

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LECHO EMPACADO DE piedras A ALTA TEMPERATURA UTILIZANDO ESCORIA DE COBRE COMO MATERIAL DE ALMACENAMIENTO

Ian Wolde – iwolde@uc.cl

Ignacio Calderón-Vásquez - idcalderon@uc.cl

Valentina Segovia A. - vosegovia@uc.cl

José M. Cardemil - jmcardem@uc.cl

Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, Pontificia Universidad Católica de Chile

**Resumen.** *El almacenamiento térmico ha mostrado ser altamente beneficioso al acoplarse a sistemas solares para la generación de calor y energía. Actualmente se utiliza en centrales eléctricas concentradas que utilizan sal fundida como material de almacenamiento, pero esta tecnología tiene inconvenientes considerables, ya que puede afectar el rendimiento de la planta. Se ha demostrado que el almacenamiento en lecho empacado utilizando aire como fluido de transferencia de calor es una alternativa competitiva, especialmente cuando se utilizan materiales de desecho industriales, lo que permite un alto rendimiento de almacenamiento. Este estudio considera una configuración experimental de un tanque horizontal lleno de escorias de cobre, que opera dentro del rango de temperatura media a alta, en un ciclo de carga-descarga. Los resultados muestran que la alta capacidad térmica de las escorias induce una alta inercia térmica y densidad de energía del tanque de almacenamiento, sin ningún inconveniente asociado con los altos gradientes térmicos.*

**Palabras clave:** *Almacenamiento térmico, estudio experimental, lecho empacado de piedras, escoria de cobre.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) se han mostrado como una tecnología competitiva para mitigar el desfase entre la radiación solar y la demanda de energía. Las plantas de concentración de energía solar (CSP) utilizan TES para suministrar calor a un flujo constante para la generación de energía, evitando las variabilidades en el recurso solar. Las sales fundidas se utilizan actualmente como medios de almacenamiento en las plantas de CSP, pero su estabilidad térmica limita el rendimiento de todo el sistema, especialmente dado su alto punto de congelación de aproximadamente 220°C (Intrator & Dunn 2011). Por otro lado, los sistemas de almacenamiento con lecho empacado de piedras se han mostrado como una alternativa prometedora, ya que permite almacenar energía a temperaturas más altas y en un amplio rango, aumentando el desempeño y la densidad de energía. El almacenamiento en lecho empacado tiene la ventaja de usar una amplia gama de fluidos caloportadores (HTF). Se ha demostrado que usar HTF de menor costo como el aire reduce el costo de TES en un 35% (Agalit et al. 2017).

Entre los materiales sólidos de relleno de lecho empacado encontrados en la literatura, se han considerado alternativas como piedras naturales (El Alami et al. 2020), ladrillos de sílice y manganeso (Fernández et al. 2012), y subproductos de procesos industriales (Navarro et al. 2012, Gil et al. 2014, Agalit et al. 2017); materiales que son de relativa simplicidad de aplicación. Sin embargo, los materiales que suelen ser de bajo costo poseen baja capacidad de almacenamiento térmico, y los que sí cumplen con este requisito, suelen ser de mayor costo. Adicionalmente, la mayoría de estos materiales presentan baja capacidad de almacenamiento térmico en comparación a medios como sales fundidas, aceites térmicos, agua, etc. Ahora bien, entre las alternativas con mayor potencial se tienen los subproductos de procesos industriales de metalurgia, pues al operar a alta temperatura, es más probable que los residuos sean más estables térmicamente en un amplio rango de temperaturas, además de una composición óxido-ferrosa que les permite una relativamente alta capacidad de almacenamiento y conductividad térmicos (Agalit et al. 2020). Las escorias de procesos como la pirometalurgia del cobre o la siderometalurgia, han sido considerados como buenos candidatos para el almacenamiento térmico, debido a su alta capacidad térmica y tolerancia a ciclos térmicos de alta temperatura (Curto & Stern 1980, Navarro et al. 2012, Ortega-Fernández et al. 2015). En especial, la escoria de cobre chilena ha presentado valores de calor específico comparables a los de sales fundidas, lo cual, junto con su alta densidad, podrían sugerir una alternativa costo-eficiente de almacenamiento térmico. Estos resultados se mostraron en una reciente evaluación de escoria de cobre chilena para el almacenamiento térmico de un lecho empacado axial, se mostró que este material favorece una alta densidad de energía y una baja tasa de destrucción de la exergía durante ciclos de operación consecutivos (Calderón-Vásquez et al. 2021).

El presente estudio muestra un análisis experimental de un sistema TES utilizando escoria de cobre como medio de almacenamiento y aire como HTF, en una disposición horizontal y uni-direccional. La configuración descrita promete un buen desempeño frente a altas temperaturas y elevados gradientes térmicos. Se espera obtener nociones realistas del comportamiento térmico y fluidodinámico del sistema tratado, y generar datos útiles para mejorar los modelos de sistemas de lecho empacado.

## 2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

### 2.1. Descripción del Sistema

La instalación experimental consiste en un lecho empacado de piedras de escoria de cobre confinado volumen de pruebas definido por un estanque cilíndrico de acero al carbono y dispuesto horizontalmente, como se muestra en la Figura 1a. La capacidad interna del estanque central es de 7,45 L y se ensambla a tuberías de acero en cada uno de sus extremos por medio de bridas. Para contener el material de almacenamiento dentro del volumen las piedras el volumen de pruebas, se cuenta con mallas que se fijan por medio de dos pletinas: una soldada al interior del estanque, donde descansa la malla, y sobre ella, la segunda pletina que se fija a la otra mediante pernos. Lo anterior permite que la reposición de las piedras dentro del estanque sea sencilla al remover sólo una de las mallas que sujeta el sistema (Ver Figura 1b). El cilindro central cuenta con un largo de 400 mm, un diámetro interno de 158 mm y un espesor de pared de 7 mm. Todo el sistema descrito se sitúa sobre una base de acero al carbono que se ubica encima de una mesa de trabajo. El diseño propuesto tiene la ventaja de ser modular, pues facilita la remoción del cilindro central para la prueba de distintas muestras de lecho empacado con escoria de cobre. Respecto a la aislación del sistema, entre las bridas apernadas se utilizan sellos de EcoGraf® para evitar fugas de aire a través de esas zonas. Para evitar la pérdida de calor, se emplea una capa de lana mineral de espesor 25 mm en todos los elementos del sistema (cilindro central, tuberías de entrada y salida, y bridas) y que se sostiene con una malla de acero inoxidable.

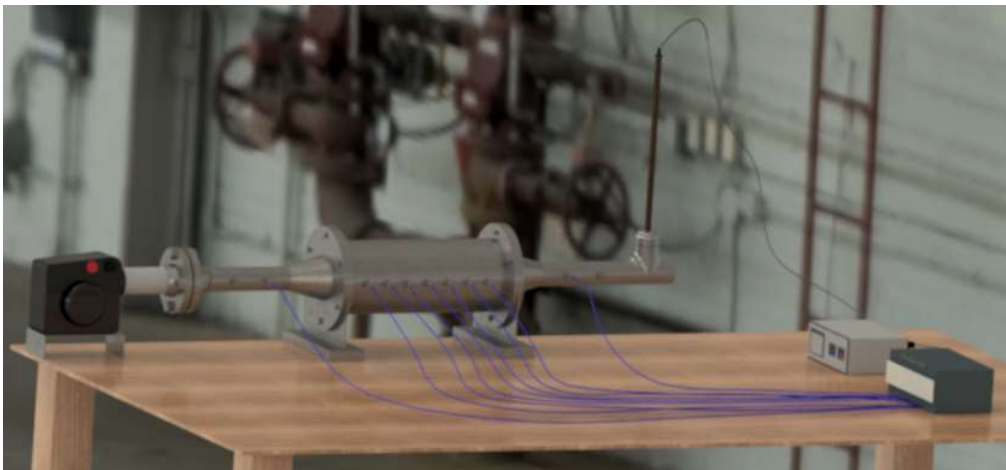


Figura 1 - Vista completa del experimento.

En un extremo del sistema, se encuentra la fuente de calor: un dispositivo capaz de calentar y suministrar aire a altas temperaturas, el cual suministra energía al lecho empacado. La operación básica del sistema se divide en dos etapas: El período de carga, donde el soplador utiliza aire atmosférico para entregar calor al fluido mediante resistencias eléctricas y lo suministra a altas temperaturas. En este proceso, el aire entra al estanque y transfiere el calor a las piedras, saliendo del sistema por la tubería de salida. Por otro lado, para el proceso de descarga el sistema de calentamiento es apagado y sólo se suministra aire a temperatura ambiente. De esa manera, las piedras transfieren el calor almacenado al aire circulante, el cual aumenta su temperatura, previo a ser descargado del sistema por la tubería de salida. Por lo tanto, la operación completa del sistema se efectúa con un flujo de fluido unidireccional. En la Tabla 1 se muestran las condiciones de operación admisibles de la instalación experimental.

La Figura 2 indica la disposición de la instrumentación que registra los datos de temperatura, caída de presión y velocidad del aire. Todas estas variables permiten caracterizar los procesos de transferencia de calor que ocurren dentro del estanque. Con el uso de termocuplas tipo K se realiza la medición de temperatura una serie de puntos clave del sistema de almacenamiento: En las tuberías de entrada y salida para registrar la temperatura del aire antes y después de pasar por el lecho de piedras, denotadas como  $T_{in}$  y  $T_{out}$ , y a lo largo del cilindro central para capturar la evolución temporal de la termoclina formada en el lecho empacado. Para esto último, se insertan 7 termocuplas equiespaciadas a una distancia de 50 mm, y cuya vaina se encuentra en contacto con las piedras y el aire circundante (termocuplas  $T_1, \dots, T_7$  en Figura 2). Se utiliza un sensor de presión diferencial para medir la caída de presión en el aire tras el paso por el lecho empacado. Para ello, en las tuberías de entrada y salida apenan unos capilares de acero inoxidable a unos terminales roscados soldados en las tuberías. La unión del sensor de presión con el sistema se hace mediante mangueras de silicona de 8 mm de diámetro. La función del capilar de acero inoxidable es de remover calor y bajar la temperatura del aire estancado, protegiendo así la integridad del sensor de presión. Los sensores mencionados están conectados a un datalogger marca Campbell Scientific CR1000. Por último, mediante un termo anemómetro de hilo caliente situado en la tubería de salida, se puede medir la velocidad del fluido a altas temperaturas. Esta probeta está conectada a un anemómetro digital Kanomax, donde los datos pueden ser leídos y almacenados en tiempo real.

Tabla 1 - Condiciones de operación del experimento.

Parámetro	Valor
Temperatura admisible	20°C (temp. ambiente) a 650°C
Flujo de aire admisible	200 a 900 L/min
Presión estática del soplador	1 kPa
Potencia del soplador	3,7 kW

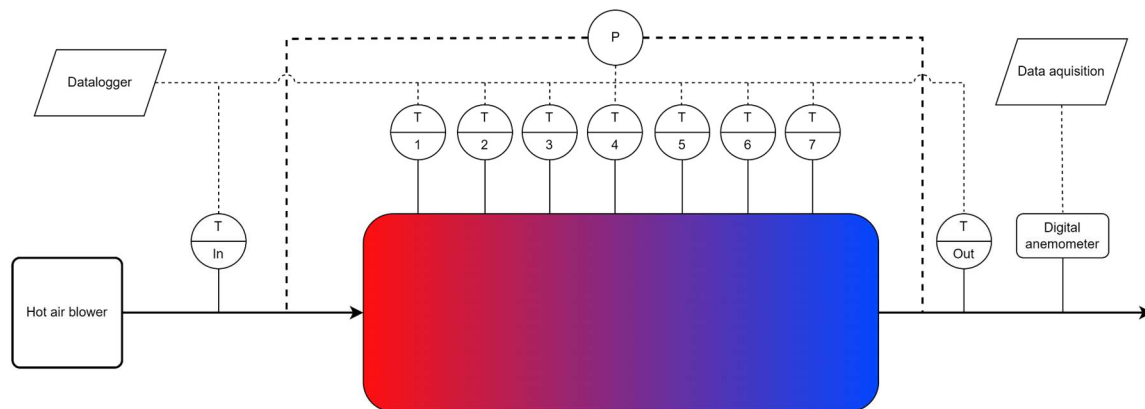


Figura 2 - Diagrama del experimento.

La fuente de calor empleada para suministrar el aire a altas temperaturas corresponde a un soplador de aire Leister modelo HOTWIND SYSTEM, de potencia de 3700 W. El soplador es un ventilador con una resistencia eléctrica interna que transfiere calor al aire atmosférico entrante, saliendo del sistema a altas temperaturas. El dispositivo dispone de potenciómetros independientes para regular la potencia de calentamiento y el caudal de aire. No obstante, los valores reales entregados por el equipo dependen de las curvas de funcionamiento del ventilador, pues la operación estará regulada por la potencia límite de éste. De esa manera, aumentar el caudal de aire hace que disminuya la temperatura de salida, pues se reduce la potencia de calentamiento a esas condiciones. De acuerdo con el fabricante, el HOTWIND SYSTEM puede alcanzar el 100% de potencia de calentamiento cuando se emplea un caudal de 300 L/min (Leister, 2011).

## 2.2. Descripción del material de relleno

Las piedras de escoria de cobre poseen un carácter altamente heterogéneo, con microestructuras que difieren entre piedras y dentro de la misma, debido a que luego del proceso de fundición, la escoria solidifica a diferentes tasas creando piedras con carácter más vítreo que otras, sin embargo, en su mayoría la escoria se caracteriza por ser amorfa. Según resultados de una caracterización preliminar de la escoria de cobre, sus valores de calor específico ( $c_p$ ) aparente están entre 0,8 y 2,3 [kJ/kgK], considerando muestras de dos fundiciones distintas (Calderón-Vasquez et al. 2021). Estos resultados muestran la alta variabilidad de propiedades de una muestra a otra, sin embargo, la existencia de muestras con  $c_p$  mayor al de las sales fundidas, generalmente de 1,5 [kJ/kgK], resultan en un valor promedio mayor y por lo tanto una potencial capacidad térmica mayor.

Para la selección de piedras, se consideró que el modelo asume las partículas de escoria de cobre como esferas, considerando que según el diagrama de Krumbein (Krumbein & Sloss 1951) las piedras de escoria de cobre tendrían una redondez cercana a 0,3 y esfericidad en general de 0,5 y 0,7. Posteriormente, se marcó un espacio aproximado de 20 cm donde se colocaron las piedras una al lado de otra, de manera de que cada 10 piedras que cupieran en el espacio establecido eran seleccionadas. Se descartaron piedras que tuvieran uno o más lados considerablemente menor o mayor a 2 cm. De esta manera, el estanque fue relleno con escoria de cobre de aproximadamente 2 cm de diámetro y porosidad estimada del medio de 0,39.

## 2.3. Procedimiento experimental

En el banco de pruebas se analizó el comportamiento térmico del lecho empacado para distintos tiempos de carga del sistema y a distintas temperaturas de entrada de aire. De ese modo, se configuraron los siguientes casos que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 - Condiciones de operación que serán consideradas en cada experimento.

Condición de operación	Valor	
Tiempo de carga	30 min	60 min
Nivel de calentamiento	5 ( $\approx 330^\circ\text{C}$ de temperatura de entrada y potenciómetro de flujo en 10)	10 ( $\approx 560^\circ\text{C}$ de temperatura de entrada y potenciómetro de flujo en 3)
Total de experimentos	4	

Cada experimento comienza con la fase de carga, donde primero se ajusta el potenciómetro del soplador de aire de acuerdo a la potencia de calentamiento que se desea evaluar (5 o 10), y se enciende el equipo dando paso a la entrada de aire ajustando el potenciómetro del caudal de acuerdo con lo especificado por el fabricante (ver Tabla 2). Una vez cumplido el tiempo de carga del sistema, el potenciómetro de calentamiento se mueve hasta la posición 0, entrando así, aire atmosférico al lecho empacado, y dando inicio al período de descarga. La prueba finaliza cuando todas las mediciones temperaturas están a no más de  $10^\circ\text{C}$  de diferencia con la temperatura ambiente.

#### 2.4. Ecuaciones de transferencia

A partir de los datos medidos se realizaron cálculos del flujo másico que circula a través del sistema, y los niveles de energía cargada ( $E_{ch}$ ) y acumulada ( $E_{st}$ ) durante los distintos instantes de operación. Despreciando las fugas de aire a través de las uniones al realizar un balance de masa en el sistema se tiene que  $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m}$ . Luego, con los datos medidos, se puede calcular el flujo másico con la ecuación (1).

$$\dot{m} = \rho_f(T_{out})A_T v_{out} \quad (1)$$

donde  $\rho_f(T_{out})$  es la densidad del fluido calculada con la temperatura medida a la salida del sistema,  $A_T$  es el área transversal de la tubería de salida, y  $v_{out}$  es la velocidad medida a la salida del sistema. Para los balances de energía por su parte, se considerarán las siguientes expresiones:

$$E_{ch} = \sum_{t=1}^{N_t} \dot{m}_t (h_{in,t} - h_{out,t}) \Delta t \quad (2)$$

$$E_{st} = \rho_s c_{p,s} (1 - \varepsilon) A_{pb} \sum_{j=1}^{N_T} (T_{j,f} - T_{j,0}) \Delta z_j \quad (3)$$

donde  $\rho_s$ ,  $c_{p,s}$ ,  $\varepsilon$  es la densidad del sólido, su calor específico, y porosidad del lecho empacado, respectivamente.  $h$  es la entalpía del fluido y  $A_{pb}$  es el área transversal del lecho empacado. Los subíndices  $in$ ,  $out$ ,  $t$ ,  $j$ ,  $f$ ,  $0$  hacen referencia a entrada, salida, instante de tiempo, posición de la  $j$ -ésima termocupla, instante final e inicial, respectivamente.

### 3. RESULTADOS

Las Figuras 4 y 5 muestran los perfiles temporales de temperatura del sistema para los dos niveles del calentador, y con tiempos de carga de 30 y 60 minutos. Los gráficos separan las zonas de carga y descarga descritas en la metodología. Las curvas T1 a T7 son las mediciones de las termocuplas en el interior del estanque, ordenadas según la dirección de flujo, y las curvas Tin y Tout son las mediciones de las termocuplas en la zona de entrada y salida del estanque, respectivamente.

El primer fenómeno notable es la temperatura de entrada, con la carga térmica con un comportamiento cercano a un escalón, el cual permite replicar con cercanía un proceso térmico de altas potencias de suministro. Es destacable el avance del frente térmico en el estanque a medida que pasa el tiempo de carga, y el paso al proceso de descarga da lugar a una inversión entre las curvas T1 a T7, dada la alta inercia térmica del medio de escoria con aire. La diferencia de convexidad entre T1 y T7 en los primeros 20 minutos para el experimento de nivel 5, y 40 minutos para el experimento de nivel 10 sugiere diferentes procesos de transferencia de calor que dominan las diferentes partes del volumen. Es la convección forzada la cual domina los fenómenos térmicos cerca de la entrada, y a medida que la velocidad del aire se ralentiza, la difusión y la conducción ganan relevancia cerca de la salida. También es destacable cómo las curvas T1 y T2 están más cerca unas de otras, lo que puede explicarse por una termocupla ligeramente torcida, o por una distribución no uniforme en la porosidad del medio, lo que lleva a una variación de la difusividad térmica.

Las Figuras 6 y 7 muestran los perfiles temporales de flujo másico y caída de presión del sistema, separados en el nivel del soplador y tiempo de carga. El flujo másico del sistema se ve fuertemente influenciado por la potencia consumida por la fuente de calor, fenómenos notorios al iniciar las pruebas y al momento de pasar de carga a descarga. Los cambios de consumo de potencia para generar calor generan leves aumentos del flujo másico hasta que el sistema es capaz de regular el flujo, lo cual es notorio en todos los experimentos.

La caída de presión del sistema responde más a la velocidad del aire pasando por el sistema, el cual a su vez está influenciado por la temperatura del medio. Al entrar el flujo de aire caliente al sistema y entregar calor, disminuye su temperatura, y por lo tanto su densidad, lo que provoca una disminución de la temperatura del aire circulante, lo cual finalmente genera bajas caídas de presión en el sistema. En las Figuras 6 y 7 se aprecia como la pérdida de carga del sistema aumenta gradualmente a medida que se acumula energía en las piedras. Al pasar a la fase de descarga, se aprecia un fuerte aumento en la caída de presión, la cual se explica por el paso de aire a bajas temperaturas por el sistema, el cual se expande y aumenta su velocidad.

Para los distintos niveles del soplador, se trabajó a distintos caudales, por lo que los niveles de pérdida de carga no son directamente comparables entre sí. Es importante destacar que para el experimento a nivel 10, el flujo másico es lo suficientemente bajo como para que el sensor trabaje cerca de su límite inferior de medición, por lo cual es esperable que pueda marcar errores, como es posible apreciar en la Figura 7. Lo anterior se explica debido a que el sensor de diferencia de presión puede arrojar valores negativos en caso de que una fluctuación de la presión llegue bajo el umbral de medición. Este fenómeno es recogido por el datalogger, en donde se promedian las muestras instantáneas cada 30 segundos, generando así la nube de puntos bajo la curva con las mediciones correspondientes.

Finalmente, en la tabla 3 se muestra el resultado del cálculo de energía entregada por el soplador (cargada) y de energía acumulada por el medio (almacenada), a partir de la metodología de cálculo mostrada en el punto 2.4

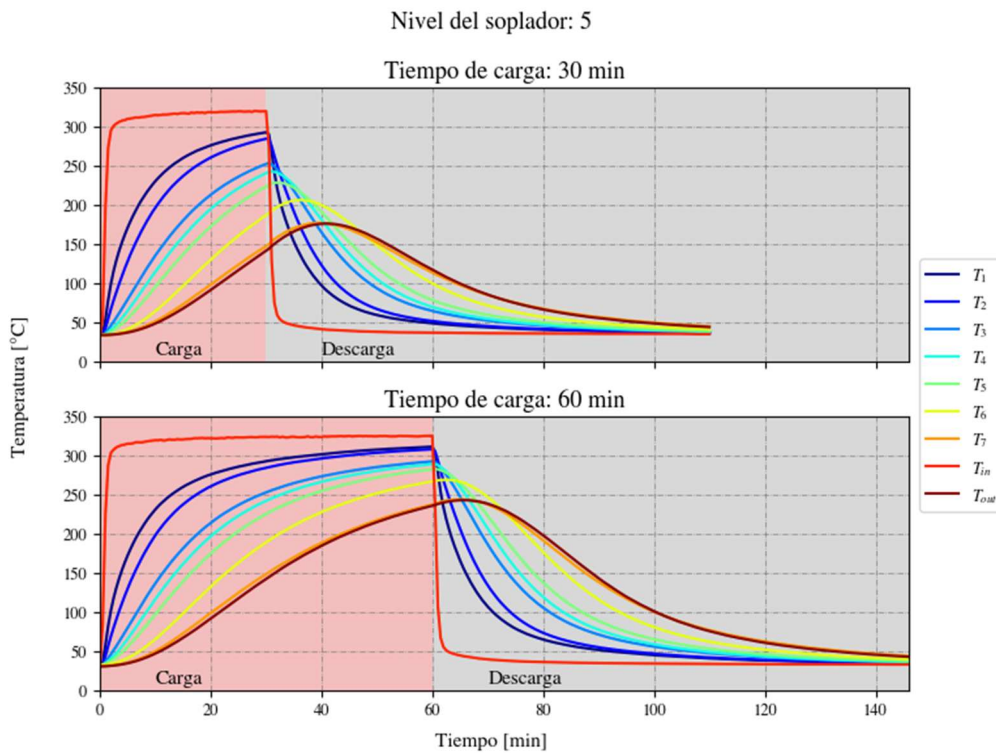


Figura 4 - Variación temporal de la temperatura medida en cada termocupla ubicada en el estanque para un nivel 5 de soplador: (arriba) 30 minutos de carga, (abajo) 60 minutos de carga.

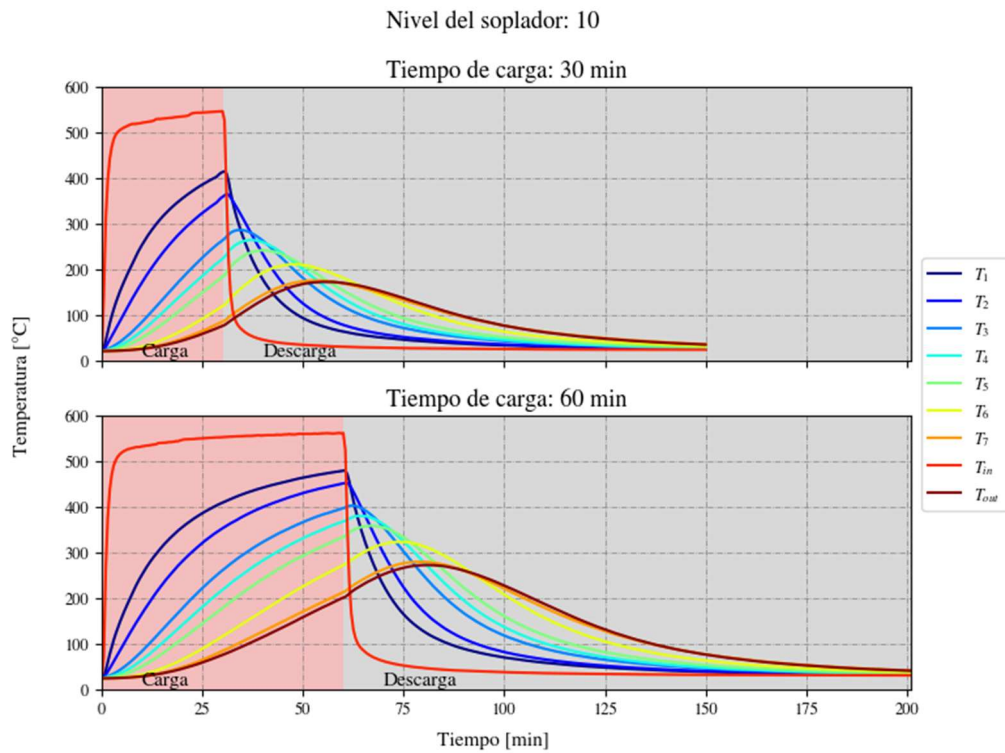


Figura 5 - Variación temporal de la temperatura medida en cada termocupla ubicada en el estanque para un nivel 10 de soplador: (arriba) 30 minutos de carga, (abajo) 60 minutos de carga.

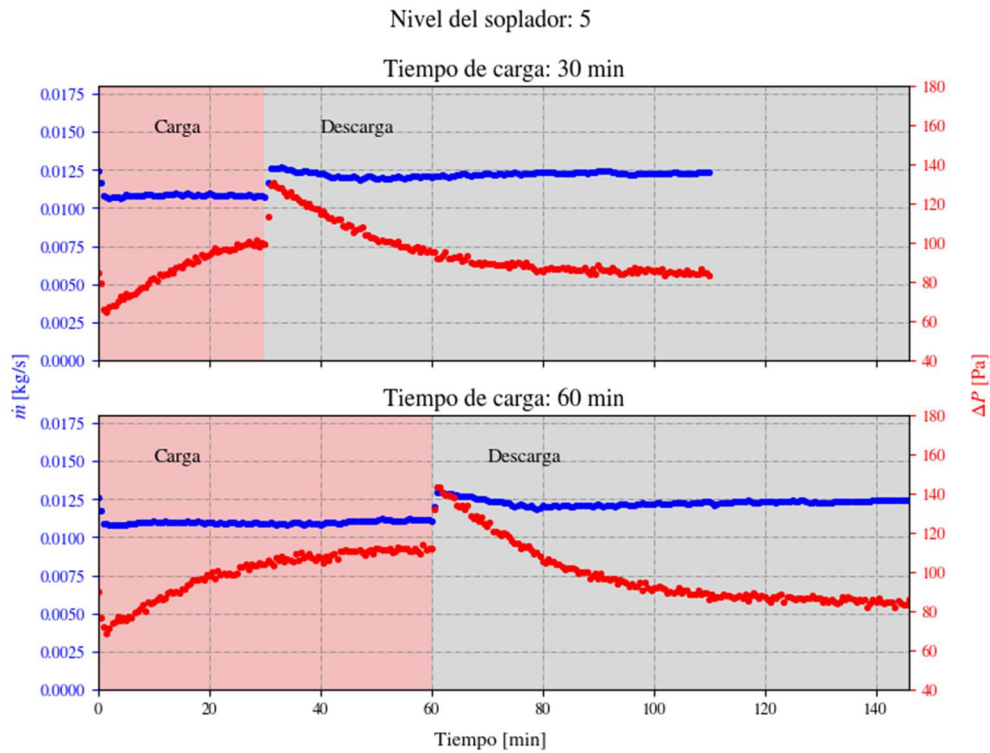


Figura 6 - Evolución temporal del flujo másico que circula a través del estanque y la pérdida de carga. Caso de soplador en nivel 5 de calentamiento.



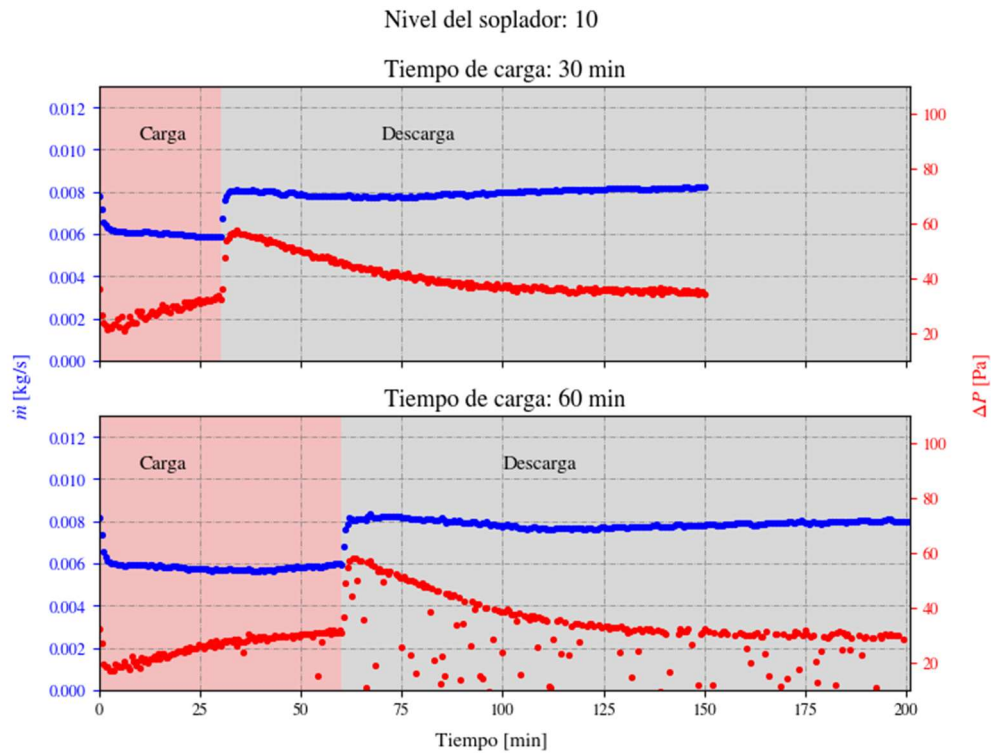


Figura 7 - Evolución temporal del flujo másico que circula a través del estanque y la pérdida de carga. Caso de soplador en nivel 10 de calentamiento.

Tabla 3 - Energía cargada, descargada y almacenada en cada experimento

	Experimentos			
	Nivel 5 de soplador	Nivel 5 de soplador	Nivel 10 de soplador	Nivel 10 de soplador
Energía [MJ]	30 min de carga	60 min de carga	30 min de carga	60 min de carga
Cargada	4,65	7,42	5,39	9,91
Almacenada	3,43	4,34	3,69	5,75

#### 4. ANÁLISIS

El comportamiento en el estanque muestra una alta capacitancia térmica, en donde las elevadas temperaturas de carga permiten que el medio acumule una importante cantidad de energía. Los resultados muestran también elevados gradientes de temperatura en el medio de almacenamiento, a los cuales se suma que el frente térmico avanza por el sistema a bajas velocidades.

La configuración analizada en este estudio puede ser de utilidad en aplicaciones industriales en donde sea necesario mitigar variaciones en el recurso energético y entregar un perfil de temperatura constante, debida su elevada inercia térmica. El sistema es capaz de acumular energía térmica importante en proporción a su volumen, previo a que la temperatura a la salida sea notoriamente superior al ambiente, como se aprecia en las figuras 4 y 5, por lo que es apropiado su uso en sistemas con elevadas tasas de carga.

La disposición horizontal del sistema evita que se genere una estratificación térmica axialmente en el sistema, permitiendo analizar con mayor detalle la dinámica al interior del estanque. En comparación a una disposición vertical, la configuración analizada tiene como desventaja un potencial aumento en las pérdidas térmicas, dado que la zona superior del estanque presenta mayores temperaturas debido a estratificación térmica, dando como resultado que la zona a alta temperatura en las paredes del estanque sea un área mayor.

Como consecuencia de su elevada inercia térmica, la configuración no es idónea para aplicaciones en donde se necesiten tasas elevadas de descarga, ya que la respuesta del sistema solo es apta. Como solución a la baja tasa de descarga, es relevante mencionar como trabajo futuro el estudio de sistemas con flujo bidireccional, en donde sea posible invertir la dirección del flujo con tal de extraer la energía a altas temperaturas acumulada en la zona inicial del estanque. Esto

permitiría ampliar el espectro de aplicaciones de estos sistemas en donde sea necesario contar con tiempos de respuesta menores, facilitando su potencial integración a la industria térmica.

Las variaciones en la caída de presión dentro del sistema al imponer cambios en la temperatura del flujo entrante son un potencial problema para considerar. El sistema de control de un sistema de almacenamiento térmico debe considerar las variaciones no lineales de la pérdida de carga en el sistema, y asociarlos tanto a velocidad como a temperatura, si es que la aplicación requiere mantener flujos máxicos constantes. La integración de correlaciones de pérdida de carga para medios porosos es vital para conseguir un buen desempeño del sistema.

Los datos de energía de la tabla 3 muestran una mayor cantidad de energía al cargar el sistema por mayor tiempo, pero un aumento no tan relevante al aumentar la temperatura. El fenómeno puede deberse al aumento de las pérdidas térmicas del sistema, las cuales aumentan proporcionalmente al aumento de temperatura. Otra causa puede explicarse por la configuración uniaxial del sistema, el cual obliga a una carga parcial

El presente estudio considera el trabajo a bajos caudales, por lo que queda pendiente el análisis a velocidades más altas, en donde se asemeje más al comportamiento de sistemas industriales de altas potencias, donde sistemas TES como el descrito prometen buenos comportamientos.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el uso de escoria de cobre como medio de almacenamiento no presenta ningún inconveniente al trabajar a elevadas temperaturas, ni por los pronunciados gradientes térmicos. El medio además se presenta como una buena alternativa para almacenar una importante cantidad de energía térmica. El sistema presenta bajas pérdidas de carga al trabajar a caudales bajos, pero es sensible a variaciones en la temperatura de entrada. Lo anterior da cuenta de la relevancia de contar con un sistema de control que considere el efecto térmico en las variaciones de velocidad y caída de presión, con tal de asegurar un caudal determinado.

La configuración unidireccional puede ser de utilidad en casos en donde sea necesario absorber altas tasas de carga, en particular considerando altas temperaturas. La descarga muestra dinámicas lentas, en donde su fortaleza se presenta en aplicaciones donde lo relevante sea mitigar las variaciones del recurso térmico.

Lo anterior da cuenta de la posibilidad de integrar almacenamiento con suministros a altas temperaturas como las tecnologías de concentración solar. El trabajo con aire como medio de almacenamiento permite reducir ampliamente los costos de operación, pero es necesario ampliar la investigación hacia trabajo a mayores caudales y nuevas configuraciones

## REFERENCIAS

- AGALIT, H., ZARI, N., MAAFOURI, M., (2017). Thermophysical and chemical characterization of induction furnace slags for high temperature thermal energy storage in solar tower plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 172, 168–176.
- AGALIT, H., ZARI, N., & MAAROUFI, M., 2020. Suitability of industrial wastes for application as high temperature thermal energy storage (TES) materials in solar tower power plants – A comprehensive review. *Solar Energy*, 208:1151–1165.
- CURTO, P. A., & STERN, G., 1980. Thermal storage using slag. *Alternative Energy Sources*; (United States), 1(CONF-801210-).
- CALDERÓN-VÁSQUEZ, I., SEGOVIA, V., CARDEMIL, J. M., & BARRAZA, R., 2021. Assessing the use of copper slags as thermal energy storage material for packed-bed systems. *Energy*, 227.
- EL ALAMI, K., ASBIK, M., & AGALIT, H., 2020. Identification of natural rocks as storage materials in thermal energy storage (TES) system of concentrated solar power (CSP) plants – A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 217, 110599.
- FERNANDES, D., PITIÉ, F., CÁCERES, G., & BAEYENS, J., 2012. Thermal energy storage: “How previous findings determine current research priorities.” *Energy*, 39(1):246–257.
- GIL, A., CALVET, N., ORTEGA, I., RISUEÑO, E., FAIK, A., & RODRÍGUEZ-ASEGUINOLAZA, J., 2014. Characterization of a by-product from steel industry applied to thermal energy storage in Concentrated Solar Power. *Eurotherm Seminar #99 Advances in Thermal Energy Storage*, 1–9.
- INTRATOR, J., & DUNN, B. S., 2011. 2020 Strategic Analysis of Energy Storage in California: Final Project Report: Public Interest Energy Research (PIER) Program. California Energy Commission.
- KRUMBEIN, W. C., & SLOSS, L. L., 1951. Stratigraphy and sedimentation (Vol. 71, No. 5, p. 401). LWW.
- LEISTER., 2011. Hotwind Premium & Hotwind System User’s Guide. Leister Technologies AG.
- NAVARRO, M. E., MARTÍNEZ, M., GIL, A., FERNÁNDEZ, A. I., CABEZA, L. F., OLIVES, R., & PY, X., 2012. Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107:131–135.
- ORTEGA-FERNÁNDEZ, I., CALVET, N., GIL, A., RODRÍGUEZ-ASEGUINOLAZA, J., FAIK, A., & D’AGUANNO, B., 2015. Thermophysical characterization of a by-product from the steel industry to be used as a sustainable and low-cost thermal energy storage material. *Energy*, 89:601–609



## EXPERIMENTAL STUDY OF ROCK PACKED BED AT HIGH TEMPERATURE OPERATION USING COPPER SLAG AS STORAGE MATERIAL

**Abstract.** *Thermal energy storage has been shown to be highly beneficial when coupled to solar process heat and power generation systems. Currently, it is used in concentrated power plants using molten salt as storage material, but this technology has considerable drawbacks, as it can affect plant performance. Packed-bed storage using air as heat transfer fluid has been shown to be a competitive alternative, especially when industrial waste materials are used, allowing high storage performance. This study considers an experimental setup of a horizontal tank filled with copper slags, operating within the medium to high-temperature range, in a charge-discharge cycle. The results show that the high thermal capacity of the slags induces a high thermal inertia and energy density of the storage tank, without any inconvenience associated with the high thermal gradients.*

**Keywords:** *Thermal storage, Experimental study, Rock packed bed, Copper slag*