

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN LECHO FLUIDIZADO CON PCM CON INTERCAMBIADOR DE CALOR

IZQUIERDO BARRIENTOS, María A. ⁽¹⁾; FERNÁNDEZ TORRIJOS, María ⁽¹⁾

ALMENDROS-IBÁÑEZ, Jose A. ^(2,3); SOBRINO FERNÁNDEZ, Celia ⁽¹⁾

maizquie@ing.uc3m.es

⁽¹⁾ Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior

⁽²⁾ Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela de Ingenieros Industriales de Albacete

⁽³⁾ Instituto de Investigación en Energías Renovables, Sección de Solar y Eficiencia Energética

RESUMEN

La utilización de fuentes de energía variables en el tiempo requiere de métodos de almacenamiento para adecuar el suministro de energía a la demanda. Los sistemas que emplean materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés) presentan capacidades de almacenamiento por unidad de volumen mayores que los sistemas de almacenamiento de calor sensible. Los PCM granulados, fabricados mediante macro o microencapsulación de PCMs en una matriz sólida porosa, pueden presentarse en tamaños en torno a 0.2-0.6 mm, con temperaturas de cambio de fase menores a los 100°C. La ventaja de estos materiales es que macroscópicamente mantienen su estado sólido durante el cambio de fase.

Izquierdo-Barrientos et al. [1] demostraron su viabilidad para ser empleados en lechos fijos y lechos fluidos con el fin de almacenar el calor procedente de una corriente de aire caliente. Además, estudiaron la transferencia de calor a una superficie cilíndrica sumergida en un lecho observando aumentos en el coeficiente de transferencia de calor en el lecho fluido respecto al lecho fijo y al emplear PCMs en lugar de arena [2]. En algunos sistemas de almacenamiento se emplean distintos materiales como medio de almacenamiento y como fluido caloportador, usando un intercambiador de calor para transferir calor entre ambos.

En este trabajo se analiza experimentalmente el funcionamiento de un lecho de PCM granular con temperatura de cambio de fase en torno a los 50°C. El lecho se carga térmicamente usando aire caliente y se descarga empleando agua que circulará a través de un serpentín sumergido en el lecho. Se estudia la operación del sistema en condiciones de lecho fluido y se evalúa el uso de diferentes tipos de serpentines, buscando un mejor contacto entre el material del lecho y la superficie de contacto.

Palabras clave: Fluidización, PCM, transferencia de calor

1. Introducción

Las fuentes de energía intermitentes, como la solar, requieren del empleo de métodos de almacenamiento de energía térmica para adecuarse a la demanda. Los lechos de arena tienen aproximadamente la mitad de capacidad calorífica volumétrica que el agua, por lo que requieren el doble de espacio, pero los mayores costes de inversión y mantenimiento tanto de los sistemas de captación como de los sistemas de almacenamiento de agua en instalaciones de energía solar llevan a elegir colectores de aire con almacenamiento de calor en lechos de rocas [3]. Otra forma de aumentar la capacidad de almacenamiento es el empleo de materiales de cambio de fase (PCMs). Los PCM granulados, fabricados mediante macro o microencapsulación de PCMs en una matriz sólida porosa, pueden presentarse en tamaños en torno a 0.2-0.6 mm, con temperaturas de cambio de fase menores a los 100°C. La ventaja de estos materiales es que macroscópicamente mantienen su estado sólido durante el cambio de fase. Izquierdo-Barrientos et al. [1] demostraron su viabilidad para ser empleados en lechos fijos y lecho fluidos con el fin de almacenar el calor procedente de una corriente de aire caliente. La capacidad calorífica volumétrica de estos materiales es del orden del doble de la de la arena. Además estudiaron la transferencia de calor a una superficie cilíndrica sumergida en un lecho observando aumentos en el coeficiente de transferencia de calor en el lecho fluido respecto al lecho fijo y al emplear PCMs en lugar de arena [2].

En algunos sistemas de almacenamiento se emplean distintos materiales como medio de almacenamiento y como fluido caloportador, usando un intercambiador de calor para transferir calor entre ambos [3]. Por ejemplo Choudhury y Garg [4] estudiaron el funcionamiento de un sistema híbrido de calefacción por aire y agua caliente sanitaria que empleaba colectores solares de agua y un intercambiador para transferir calor a un lecho de rocas por el que se hacía circular aire [4]. Los mismos autores analizaron también el funcionamiento de un sistema de calentamiento de agua caliente sanitaria mediante un intercambiador de calor de tubos aleteados donde el agua procedente de un taque se calentaba usando aire calentado en colectores solares [5]. Los coeficientes de transferencia de calor de los gases son bajos, por ello los intercambiadores de calor de lecho fluido son una opción que permite aumentar el coeficiente de transferencia de calor del aire [6,7].

En este trabajo se analiza experimentalmente el funcionamiento de un lecho fluido de material de cambio de fase granular con temperatura de cambio de fase en torno a los 50°C. El lecho es cargado térmicamente usando aire caliente y se emplea para calentar agua que circula a través de un serpentín sumergido en el lecho. Se ha evaluado la eficiencia del intercambiador de calor para distintas configuraciones del serpentín, para un lecho de arena y para un lecho de PCM granulado. Además se ha estudiado el coeficiente de transferencia de calor entre el agua y el lecho.

2. Instalación y materiales

Los ensayos de almacenamiento térmico se han llevado a cabo en la instalación experimental esquematizada en la Figura 1. El lecho circular consiste en un cilindro de 0.2 m de diámetro interno y una altura de 0.5 m. La parte externa de esta sección del lecho está aislada térmicamente para reducir las pérdidas de calor al exterior. El aire, previamente precalentado mediante resistencias eléctricas a la temperatura deseada, se introduce en el lecho a través de un distribuidor de plato perforado con 3% de área perforada y una caída de presión lo suficientemente grande para asegurar una correcta distribución del flujo en el lecho. A lo largo del perímetro del lecho hay múltiples puertos distribuidos que permiten introducir sensores de temperatura a diferentes alturas con respecto al distribuidor. Los sensores de temperatura son termopares tipo K con incertidumbre de 0.1°C.

En el lecho se introduce un intercambiador de calor de acero inoxidable por el que fluye agua continuamente renovada. Los ensayos se han realizado para dos tipos de intercambiador helicoidal, con las mismas dimensiones (10 cm de altura x 10 cm de diámetro) pero con diferente número de espiras: 12 espiras S12 y 6 espiras S6, de forma que la separación entre las espiras es mayor en el intercambiador S6 que en el intercambiador S12. Los materiales utilizados para los experimentos son arena, material típico en lechos fluidizados, y un PCM granular, GR50 [8]. El lecho se llena con 5 kg de PCM y 9 kg de arena respectivamente, para que el intercambiador quede completamente cubierto de material. En ambos casos se consigue un lecho fijo de altura $H = 0.24$ m. El PCM consiste en

partículas de sílice rellenas de parafina. El cambio de fase de sólido-líquido de la parafina transcurre en el rango de temperaturas 40-50°C. En la Tabla 1 se recoge los valores de densidad ρ_p y tamaño de partícula d_p para la arena y el PCM, incluyendo la desviación típica de cada valor y en la Figura 2 se presentan fotografías de los materiales de estudio.

Tabla 1: Propiedades de la arena y el PCM-GR50.

| Material | ρ_p [kg/m ³] | σ_{ρ_p} [kg/m ³] | d_p [mm] | σ_{d_p} [mm] |
|----------|-------------------------------|--|------------|---------------------|
| Arena | 2632.3 | 1.2 | 0.566 | 0.070 |
| GR50 | 1550.5 | 1.0 | 0.541 | 0.082 |

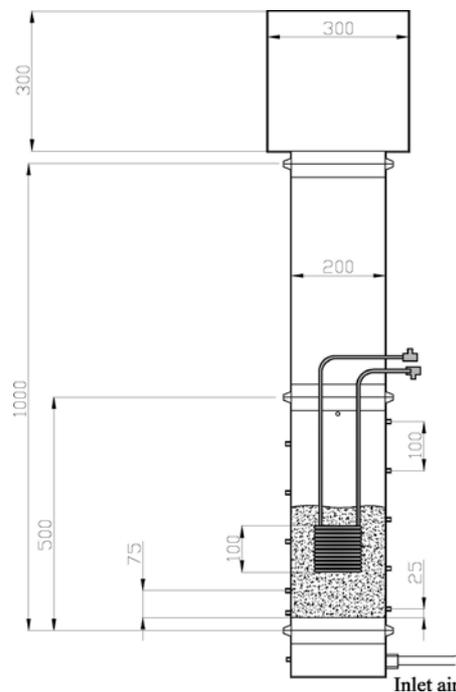


Figura 1: Esquema de la instalación experimental. Dimensiones en mm.



Figura 2: Fotografías de los materiales utilizados: arena y GR50 respectivamente.

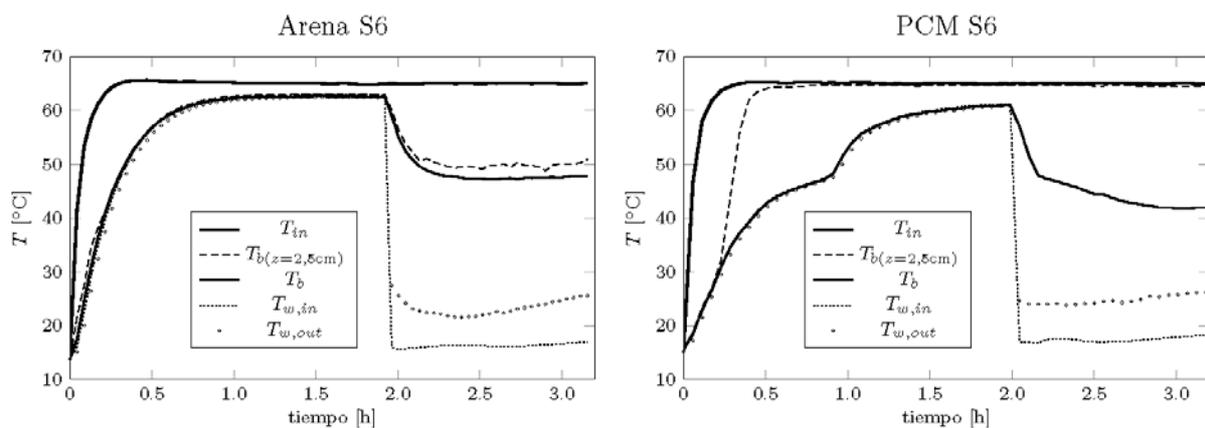
3. Resultados experimentales

Se han realizado cuatro experimentos para comparar la influencia del material y tipo de serpentín en los coeficientes de transferencia de calor. La Figura 3 muestra los perfiles de temperatura medidos a diferentes alturas dentro del lecho y a la entrada y salida del serpentín durante el proceso de carga para cada uno de los ensayos.

Para trabajar en condiciones de fluidización la velocidad del aire utilizado debe ser mayor que la velocidad de mínima fluidización de los materiales. La velocidad de mínima fluidización para el GR50 es de $u_{mf} = 0.13$ m/s que corresponde a un caudal de $Q = 250$ l/min y para la arena es de $u_{mf} = 0.27$ m/s que es igual a un caudal de $Q = 500$ l/min aproximadamente. De esta forma el caudal de aire seleccionado para los ensayos con PCM es de 500 l/min lo que corresponde a una relación de exceso de aire con respecto a la mínima fluidización $u/u_{mf} = 2$ y para la arena es 750 l/min con $u/u_{mf} = 1.5$. Cuando el material se encuentra fluidizado el lecho se comporta como un tanque bien mezclado donde la temperatura es uniforme. Así cuatro de los cinco termopares dentro del lecho miden la misma temperatura, representada por T_b . Sólo el primer termopar situado a 2.5 cm del distribuidor mide una temperatura mayor al verse afectado por los chorros de aire del distribuidor perforado [9].

El aire que entra en el lecho T_{in} se calienta hasta 65°C y se mantiene a esta temperatura durante todo el ensayo. Una vez las temperaturas dentro del lecho están estabilizadas se hace circular agua por el serpentín consiguiendo calentar este agua circulante y, como consecuencia, disminuyendo la temperatura del lecho.

El cambio de pendiente en torno a los 45-50°C que se aprecia en los ensayos con PCM corresponde con el cambio de fase del material de sólido a líquido durante el calentamiento y de líquido a sólido cuando se transfiere calor al agua que circula por el serpentín y que entra a éste a una temperatura en torno a los 15°C. Para el caso con PCM e intercambiador de 6 espiras el cambio de fase no parece completo al no enfriarse el material por debajo de 40°C. En cambio, en el sistema con PCM e intercambiador de 12 espiras el cambio de fase se ha completado y se observa un aumento de la temperatura del agua a la salida del serpentín que coincide con el proceso de cambio de fase. Esta conclusión está en concordancia con lo apuntado por estudios anteriores en los que se midieron mayores coeficientes de transferencia de calor entre un lecho con PCM y una superficie inmersa en él [2,10].



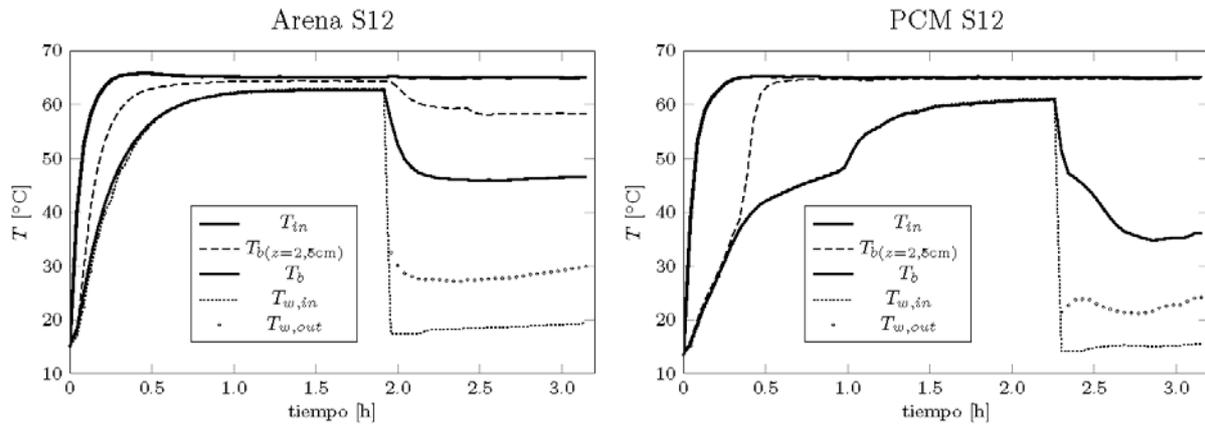


Figura 3: Perfiles de temperatura para la arena y el PCM con serpentín de 12 y 6 espiras donde T_{in} es la temperatura del aire a la entrada del lecho, $T_{b(x=2.5cm)}$ es la temperatura medida a 2.5 cm del distribuidor, T_b es la temperatura del lecho, $T_{w,in}$ es la temperatura del agua a la entrada del serpentín y $T_{w,out}$ la temperatura del agua a la salida.

Debido a las limitaciones técnicas de la instalación el caudal de agua no presenta un valor constante y varía dependiendo del ensayo realizado aunque manteniéndose en un rango similar en todos los casos como se puede ver en la Figura 4.

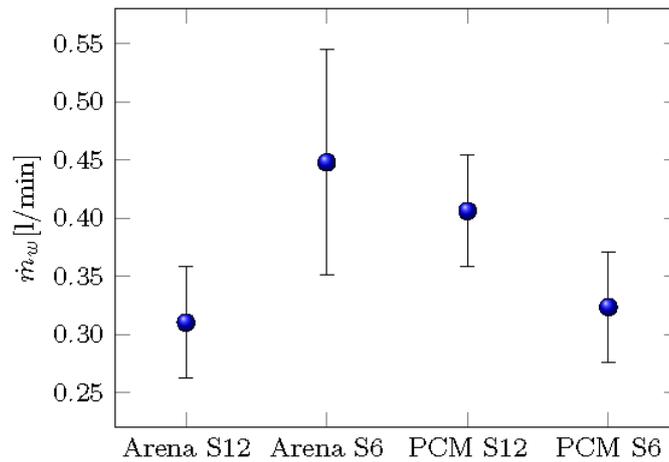


Figura 4: Caudal de agua utilizado para cada uno de los ensayos.

Para analizar los cuatro ensayos se ha calculado la eficiencia del intercambiador en el estado estacionario definida como [11]:

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{max}} = \frac{\dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in})}{\dot{m}_{air} c_{p,air} (T_{air,in} - T_{w,in})} \quad (1)$$

donde \dot{m}_w y \dot{m}_{air} representan el caudal de agua y aire utilizado, $c_{p,w}$ y $c_{p,air}$ son sus respectivos calores específicos, $T_{w,out}$ y $T_{w,in}$ son las temperaturas del agua medidas a la salida y entrada del serpentín y $T_{air,in}$ es la temperatura a la entrada del aire que corresponde con los perfiles de T_{in} de la Figura 1. En la Figura 5 se presenta los valores obtenidos para la eficiencia en función de cada material e intercambiador. Se observa que los sistemas con PCM presentan mayores eficiencias al tener una relación de exceso de aire con respecto a la mínima fluidización mayor que la de la arena, consiguiendo una mayor renovación de las partículas que están en contacto con la superficie del serpentín. Si se compara el tipo de intercambiador los sistemas con el serpentín de 12 espiras

presentan mejores eficiencias que los de 6 espiras al contar con una mayor área de transferencia de calor.

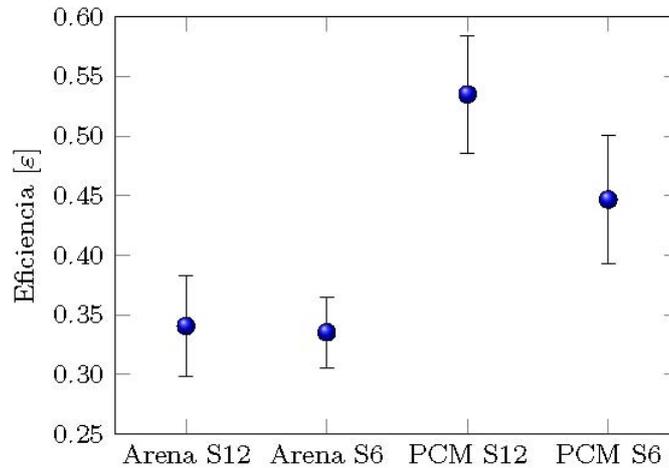


Figura 5: Valores de la eficiencia en función del tipo de material y de intercambiador.

En el estado estacionario el balance de energía para el agua que circula por el serpentín da lugar a la siguiente ecuación que determina la variación de la temperatura media del agua a lo largo de serpentín:

$$\dot{m}_w c_{p,w} \frac{dT_w}{dx} = U(T_b - T_w)P \quad (2)$$

donde U es el coeficiente global de transferencia de calor entre el agua y el lecho y P es el perímetro del tubo del serpentín. Integrando esta ecuación desde la entrada a la salida del serpentín, y teniendo en cuenta que la temperatura del lecho, T_b , es uniforme se obtiene la siguiente expresión para el producto $U \cdot A$:

$$U \cdot A = \dot{m}_w c_{p,w} \cdot \ln \left(\frac{T_b - T_{w,out}}{T_b - T_{w,in}} \right) \quad (3)$$

donde A es el área de transferencia de calor.

Los valores de $U \cdot A$ para los distintos sistemas se muestran en la Figura 6 donde se aprecia que el PCM tiene mayores, y por lo tanto, mejores coeficientes de transferencia que la arena. Por otro lado el intercambiador con mayor número de espiras tiene un mayor valor de $U \cdot A$ que el de menor número al contar con mayor área de intercambio. Sin embargo, este valor no se duplica a pesar de que el área de un serpentín es el doble que la otra. La transferencia de calor del lado del lecho es mejor en el caso del serpentín con menos espiras, ya que la mayor distancia entre ellas permite un mejor contacto del material del lecho con la superficie exterior del serpentín.

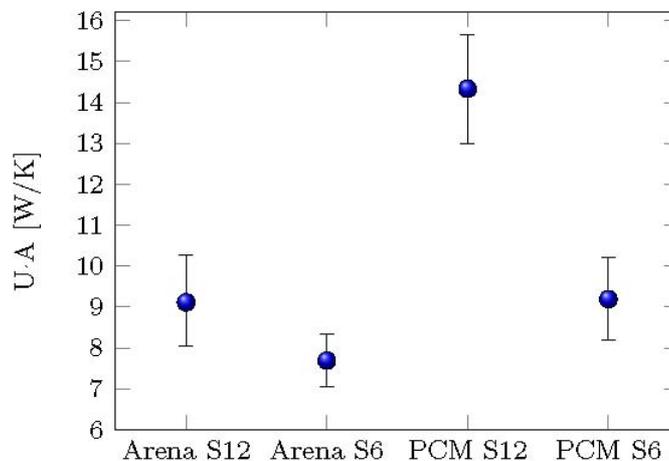


Figura 6: Valores del producto entre el coeficiente global de transferencia y el área de transferencia para los distintos materiales e intercambiadores utilizados.

A su vez $U \cdot A = 1/R_{t,total}$, siendo $R_{t,total}$ la suma de la resistencia de convección en el interior de serpentín, la resistencia de conducción en la pared del serpentín y la resistencia de convección en el exterior del serpentín. La resistencia de conducción se ha despreciado al ser muy pequeño el espesor del serpentín y estar construido en acero inoxidable con una alta conductividad térmica. Para calcular el coeficiente de transferencia de calor en el interior del serpentín se ha usado la correlación propuesta por Manlapaz-Churchill [12] para flujo laminar en un serpentín helicoidal. De esta forma conociendo el producto $U \cdot A$ y la resistencia de convección en el interior se puede calcular la resistencia de convección en el exterior y con ello el coeficiente de convección exterior h_{ext} . Los valores de h_{ext} para los distintos sistemas se presentan en la Figura 7. Si se compara la arena con el PCM para el mismo tipo de intercambiador se obtienen mayores coeficientes de transferencia para el PCM. Esto se debe al estado de fluidización más vigoroso del PCM $(u/u_{mf})_{PCM} > (u/u_{mf})_{Arenas}$ que intensifica la renovación de las partículas en contacto con el serpentín y a la mayor capacidad de almacenamiento de energía que tienen las partículas de PCM. Atendiendo al tipo de intercambiador la misma tendencia se observa para los casos con la arena y el PCM. Los coeficientes de transferencia de calor son mayores para los sistemas con el intercambiador de menor número de espiras. Estos coeficientes mejoran al haber más espacio entre las espiras mejorando el contacto entre las partículas del lecho y el serpentín.

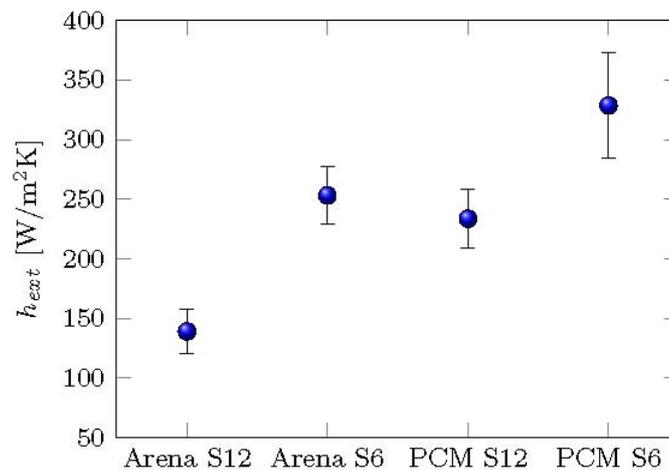


Figura 7: Valores del coeficiente de transferencia en el exterior del serpentín para los distintos sistemas.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la transferencia de calor entre un lecho fluido de PCM y agua que circula en un serpentín sumergido en el lecho. Para ello se ha comparado el funcionamiento de este intercambiador de calor usando arena o un PCM granular como material del lecho. Además se han usado dos tipos de intercambiadores helicoidales, uno con 12 espiras y otro con 6. Se han realizado ensayos para cada uno de los 4 casos propuestos donde se ha calentado el material introduciendo aire caliente en el lecho y una vez estabilizado térmicamente el mismo, se hecho circular un caudal de agua fría a través del intercambiador para transferir parte del calor almacenado en el material al agua.

Se ha calculado la eficiencia de los intercambiadores para los cuatro sistemas estudiados y sus coeficientes de transferencia de calor obteniéndose mayores valores en ambos casos cuando el sistema opera con PCM. Las propiedades del material GR50, densidad, tamaño y forma de las partículas, hacen que el PCM tenga una menor velocidad de fluidización que la arena por lo que se consigue mayores u/u_{mf} con menores caudales. Este hecho mejora la transferencia de calor en el lecho al incrementarse la renovación de partículas en contacto con el serpentín.

Además, se ha observado que el tipo de serpentín afecta al valor del coeficiente de transferencia de calor entre el lecho y la superficie exterior del serpentín obteniéndose mayores coeficientes para el

intercambiador con menos espiras. Esto es debido a que en este intercambiador, la mayor distancia entre espiras favorece el contacto entre la superficie del serpentín y el material del lecho.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España (Proyecto ENE2010-15403), el Gobierno regional de Castilla-La Mancha (Proyecto PPIC10-0055-4054) y la Universidad de Castilla-La Mancha (Proyecto GE20101662).

6. Referencias

- [1] IZQUIERDO-BARRIENTOS, M. SOBRINO, C. ALMENDROS-IBÁÑEZ, J.A. Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM. *Chemical Engineering Journal*, 2013, vol. 230, pp. 573-583.
- [2] IZQUIERDO-BARRIENTOS, M. SOBRINO, C. ALMENDROS-IBÁÑEZ, J.A. Experimental heat transfer coefficients between a surface and fixed and fluidized beds with PCM. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 78, pp. 373-379.
- [3] DINCER, I. ROSEN, A.M. *Thermal energy storage: Systems and applications*. Chichester, 2002. 579 p. (Ed. John Wiley & Sons).
- [4] CHOUDHURY, C. GARG, H.P. Integrated rock bed heat exchanger-cum storage unit for residential-cum-water heating. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36, pp. 999-1006.
- [5] CHOUDHURY, C. GARG, H.P. Performance calculations for closed-loop air-to-water solar hybrid heating systems with and without a rock bed in the solar air heater. *Energy Conversion and Management*, 1993, 36, pp. 999-1006.
- [6] SUO, M. Calculations methods for performance of heat exchangers enhanced with fluidized beds. *Letters in heat and mass transfer*, 1976, 3, pp. 555-564.
- [7] RODRÍGUEZ, O.M.H. PÉCORA, A.A.B. BIZZO, W.A. Heat recovery from hot solid particles in a shallow fluidized bed. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22, pp.145-160.
- [8] www.rubitherm.com
- [9] REES, A.C. DAVIDSON, J.F. DENNIS, J.S. FENNELL, P.S. GLADDEN, L.F. HAYHURST, A.N. MANTLE, M.D. MULLER, C.R. SEDERMAN, A.J. The nature of the flow just above the perforated plate distributor of a gas-fluidised bed, as imaged using magnetic resonance. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61, pp. 6002-6015.
- [10] BROWN, R.C. RASBERRY, J.D. OVERMANN, S.P. Microencapsulated phase-change materials as heat transfer media in gas fluidized beds. *Powder Technology*, 1998, 98, pp.217-222.
- [11] HARTNETT, J.P. MINKOWYCZ, W.J. Calculational methods for performance of heat exchangers enhanced with fluidized beds. *Letters in heat and mass transfer*, 1976, 3, pp.555-564.
- [12] MANLAPAZ, R.L. CHURCHILL, S.W. Fully developed laminar convection from a helical coil. *Chemical Engineering Communications*, 1981, 9, 185.