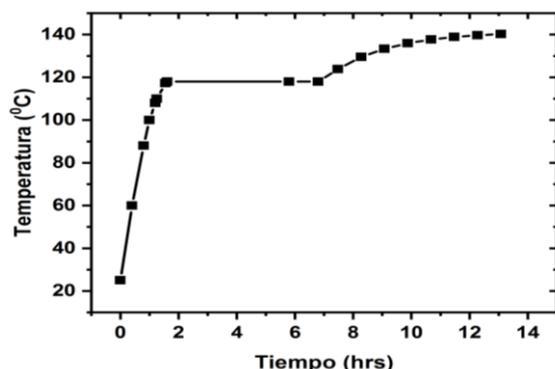


Gráfico 3 Comportamiento promedio real de la temperatura del eritritol a lo largo del tiempo en 10 repeticiones

En el Gráfico 3 se observa que la temperatura de cambio de fase del eritritol fue de 120°C, dos grados más que la temperatura teórica del material. El proceso de cambio de fase duró 5.7 horas y se alcanzaron 135°C en 9.8 horas, 48 minutos más que en la simulación.

La energía almacenada en el eritritol fue de 17.17 MJ y la energía que se consumió durante el proceso fue de 35.28 MJ, lo que resulta en una eficiencia del 48.66%, 4.61% más baja que la simulación realizada. Con los resultados que se obtuvieron se sabe que las simulaciones realizadas tienen un 91% de precisión.

Si el sistema es cargado hasta una temperatura de 135°C y se mantiene en reposo (sin extracción de energía térmica) la energía se comienza a perder, debido a que no hay forma de evitar las pérdidas térmicas, solo de minimizarlas. De manera natural se considera un coeficiente de pérdidas por convección natural de 10 W/m² K en todas las caras expuestas al ambiente. Cuando la temperatura del eritritol es mayor, las pérdidas también son más altas.

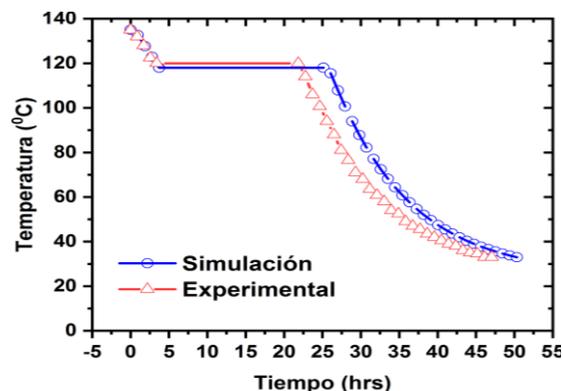


Gráfico 4 Comportamiento de la temperatura del eritritol a lo largo del tiempo debido a las pérdidas de calor por convección natural, comparación de los resultados de simulación con las pruebas reales

En la simulación, el sistema a una temperatura de 135°C disminuirá su temperatura hasta 118°C en 25 horas, donde el eritritol ya estará solidificado. Después de 28 horas la temperatura será de 100°C y seguirá disminuyendo hasta alcanzar la temperatura ambiente, lo cual ocurrirá después de 50 horas. En las pruebas realizadas la temperatura baja de 135°C a 120°C en 21.8 horas, en las cuales el eritritol ya se encontrará solidificado. Después de las 24.5 horas el eritritol estará a 100°C y seguirá descendiendo hasta la temperatura ambiente en más de 47 horas, lo cual es una diferencia de 3 hora con los resultados obtenidos en la simulación (Gráfico 4).

Extracción de energía por convección forzada

Los resultados que se obtienen de las simulaciones para la extracción de calor genera un perfil de temperatura que se grafica respecto al tiempo.

Con los datos obtenidos se pueden determinar los tiempos útiles del sistema dependiendo de la tasa de extracción de energía y la temperatura que es requerida por el usuario dependiendo la aplicación que se le quiera dar.

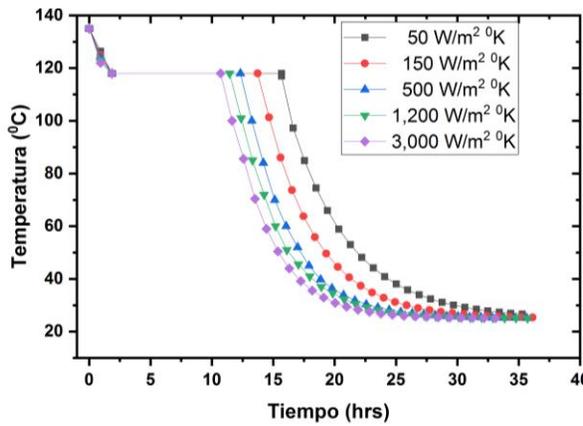


Gráfico 5 Simulación de descarga del sistema a distintas tasas de remoción de energía

Mientras mayor sea el coeficiente de extracción de energía del sistema, el tiempo en el que se agota la energía almacenada de forma latente disminuye. Para un coeficiente de $50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ la energía de calor latente se agota en 15.6 horas, mientras que para $3000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ se agota en 10.7 horas (Gráfico 5).

Mediante el Gráfico 5 se puede determinar las horas útiles del sistema, se debe conocer la cantidad de energía que se requiere para un proceso y la tasa de remoción de energía del sistema, lo cual depende del fluido de trabajo y su velocidad.

El prototipo, a pesar de estar en una escala pequeña, demuestra que si se encuentra bien aislado se puede disponer de altas cantidades de energía a temperaturas superiores a los 100°C en un día.

Si se requiere recargar el prototipo en un día en solo 6 horas usando la resistencia de 1000W y con la eficiencia actual del prototipo se podría disponer de $10,510 \text{ kJ}$ del sistema. Suponiendo que se maneja el coeficiente de $3000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ podemos extraer durante 9.5 horas energía del sistema, el cual bajara de 135°C a 118°C sin llegar a convertirse totalmente en sólido.

Este sistema es muy viable para alimentarse mediante energía solar concentrada, calentar el fluido y transferir energía al eritritol.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro, del cual soy alumno.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por apoyarme con la beca durante mis estudios de doctorado.

Conclusiones

Se logró construir con éxito un sistema de almacenamiento de energía térmica utilizando 31.4 kg de eritritol como material de cambio de fase, logrando almacenar 17.17 MJ a una temperatura de 135°C y en un tiempo de 9.8 horas. Si el sistema está cargado y no se hace uso de la energía almacenada se disipa totalmente en 2 días debido a las pérdidas por convección natural. Si se extrae energía mediante el intercambiador de calor con un coeficiente de $3000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ el sistema se descarga totalmente en 25 horas. Con los resultados obtenidos se demuestra la viabilidad para implementar el prototipo para el almacenamiento de energía térmica en aplicaciones de calentamiento de agua para servicio, hornos y estufas solares que puedan operar durante la noche u horas sin Sol. Puede llegar a ser fácilmente redimensionado dependiendo del consumo de energía requerido. Los resultados de la simulación del sistema tuvieron una precisión del 91% en comparación con los datos reales, lo que ayuda a considerar los resultados de redimensionamientos con una precisión alta para su consideración.

La aportación de este trabajo al área de almacenamiento de energía solar térmica es relevante debido a las múltiples aplicaciones que pueden tener este tipo de materiales tanto en el ámbito industrial como aplicaciones en los hogares, ya que es un material de bajo coste, no tóxico y amigable al ambiente que permite tener ahorros económicos al incorporarse a sistemas que muchos hogares cuentan (como calentadores solares) o aprovechamiento de calor residual en procesos industriales.

Referencias

Agyenim, F., Eames, P., Smyth, M. (2010). Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array, *Renewable Energy* 35. 198–207.

Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 615–628.

- Buddhi, D., Sahoo, L.K., 1997. Solar cooker with latent heat storage: Design and experimental testing. *Energy Conversion and Management* 38 (5), 493–498.
- Buddhi, D., Sharma, S.D., Sharma, A., 2003. Thermal performance evaluation of a latent heat storage unit for late evening cooking in a solar cooker having three reflectors. *Energy Conversion and Management* 44, 809–817.
- Cengel, Y.A., Boles, M.A. (2009). *Termodinámica*. Sexta Edición. Mc Graw Hill.
- Çengel, Y.A., Ghajar, A.J. (2011). *Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones: Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar (4a. ed.--)*. México D.F.: McGraw Hill.
- Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Convers Manage* 45:1597–615.
- Hamdan MA., Elwerr FA. (1996). Thermal energy storage using a phase change material. *Solar Energy*. 56(2):183–9.
- Hasnain, S.M., 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Convers. Mgmt* Vol. 39, No. 11. 1127-1138.
- Haynes, W. M., Lide, D. R., & Bruno, T. J. (2016). *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*. 2016-2017, 97th Edition / Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Medrano, M., Yilmaz, M.O., Nogués, M., Martorell, I. Joan Roca, Cabeza, L.F. (2009). Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Applied Energy* 86. 2047-2055.
- Murray, R.E., Groulx, D., (2014). Experimental study of the phase change and energy characteristics inside a cylindrical latent heat energy storage system: Part 1 consecutive charging and discharging. *Renewable Energy* 62. 571-581.
- Saman W, Bruno F, Halawa E. (2005) Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system. *Solar Energy* 78(2):341–9.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and sustainable energy reviews* 13. 318-345.
- Sharma, S.D., Takeshi, I., Hiroaki, K., Kazunobu, S. (2005). Thermal performance of a solar cooker based on evacuated tube solar collector with a PCM storage unit. *Solar Energy* 78, 416 – 426.
- Shukla, A., Buddhi, D., Sawhney, R.L. 2008. Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials. *Renewable Energy* 33. 2606-2614.
- Siegel, R. 1977. Solidification of low conductivity material containing dispersed high conductivity particles. *Int. J. Heat Mass Transfer* 20. 1087-1089.
- Tong, X., Khan, J.A., Amin, M.N. 1996. Enhancement of heat transfer by inserting a metal matrix into a phase change material. *Numerical Heat Transfer, Part A* 30. 125-141.
- Velraj, R., Seeniraj, R.V., Hafner, B., Faber, C., Schwarzer, K. 1999. Heat transfer enhancement in a heat storage system. *Solar Energy* Vol.65, No. 3. 171-180.