

# Análisis estadístico de variabilidad del calor específico de escoria de cobre chilena para almacenamiento térmico de lecho empacado

Valentina Segovia-Araya<sup>1</sup>, Ignacio Calderón-Vásquez<sup>1</sup>, José Miguel Cardemil-Iglesias<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo Solar UC, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.  
Email: vosegovia@uc.cl

## Resumen

El presente trabajo entrega un análisis del comportamiento del calor específico ( $c_p$ ) de muestras de escoria de cobre chilena, considerando la variabilidad del  $c_p$  en función de la temperatura y su impacto en el rendimiento de sistemas de almacenamiento térmico de lecho empacado (PBTES). Se desarrollaron modelos probabilísticos basados en los percentiles 5%, 50% y 95% de los datos de  $c_p$  para capturar los casos más y menos probables. Los resultados muestran que el valor promedio de  $c_p$  se encuentra ligeramente por encima de la mediana, indicando un sesgo positivo. Además, se observa que el modelo P5% muestra un avance rápido de la termoclina en el estanque, mientras que el modelo P95% presenta una propagación más lenta. La eficiencia del ciclo de carga y descarga presenta cambios menores a pesar de las diferencias en  $c_p$ , sugiriendo que la eficiencia del PBTES depende más de las condiciones de diseño que de la variabilidad del  $c_p$  del material de relleno.

**Palabras clave:** Almacenamiento térmico; Caracterización de materiales; Materiales heterogéneos; Análisis de Propiedades Termofísicas.

## Abstract

The present work gives an analysis of the specific heat capacity ( $c_p$ ) behavior of copper slag samples, considering the variability of  $c_p$  as a function of temperature and its impact on the performance of a packed bed thermal energy storage (PBTES) system. Probabilistic models based on the 5th, 50th, and 95th percentiles of  $c_p$  data were developed to capture the most and least probable cases. The results show that the average  $c_p$  value is slightly above the median, indicating a positive skew. Additionally, it is observed that the P5% model shows a rapid advancement of the thermocline in the storage tank, while the P95% model exhibits a slower propagation. The roundtrip efficiency shows minor changes in  $c_p$ , suggesting that the efficiency of the PBTES depends more on the design conditions than on the variability of the  $c_p$  of the filler material.

**Keywords:** Thermal Energy Storage; Material Characterization; Heterogeneous Materials; Thermophysical Properties Analysis.

## 1. Introducción

En el contexto energético actual, con la creciente penetración de fuentes renovables de energía a la red eléctrica, las tecnologías que aprovechan el recurso solar son un foco de interés dada la alta disponibilidad del recurso a nivel mundial, con potencial competitivo respecto a fuentes convencionales de energía. Las plantas de Concentración Solar de Potencia (CSP), en particular, son de interés en el desarrollo de sistemas de suministro de energía debido a su potencial para proporcionar electricidad a gran escala [1]. Esta tecnología aprovecha los abundantes recursos solares e

integra el almacenamiento térmico (TES) para mejorar la confiabilidad y la viabilidad económica. El sistema de almacenamiento térmico cumple con el propósito de reducir el desfase entre la disponibilidad del recurso y los periodos de demanda, abordando así la intermitencia inherente del recurso solar que entra en conflicto con la demanda energética inmediata [2][3]. En así como el desarrollo de sistemas TES con alta capacidad y bajo costo de implementación es crucial para reducir los gastos de inversión y mejorar la competitividad de los proyectos CSP [4]. Actualmente, la configuración principal de almacenamiento térmico utilizada en la industria CSP consiste en dos

contenedores de sales fundidas para el proceso de carga y descarga de calor. Las sales fundidas pueden operar a altas temperaturas, siendo químicamente y térmicamente estables hasta una temperatura máxima cercana a 580 °C [5], mientras que la temperatura mínima de operación está por encima del punto de fusión de la sal, aproximadamente 220 °C [6]. Aunque la sal solar tiene una capacidad térmica relativamente alta en el rango de temperatura de operación, presenta un costo de implementación elevado en comparación con el resto del sistema, equivalente al 49% del costo del TES [7]. Además, debido a su alto punto de solidificación, requiere métodos para proteger las tuberías, intercambiadores de calor y otros componentes del congelamiento, de lo contrario, podría resultar en el colapso de tuberías y fallo del sistema TES [6]. Asimismo, el efecto de corrosión en los materiales de contención en contacto con la sal, especialmente a altas temperaturas y con constantes ciclos térmicos, implica desgaste importante del estanque de almacenamiento [8].

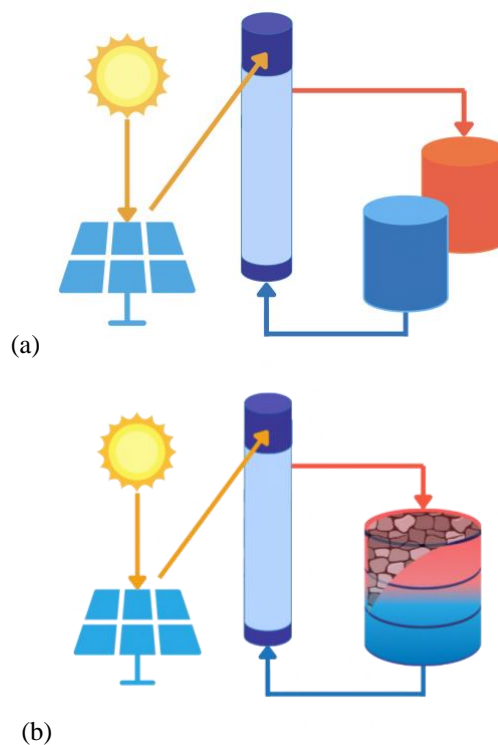
Tanto para la generación de energía mediante Concentración Solar de Potencia (CSP) como para otros sistemas que pueden utilizar almacenamiento de calor, por ejemplo, de procesos industriales, para mejorar la eficiencia energética de las instalaciones [9], es esencial considerar alternativas de TES de alta capacidad para fortalecer la competitividad de estas tecnologías.

Entre los métodos de almacenamiento térmico, el calor sensible es el más simple y económico, ya que depende principalmente del calor específico ( $c_p$ ) y del rango de temperatura del material [10]. Un mayor rango de operación y un  $c_p$  más alto permiten almacenar más calor y aumentar la capacidad de almacenamiento y, en consecuencia, puede aumentar la capacidad de producción de una planta CSP [11].

En la literatura se han reportado diferentes alternativas para reducir costos y aumentar la capacidad de los sistemas TES, especialmente mediante la búsqueda de materiales más económicos y con mayor densidad energética. En el caso del almacenamiento en plantas CSP, existe el potencial de reducir hasta un 35% el costo de implementación al cambiar la configuración de dos estanques a un solo estanque relleno de material sólido [12], aprovechando la estratificación natural del fluido caloportador para generar zonas de diferente temperatura. Esto permite realizar los procesos de carga y descarga de calor en un mismo contenedor, tal como se presenta en el esquema de la **Figura 1**. Además, es posible aumentar la eficiencia de la planta al utilizar un sistema de almacenamiento que alcance mayores temperaturas, empleando materiales sólidos como relleno en una configuración de almacenamiento

térmico de lecho empacado (Packed-Bed TES o PBTES) [13].

Como alternativas de materiales de relleno, se ha propuesto por distintos autores el uso de escorias de industrias como la del acero y el cobre, pues exhiben alta estabilidad térmica y capacidades térmicas competitivas a alternativas como las sales fundidas utilizadas hoy en día [14], [15], [16], puesto que es posible operar en un mayor rango de temperatura.



**Figura 1.** Esquema de planta CSP con almacenamiento térmico de (a) dos estanques con sales fundidas, y de (b) un estanque de lecho empacado con rocas.

La escoria de cobre, el residuo del proceso de la pirometalurgia para extracción de cobre, se genera en una razón de 2,2 toneladas de escoria por tonelada de cobre producido [17], y se presenta como una alternativas con potencial energético para almacenar calor sensible en configuraciones de PBTES. Es un material altamente disponible en Chile, se ha reportado que es térmicamente estable hasta 800 °C y con un  $c_p$  en promedio de 1,1 [J/gK] [16], competitivo con alternativas actuales en estudio en el campo del almacenamiento térmico.

Sin embargo, el interés en la aplicación de este material consiste en utilizarlo tal como se recibe de los vertederos de la fundición, es decir, sin tratamientos o modificaciones para su uso como almacenamiento térmico, con el objetivo de mantenerlo como una

alternativa de bajo costo. No obstante, dado el carácter heterogéneo de las rocas de escoria de cobre, como se puede ver en la **Figura 2**, se introduce una variabilidad que puede afectar el desempeño del medio de almacenamiento, planteando desafíos para predecir y controlar el rendimiento del sistema. Esta variabilidad resulta en una gran dispersión de datos de sus propiedades térmicas, y es crucial considerarla al diseñar PBTES para obtener un sistema confiable y rentable. Comprender y gestionar esta variabilidad es relevante para diseñar sistemas PBTES con subproductos industriales, un aspecto aún no explorado a fondo.



**Figura 2.** Muestras de piedras de escoria de cobre.

La propiedad a analizar en este trabajo es el  $c_p$ , esta propiedad es la principal al evaluar la capacidad de almacenar calor de un material, crucial para modelar el comportamiento térmico de la escoria de cobre en aplicaciones de TES.

La presente investigación analiza la variabilidad del  $c_p$ , de muestras de escoria de cobre chilena y su impacto en el desempeño de un sistema PBTES mediante modelado probabilístico y análisis de distintos indicadores de desempeño de un modelo numérico axial de almacenamiento térmico..

## 2. Metodología

A continuación se describe el material y las metodologías utilizadas para medir y analizar la variabilidad de la escoria de cobre.

### 2.1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Se midió el  $c_p$  de 20 muestras de escoria de cobre molida utilizando calorimetría con un DSC 6000 PerkinElmer en un rango de temperatura de 100 °C a 450 °C, bajo la norma ASTM E-1269 [18]. Se empleó material de referencia zafiro y una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 50 ml/min.

### 2.2. Modelo probabilístico de calor específico

Para obtener el modelo de probabilidad del calor específico a partir de las curvas medidas por DSC, se utiliza la metodología descrita por Jovanovic et al. [19].

Primero, se determina el promedio ( $\mu$ ) y los parámetros de locación, escala o forma de la distribución a evaluar, a partir de los datos de  $c_p$  en cada bloque de temperatura. Luego, se determina la función polinomial que mejor ajusta estos parámetros respecto a la temperatura, obteniendo así una función  $x(T)$ , donde  $x$  corresponde al parámetro de la distribución analizada. Para determinar el grado del polinomio, se elige el que entregue el menor  $R^2$ .

Finalmente, siguiendo el criterio de información de Akaike (Akaike Information Criteria) [20], se determina el valor de la siguiente ecuación:

$$AIC = 2m - 2 \ln L \quad (1)$$

donde  $m$  representa el número total de coeficientes que ajustan el modelo, y  $L$  es la verosimilitud del modelo a los dato de  $c_p$  medidos (un valor por dato), y se calcula la verosimilitud total multiplicando los valores. De esta manera, se obtiene un valor de  $AIC$  con la **Ecuación 1** para cada distribución analizada y su respectivo modelo ajustado.

El valor de  $AIC$  por sí solo no indica si el modelo se ajusta bien a los datos; es un valor comparativo donde el ajuste de menor valor implica el modelo que mejor representa a los datos entre los candidatos. Este criterio se utiliza en este trabajo para comparar siete modelos de distribución de probabilidades: Normal, Gamma MLE (Estimación de Máxima Verosimilitud), Gamma MME (Estimación de Momentos), Weibull, Gumbel, Logística y Log-logística. Para cada uno se determinan los parámetros de forma, locación y escala necesarios. Se comparan los valores de  $AIC$  para cada modelo y se selecciona la distribución que entrega el menor valor.

A partir de la distribución seleccionada, se construye una función de probabilidad para  $c_p$  en cada punto de temperatura. Utilizando esta función, se analizan los percentiles 5%, 50% y 95%:

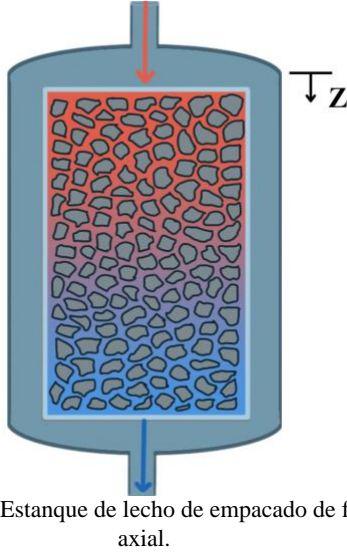
- El percentil 5% (P5%) representa los valores bajos, indicando que menos del 5% de los casos estarán por debajo de este valor.
- El percentil 50% (P50%) o mediana, donde el 50% de los casos estará por debajo, representa el valor central de la distribución.
- El percentil 95% (P95%) indica el límite superior, donde solo el 5% de los casos son mayores que este valor, mostrando así el rango alto de  $c_p$  que es menos probable, pero posible.

Al analizar estos modelos es posible determinar la variabilidad de las muestras tal que permita evaluar el rendimiento y la fiabilidad del sistema. Asegurarse de que el diseño del PBTES tenga en cuenta esta

dispersión ayudará a mejorar la eficacia y la consistencia del modelos.

### 2.3. Simulación de estanque de almacenamiento térmico de lecho empacado (Packed-Bed TES)

Una vez definido el tipo de distribución y los parámetros del modelo, se incorpora este en un modelo numérico de sistema PBTES considerando aire como fluido caloportador. Para esta simulación, se utiliza un modelo previamente presentado en un caso de estudio por Calderon-Vásquez y Cardemil [21]. El modelo considera un flujo axial, tal como se muestra en la **Figura 3**, con una temperatura de carga de 450 °C y una temperatura de descarga de 100 °C, ajustándose a los valores de  $c_p$  medidos para la escoria de cobre.



**Figura 3.** Estanque de lecho de empacado de flujo axial.

Las condiciones de simulación del modelo están detalladas en el caso de estudio referido en [21]. Se mantienen las dimensiones y condiciones de operación del modelo, considerando un criterio de corte para los

procesos de carga y descarga. Esto significa que la temperatura de salida durante la carga no debe exceder en más de 100 °C la temperatura máxima de operación, y la temperatura de salida durante la descarga no debe ser inferior en más de 100 °C a la temperatura mínima de operación. Se ajusta solo los valores de calor específico para evaluar la sensibilidad del modelo de estanque a la variabilidad del  $c_p$ .

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Selección distribución de probabilidades

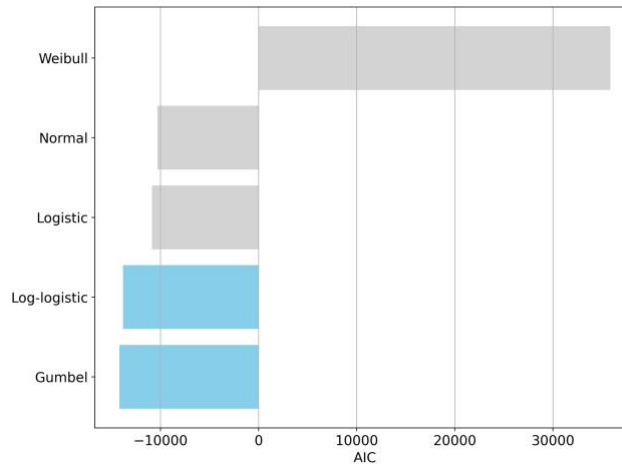
En la **Figura 4** se presentan los resultados de AIC para las principales 5 distribuciones analizadas. Es posible notar que las distribuciones con el menor valor de AIC corresponden a la distribución Gumbel y Logística siendo la distribución con el menor valor el modelo de Gumbel.

A partir de esta distribución se modela el calor específico en función de la temperatura siendo representado por la ecuación (2) donde el parámetro de locación corresponde al promedio ( $\mu$ ) de  $c_p$  para cada punto de temperatura, y  $\beta$  es el parámetro de escala de la distribución de Gumbel evaluado en cada punto de temperatura. Para ambos parámetros se obtiene un polinomio en función de la temperatura representados en las ecuaciones (3) y (4), respectivamente. Para el promedio se obtiene un polinomio de grado 3 con un  $R^2$  de 0.984, mientras que para el parámetro  $\beta$  se obtiene un polinomio de grado 2 con un  $R^2$  de 0.997.

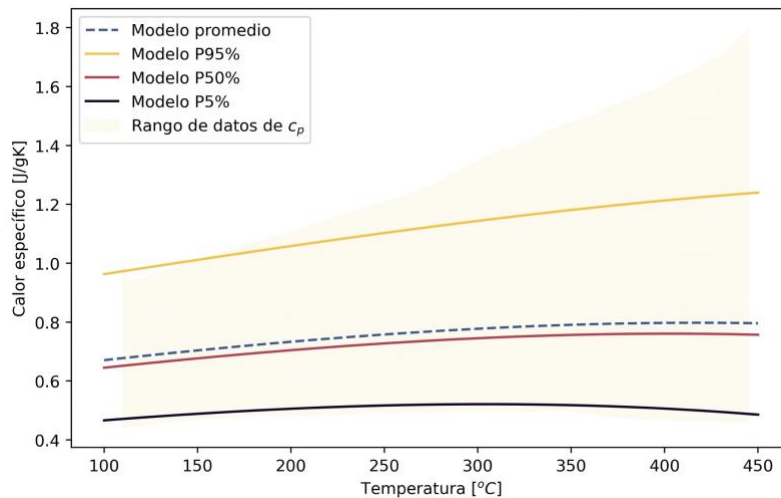
$$f(x; \mu, \beta) = \frac{1}{\beta} \exp \left( -\left( \frac{x-\mu}{\beta} \right) - \exp \left( -\left( \frac{x-\mu}{\beta} \right) \right) \right) \quad (2)$$

$$\mu(T) = -1,032 \times 10^{-9} T^3 - 3,905 \times 10^{-7} T^2 + 7,342 + 10^{-4} T + 0,5319 \quad (3)$$

$$\beta(T) = 1,736 \times 10^{-7} T^2 + 8,543 \times 10^{-5} T + 0,1118 \quad (4)$$



**Figura 4.** Valores de AIC para distintos modelos de distribución de probabilidad del  $c_p$  de escoria de cobre.



**Figura 5.** Modelos probabilísticos de  $c_p$  de la escoria de cobre analizada.

### 3.2. Variabilidad del $c_p$ de las escorias de cobre

La **Figura 5** grafica los modelos según el percentil de datos considerados. Se incluye también el valor promedio estimado en función de la temperatura y el rango de valores de  $c_p$  que alcanzan los datos disponibles. Es posible notar que el valor promedio se ubica por sobre el modelo P50% el cual corresponde a la mediana de los datos, mostrando un sesgo positivo leve. El gráfico revela una notable variabilidad en los datos. Específicamente, los valores de  $c_p$  en el percentil 95% alcanzan valores mayores al doble de los del percentil 5%, lo que indica una amplia dispersión en la capacidad de almacenamiento térmico del material. Adicionalmente, es posible notar que el modelo P50% está más cercano al modelo P5% que al P95% indicando que la distribución de los datos se concentra más hacia la zona inferior del rango de  $c_p$ , es decir que los casos de  $c_p$  alto son menos. Esta diferencia resalta que, aunque los valores bajos de  $c_p$  son más frecuentes y representan el 5% inferior de los datos, los valores altos de  $c_p$ , aunque menos comunes, muestran una variabilidad considerable.

Esta dispersión puede atribuirse a diversos factores, incluyendo las propiedades inherentes del material, las condiciones de muestreo y las variaciones en los procesos de fabricación. La diferencia en magnitud entre los percentiles 5% y 95% sugiere la necesidad de considerar esta variabilidad al evaluar el desempeño del sistema de almacenamiento térmico y analizar como impacta directamente en la eficiencia del sistema y en el diseño del PBTES.

### 3.3. Simulación PBTES

La **Figura 6** presenta los perfiles de temperatura del estanque durante los procesos de carga y descarga luego de 1 h, 1,5 h y 2 h, considerando los modelos de probabilidad basados en los percentiles 5%, 50% y

95%. Estos perfiles muestran cómo la termoclina, o la zona de transición de temperatura, avanza en el estanque en función de los diferentes valores de  $c_p$ .

Durante el proceso de carga, se observa que para el modelo P95%, donde el  $c_p$  es el más alto, la termoclina avanza más lentamente a lo largo del estanque. Esto se debe a que un mayor  $c_p$  implica una mayor capacidad de almacenamiento térmico, lo que hace que el material resista más al cambio de temperatura y, por lo tanto, la propagación de la termoclina sea más lenta al igual que su degradación. En contraste, el modelo P50% muestra un avance más rápido de la termoclina, y a medida que pasa el tiempo, esta se degrada más rápidamente a las 2 h en comparación con el modelo P95%.

El modelo P5%, que tiene el menor  $c_p$ , muestra el avance más rápido de la termoclina. En este caso, la carga se completa rápidamente, y la termoclina se degrada a tal punto que, en aproximadamente 1.5 horas de carga, todo el estanque alcanza una temperatura homogénea. Este comportamiento se debe a que un menor  $c_p$  resulta en una menor resistencia al cambio de temperatura, facilitando una transmisión de calor más rápida a través del material.

Este análisis destaca la importancia de tener en cuenta la variabilidad del  $c_p$  en el diseño y operación de los sistemas PBTES. Los diferentes perfiles de temperatura y tiempos de avance de la termoclina sugieren que la eficiencia y el rendimiento del sistema pueden variar significativamente según el valor del  $c_p$  del material.

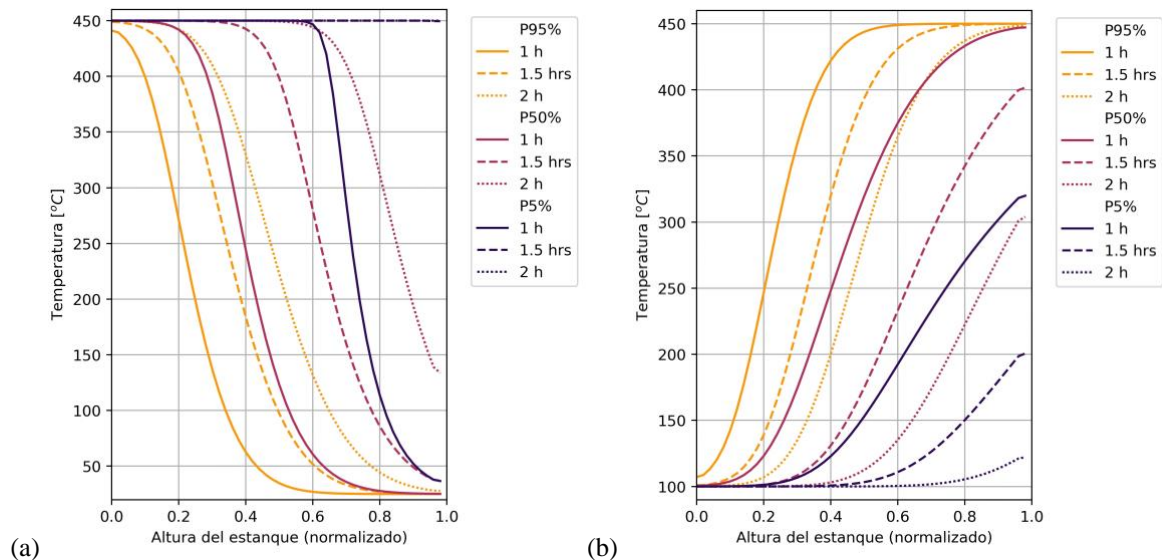
Es importante mencionar que la eficiencia del ciclo de carga y descarga (roundtrip efficiency) no muestra una diferencia proporcional a la variabilidad del  $c_p$ , como se puede ver en la **Tabla 1**. A pesar de la clara diferencia en los valores de  $c_p$  entre los modelos P5% y P95%, la eficiencia del ciclo no presenta cambios



considerablemente diferentes. Esto sugiere que la eficiencia del PBTES depende más de las condiciones de operación, el flujo de calor y el delta de temperatura operado, que de la variabilidad del calor específico del material de relleno.

positivo leve, observándose que el valor promedio se ubica ligeramente por encima de la mediana.

El análisis de los perfiles de temperatura en el estanque axial durante los ciclos de carga y descarga demostró



**Figura 6.** Perfil de temperaturas durante la (a) carga y (b) descarga de modelo axial de PBTES evaluando distintos modelos probabilísticos del calor específico de escoria de cobre.

**Tabla 1.** Eficiencia del ciclo de carga y descarga para los tres modelos de calor específico.

Eficiencia de ciclo carga/descarga	
Modelo P5%	0,829
Modelo P50%	0,808
Modelo P95%	0,733

#### 4. Conclusiones

El presente estudio proporciona una caracterización detallada de las propiedades termofísicas de la escoria de cobre chilena para su potencial uso en sistemas de almacenamiento térmico en lecho empacado (PBTES). A través del análisis de los percentiles 5%, 50% y 95%, se pudo evaluar la variabilidad y el comportamiento del calor específico ( $c_p$ ) de la escoria a lo largo del rango de temperaturas de operación, destacando las diferencias y las tendencias en la distribución de los datos.

Los resultados mostraron que el modelo P50%, representando la mediana, está más cercano al modelo P5% que al P95%, indicando que la mayor concentración de los datos de  $c_p$  se encuentra en el rango inferior, con los valores más altos siendo menos frecuentes. Esta asimetría se traduce en un sesgo

que la termoclina avanza a diferentes velocidades según el modelo de percentil considerado. El modelo P95%, con el mayor  $c_p$ , presenta una termoclina que avanza más lentamente, mientras que el modelo P5%, con el menor  $c_p$ , muestra un avance más rápido y una degradación más rápida de la termoclina.

Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar la variabilidad del  $c_p$  en el diseño y operación de sistemas PBTES, ya que afecta la eficiencia y el comportamiento térmico del sistema. Sin embargo, también se observó que la eficiencia del ciclo de carga y descarga no varía proporcionalmente con los cambios en el  $c_p$ , lo que sugiere que otros factores de operación del sistema PBTES tienen un impacto considerable en la eficiencia global.

En conclusión, la escoria de cobre chilena muestra un potencial prometedor como material de almacenamiento térmico debido a sus propiedades termofísicas y su capacidad para operar a altas temperaturas. La caracterización detallada y el análisis probabilístico realizado en este estudio proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en sistemas de almacenamiento térmico de energía solar, marcando los límites de operación en los cuales puede oscilar el desempeño del estanque.

Finalmente, al observar el comportamiento de las curvas de  $c_p$  y su dispersión creciente con la temperatura, es evidente que otros factores, como las propiedades intrínsecas del material y las condiciones experimentales, también juegan un papel crucial en la variabilidad observada. Esta dispersión debe ser considerada al evaluar la confiabilidad y estabilidad del sistema, asegurando que el diseño del PBTES sea robusto frente a las fluctuaciones de  $c_p$  y garantizando un rendimiento óptimo bajo diferentes condiciones operativas.

### Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer el financiamiento de:

- ANID/FONDEF/ID22110200 “RadTES-CS/Radial Packed-Bed Thermal Storage System Using Copper Slag as Storage Medium”.
- Beca de Doctorado Nacional, ANID-BECAS/Doctorado Nacional/21232013.
- Beca de Doctorado Nacional, ANID-BECAS/Doctorado Nacional/21210778.

### Referencias

- [1] M. Romero y J. González-Aguilar, «Solar thermal CSP technology», *WIREs Energy Environ.*, vol. 3, n.º 1, pp. 42-59, ene. 2014, doi: 10.1002/wene.79.
- [2] A. Palacios, C. Barreneche, M. E. Navarro, y Y. Ding, «Thermal energy storage technologies for concentrated solar power – A review from a materials perspective», *Renew. Energy*, vol. 156, pp. 1244-1265, ago. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.127.
- [3] O. Achkari y A. El Fadar, «Latest developments on TES and CSP technologies – Energy and environmental issues, applications and research trends», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 167, p. 114806, feb. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114806.
- [4] I. Sarbu y C. Sebarchievici, «A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage», *Sustainability*, vol. 10, n.º 1, p. 191, ene. 2018, doi: 10.3390/su10010191.
- [5] W.-D. Steinmann, «Thermal energy storage systems for concentrating solar power (CSP) technology», en *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, Elsevier, 2015, pp. 511-531. doi: 10.1533/9781782420965.4.511.
- [6] A. Gil et al., «State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, n.º 1, pp. 31-55, ene. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.035.
- [7] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, y E. K. Stefanakos, «Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39, n.º 4, pp. 285-319, ago. 2013, doi: 10.1016/j.peccs.2013.02.001.
- [8] M. Walczak, F. Pineda, Á. G. Fernández, C. Mata-Torres, y R. A. Escobar, «Materials corrosion for thermal energy storage systems in concentrated solar power plants», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 86, pp. 22-44, abr. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.01.010.
- [9] L. Miró, J. Gasia, y L. F. Cabeza, «Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review», *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 284-301, oct. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.147.
- [10] L. F. Cabeza, I. Martorell, L. Miró, A. I. Fernández, y C. Barreneche, «Introduction to thermal energy storage (TES) systems», en *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, Elsevier, 2015, pp. 1-28. doi: 10.1533/9781782420965.1.
- [11] A. Gil, N. Calvet, I. Ortega, E. Risueño, A. Faik, y J. Rodríguez-Aseguinolaza, «Characterization of a by-product from steel industry applied to thermal energy storage in Concentrated Solar Power».
- [12] D. Brosseau y M. Edgar, «Testing of Thermocline Filler Materials and Molten-Salt Heat Transfer Fluids for Thermal Energy Storage Systems in Parabolic Trough Power Plants», 2004.
- [13] A. Gutierrez et al., «Advances in the valorization of waste and by-product materials as thermal energy storage (TES) materials», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 763-783, jun. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.071.
- [14] Y. Wang, Y. Wang, H. Li, J. Zhou, y K. Cen, «Thermal properties and friction behaviors of slag as energy storage material in concentrate solar power plants», *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 182, pp. 21-29, ago. 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2018.03.020.
- [15] M. Majó et al., «Assessment of Solid Wastes and By-Products as Solid Particle Materials for Concentrated Solar Power Plants», *Sol. RRL*, vol.

- 6, n.º 6, p. 2100884, jun. 2022, doi: 10.1002/solr.202100884.
- [16] I. Calderón-Vásquez, V. Segovia, J. M. Cardemil, y R. Barraza, «Assessing the use of copper slags as thermal energy storage material for packed-bed systems», *Energy*, vol. 227, p. 120370, jul. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120370.
- [17] C. Shi, C. Meyer, y A. Behnood, «Utilization of copper slag in cement and concrete», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, n.º 10, pp. 1115-1120, ago. 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.06.008.
- [18] ASTM International, «ASTM E1269-11, Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry». doi: 10.1520/E1269-11R18.
- [19] B. Jovanović, N. E. Khorasani, T. Thienpont, R. K. Chaudhary, y R. Van Coile, «Probabilistic models for thermal properties of concrete», en *Proceedings of the 11th International Conference on Structures in Fire (SiF2020)*, Online: The University of Queensland, nov. 2020. doi: 10.14264/363ff91.
- [20] Akaike, H., «A New Look At The Statistical Model Identification», *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 19, pp. 716-723, 1974, [En línea]. Disponible en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:411526>
- [21] I. Calderón-Vásquez y J. M. Cardemil, «A comparison of packed-bed flow topologies for high-temperature thermal energy storage under constrained conditions», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 238, p. 121934, feb. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121934.