

## DETERMINACIÓN MACROSCÓPICA DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA DE SALES SÓLIDAS RESIDUALES APLICABLES A ALMACENAMIENTO TÉRMICO

**Pablo Dellicompagni<sup>1</sup>, María del Carmen Rodríguez<sup>2</sup>, Camila Binda<sup>1</sup>, Aien Salvo<sup>2</sup>,  
Juan Francisco Linares<sup>1</sup>, Emanuel Armata<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina. C. P. 4400.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Salta (UNSa) Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina. C. P. 4400.

Tel. Cel. 3856880854. pablodellicompagni@gmail.com

*Recibido 06/08/2025; Aceptado 08/10/2025*

**RESUMEN.-** Este estudio determinó la capacidad calorífica de sales residuales de la producción de carbonato de litio, evaluando su potencial para sistemas de almacenamiento térmico. Durante los ensayos, las fluctuaciones en el caudal de agua requirieron ajustes para mantener temperaturas seguras, observándose ciclos de absorción (almacenamiento) y liberación de calor en las sales, dependiendo de su temperatura respecto al vapor. Estos desequilibrios térmicos permitieron medir las capacidades caloríficas para absorción y liberación de calor: para la muestra M1 fueron 1600 J/kg°C (absorción) y -1404 J/kg°C (liberación), mientras que para M2 fueron 1275 J/kg°C y -1151 J/kg°C, valores superiores a los de sustancias como cloruro de sodio o sílice. Las sales demostraron potencial para almacenamiento térmico en estado sólido, evitando el uso de bombas y reduciendo costos en aplicaciones industriales. Su reutilización también ofrece beneficios ambientales y económicos, al evitar su acumulación en yacimientos e integrarse en modelos de economía circular. Sin embargo, se requiere estudiar otros parámetros, como la conductividad térmica, para optimizar su uso. Su implementación mejoraría la continuidad en el suministro térmico, especialmente en sistemas solares intermitentes, aumentando la cuota renovable en la industria.

**Palabras clave:** sales residuales, almacenamiento térmico, capacidad calorífica, concentración solar, calor industrial.

## MACROSCOPIC DETERMINATION OF THE HEAT CAPACITY OF RESIDUAL SOLID SALTS FOR THERMAL ENERGY STORAGE APPLICATIONS

**ABSTRACT.-** This study determined the heat capacity of residual salts from lithium carbonate production, evaluating their potential for thermal energy storage systems. During experiments, fluctuations in water flow rate required adjustments to maintain safe temperatures, revealing cycles of heat absorption (storage) and release in the salts. These thermal imbalances allowed the measurement of heat capacities in both states: for sample M1, values were 1600 J/kg°C (absorption) and -1404 J/kg°C (release), while for M2, they were 1275 J/kg°C and -1151 J/kg°C, higher than those of substances such as sodium chloride or silica. The salts demonstrated potential for solid-state thermal storage, eliminating the need for pumps and reducing costs in industrial applications. Their reuse also provides environmental and economic benefits by preventing the accumulation of waste in landfills and integrating them into circular economy models. However, further research on other parameters, such as thermal conductivity, is needed to optimise their use. Their implementation would enhance thermal supply continuity, particularly in intermittent solar systems, increasing the renewable share in industrial processes.

**Keywords:** residual salts, thermal storage, heat capacity, solar concentration, industrial heat.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) son

fundamentales para diversificar la matriz energética y reducir emisiones de gases de efecto invernadero, limitando el calentamiento global a 1.5°C (IPCC, 2022). Existen dos formas de TES:



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

almacenamiento de calor sensible (dependiente de la capacidad calorífica) y latente (basado en calor de fusión), cuya elección depende del punto de fusión del material y los requerimientos energéticos del proceso (Cabeza et al., 2015). Las sustancias más comunes para almacenamiento de calor sensible en aplicaciones solares de mediano-gran porte incluyen agua (4.184 J/g°C), aceites sintéticos (1.546–1.966 J/g°C) y sales fundidas como Solar Salt (1.495 J/g°C), Hitec® (1.439 J/g°C) y Hitec XL® (1.272 J/g°C), cuyas propiedades se detallan en la Tabla 1.

El almacenamiento de energía térmica con sales fundidas, como la Solar Salt (60% NaNO<sub>3</sub>, 40% KNO<sub>3</sub>), ha sido ampliamente estudiado por su capacidad calorífica (1.3–1.5 J/g°C) y estabilidad térmica entre 220°C y 565°C (Blindu, 2022). Sin embargo, su implementación requiere tanques diseñados bajo normativas estrictas (ej.: API 650), con espesores de pared ≥8 mm y aislamiento térmico para minimizar pérdidas energéticas (Blindu, 2022).

En la literatura se puede encontrar un gran número de trabajos e investigaciones de las propiedades térmicas de sustancias sólidas aplicadas a TES (Hasnain, 1998; Miró et al., 2013; Tawalbeh et al., 2023) en las que se mencionan las sales, principalmente cloruro de sodio (NaCl) y derivados de la sílice (arena, por ejemplo). Sin embargo, los estudios realizados sobre tales propiedades involucraron muestras pequeñas, ya que se emplearon técnicas como la calorimetría de barrido diferencial (DSC). Adicionalmente, las sales residuales de la industria del litio, compuestas principalmente por sulfatos y carbonatos de Li, Na y K, han demostrado capacidades caloríficas (C<sub>p</sub>) en fase sólida entre 0.767 J/g°C y 3.143 J/g°C, medidas a escala de laboratorio, con estabilidad térmica hasta 300°C (Dellicompagni et al., 2023; 2024b).

Estas propiedades son comparables a las de sales fundidas comerciales, pero su uso como material TES en estado sólido podría eliminar riesgos de corrosión y reducir costos de infraestructura (Blindu, 2022; Dellicompagni et al., 2023).

Este trabajo aborda el estudio experimental de C<sub>p</sub> de las muestras de sales ya ensayadas por Dellicompagni et al. (2023; 2024b), pero con la salvedad de que el tamaño de las muestras es de mayor magnitud, del orden de los 0.5 kg. El ensayo experimental se realiza mediante un calorímetro construido y previamente caracterizado, empleando un concentrador cilindro parabólico (CCP) como fuente de energía térmica (Dellicompagni et al., 2024a). Con respecto al C<sub>p</sub>, los resultados arribados son aplicables a sistemas TES de mayor tamaño, corroborando que no hay prácticamente diferencias entre ensayos de laboratorio (con muestras del orden de los ml) y los aquí realizados. Esta comparativa permite plantear escenarios de almacenamiento térmico a mayores escalas empleando las sales sólidas aquí estudiadas.

## 2. METODOLOGIA

Las actividades realizadas se agrupan en dos subactividades: i) Construcción y caracterización del calorímetro (determinación del C<sub>p</sub> del calorímetro), ii) Ensayos experimentales de las sales contenidas en el calorímetro empleando el CCP como fuente de calor (determinación del C<sub>p</sub> de las sales).

### 2.1 Descripción de las sales/muestras

Se tomaron muestras de sales residuales provenientes del proceso de producción de carbonato de litio. Estas sales se denominan sales

Tabla 1: Principales sustancias empleadas para almacenamiento de calor sensible.

| Sustancia   | Material   | Punto de fusión (°C) | Capacidad Calorífica (J/g°C) | Calor de fusión (J/g)   | Autor                                |
|---|--|----------------------|------------------------------|---|--------------------------------------|
| Agua  | H <sub>2</sub> O   | 0                    | 4.184                        | 333,55  | Liu et al. (2012) Alva et al. (2017) |
| Aceite  | Aceite mineral   |                      | 1966                         |   |                                      |
|   | Therminol VP-1   | 12                   | 1546                         |   |                                      |
| Sales fundidas  | NaNO <sub>3</sub>  | 306                  | 1655                         | 172   |                                      |
|   | KNO <sub>3</sub>   | 335                  | 953                          | 266   |                                      |
|   | LiNO <sub>3</sub>  | 250                  |                              | 370   |                                      |
|   | Sal solar<br>NaNO <sub>3</sub> –KNO <sub>3</sub><br>(60%–40%)                            | 221,04               | 1495                         | -   |                                      |
|   | Hitec®<br>NaNO <sub>3</sub> –KNO <sub>3</sub> –<br>NaNO <sub>2</sub><br>(7%–53%–<br>40%) | 142,24               | 1439                         | -   |                                      |
| Hitec XL®<br>NaNO <sub>3</sub> –KNO <sub>3</sub> –<br>Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub><br>(7%–45%–48%) | 130,61   | 1272                 | -                            | Serrano-López et al. (2013)<br>Fernández et al. (2015)<br>Li et al. (2022)<br>Caraballo et al. (2021) |                                      |

de cosecha y son depositadas a cielo abierto dentro del predio de la empresa litífera. Un completo detalle de las composiciones de las muestras y estudio de estabilidad termoquímica se puede encontrar en Dellicompagni et al. (2024b). De este estudio, se adoptó analizar las muestras M1 y M2 ya que son las que arrojaron mejores resultados, cuyos tamaños fueron de 0.4965 kg y 0.4450 kg, respectivamente, en el presente trabajo.

### 2.2 Descripción del calorímetro.

La Figura 1 muestra un esquema del calorímetro construido y los puntos donde se posicionaron las termocuplas para medición de temperaturas. El calorímetro consta de un recinto tubular de PVC, en el cual se aloja la muestra de sal. Dentro del mismo recinto se incorpora un serpentín de cobre por el cual atraviesa el fluido caloportador (agua caliente/vapor) proveniente del CCP. Este serpentín oficia de intercambiador de calor hacia/desde la muestra de sal. En los extremos del tubo de PVC se colocaron tapas del mismo material para contener la sal. De manera concéntrica se realizó el aislamiento del recinto tubular con espuma

de poliuretano expandido, empleando una envolvente exterior de acero inoxidable de muy bajo espesor. Tanto en la parte superior como en la inferior del calorímetro se colocaron tapas de material aislante, también construidas con poliuretano expandido. La entrada y salida del serpentín de cobre se aislaron con lana de roca, comúnmente conocida como manta cerámica con envolvente de aluminio opaco u oxidado.

### 2.3 Determinación del $C_p$ del calorímetro ( $C_{pc}$ ).

En esta sección se muestra el procedimiento para la determinación del  $C_p$  del calorímetro ( $C_{pc}$ ). La Figura 2 muestra el montaje experimental para la determinación del  $C_{pc}$ . Si bien el intercambio de calor se realiza entre el fluido térmico y la muestra de sal a través de las paredes del serpentín de cobre, la masa del calorímetro y de los sensores de temperatura (estas últimas despreciadas en este análisis) también interactúan con el sistema térmico absorbiendo y liberando calor según cuál sea la situación. Es decir, no todo el calor se transfiere en el circuito serpentín-sal, sino que parte de la energía térmica es absorbida-liberada por el calorímetro.

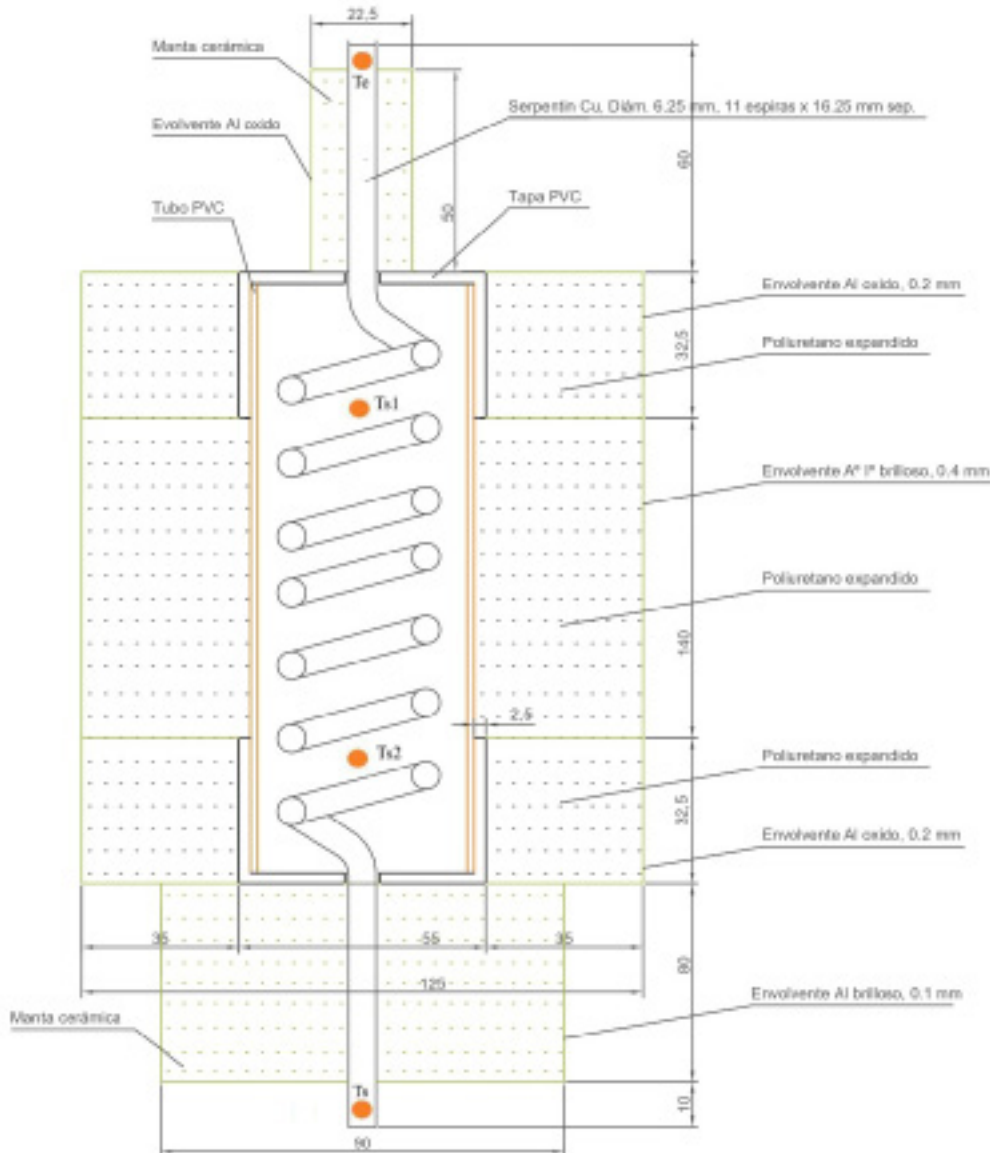


Fig. 1: Esquema del calorímetro empleado para el cálculo de la capacidad calorífica de las sales residuales. Puntos de medición de temperatura:  $T_e$  y  $T_s$ , temperatura del fluido a la entrada y salida del calorímetro, respectivamente;  $T_{s1}$  y  $T_{s2}$ , temperaturas de la sal. Unidades en mm.

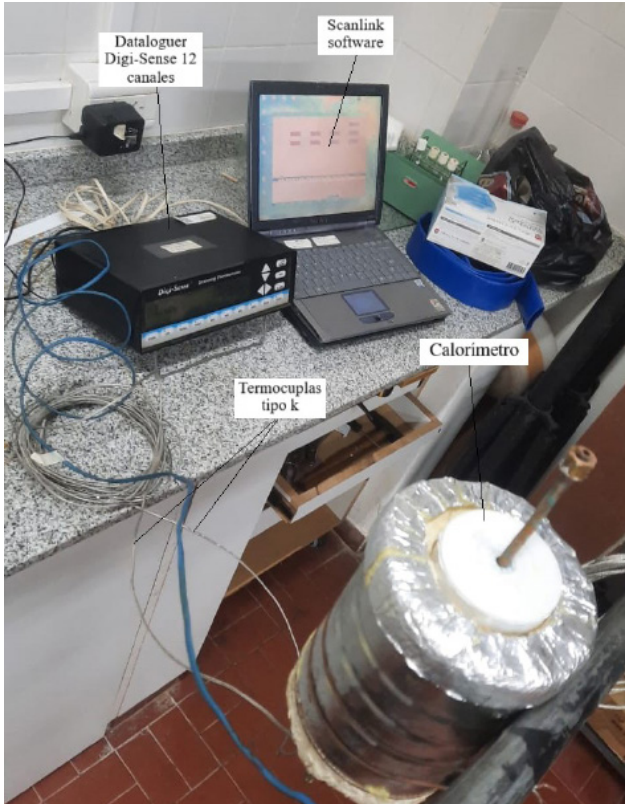


Fig. 2: Montaje experimental para la determinación de la capacidad del calorímetro  $C_{pc}$ .

En primer lugar, se pesó el calorímetro con las termocoplas incorporadas. Se obtuvo una masa  $m_c=0.6304$  kg. El segundo paso fue verter una cantidad  $m_1$  de agua dentro del calorímetro y esperar que su temperatura se estabilice. Esta se denomina temperatura inicial  $T_1$ . Seguidamente, se vertió una cantidad  $m_2$  de agua a una temperatura inicial  $T_2$ . Finalmente se registró la temperatura de estabilización de la mezcla  $T_f$ . En todos los casos  $T_1 < T_2$ . Para la medición de la temperatura de equilibrio  $T_f$  se emplearon las mismas termocoplas demarcadas como  $T_{s1}$  y  $T_{s2}$  en la Figura 1.

Para la determinación del  $C_{pc}$  se emplea la Ec. 1 (Serway y Jewel, 2004; Silvester y Sarges Guerra, sin publicar), la cual plantea el balance energético en los ensayos de calibración.

$$m_2 \cdot C_a \cdot (T_f - T_2) + m_c \cdot C_{pc} \cdot (T_f - T_1) + m_1 \cdot C_a \cdot (T_f - T_1) = 0 \quad (1)$$

Tabla 2: Resultados de la determinación experimental de  $C_{pc}$ .

| Variable          | $m_1$  | $m_2$    | $m_1 < m_2$ | $m_1 > m_2$ | Unidad |
|-------------------|--------|----------|-------------|-------------|--------|
| $m_1$             | 0,2503 |          | 0,2006      | 0,3005      | kg     |
| $T_1$             | 22,4   |          | 24,3        | 23,7        | °C     |
| $m_2$             |        | 0,2516   | 0,3001      | 0,1985      | kg     |
| $T_2$             |        | 74,6     | 79          | 76,2        | °C     |
| $T_f$             |        | 41,7     | 48,7        | 39,25       | °C     |
| $C_{pc}$          |        | 1186±2%* | 1143±1%*    | 1137±1%*    | J/kg°C |
| $C_{pc}$ promedio |        |          |             | 1155±5%**   | J/kg°C |

\*Valor obtenido en base a la propagación de error en Ec. 2.

\*\* Valor obtenido de la propagación del error en el cálculo de  $C_{pc}$  promedio.

Errores absolutos de instrumentación digital:  $\Delta m=0,0001$  kg,  $\Delta T=0,1$  °C.

Luego:

$$C_{pc} = \frac{-m_2 \cdot C_a \cdot (T_f - T_2) - m_1 \cdot C_a \cdot (T_f - T_1)}{m_c \cdot (T_f - T_1)} \quad (2)$$

Donde  $C_a$  es la capacidad calorífica del agua, adoptada en 4186 J/kg°C y  $m_c$  es la masa del calorímetro. Se realizaron tres ensayos en los que  $m_1 \cong m_2$ ,  $m_1 < m_2$  y  $m_1 > m_2$ . La Tabla 2 muestra el resultado de las mediciones y el cálculo del  $C_{pc}$  promedio. Es este valor de  $C_{pc}$  el que ha de considerarse en los balances energéticos en la determinación de la capacidad calorífica de las sales.

#### 2.4 Descripción del CCP empleado como fuente de calor

El CCP empleado se muestra en la Figura 3 acoplado al calorímetro. Se trata de un concentrador solar cilindro parabólico con un área de apertura de 11 m<sup>2</sup> y longitud de absorbedor de 6 m, capaz de generar una potencia térmica de 8 kW para caudal de agua comprendido entre 1 y 1.2 l/minuto, o inferior para generación de menores potencias. La temperatura máxima de vapor alcanzada con el CCP ronda los 120 °C. La superficie reflectora es de aluminio pulido espejo de alta reflectancia y el absorbedor es un caño estructural redondo cubierto con pintura negra mate de alta temperatura, inserto en una cavidad conformada por tubos de vidrio de borosilicato. Una descripción detallada del concentrador y su caracterización experimental puede hallarse en Dellicompagni et al. (2024a).



Fig. 3: Calorímetro acoplado a la salida del CCP.

Si bien se realizan ensayos sobre las magnitudes físicas pertinentes a la determinación de la capacidad calorífica de las sales (variables entradas/salidas del calorímetro), también se realizan mediciones de los parámetros que caracterizan al concentrador (irradiancia directa normal al haz, temperatura exterior del absorbedor y velocidad de viento). No obstante, y a los fines del objetivo de este trabajo, sólo se muestran las mediciones referidas a la temperatura de salida del concentrador y el caudal circulante, además de aquellas variables que entran en juego en el balance energético del calorímetro ( $T_e$ ,  $T_s$ ,  $T_{s1}$  y  $T_{s2}$ ).

### 2.5 Instrumental de medición

La Tabla 3 describe el instrumental empleado en cada uno de los ensayos, como así la incerteza cometida por cada uno de ellos, el adquisidor empleado y el software.

### 2.6 Determinación del CP de las sales ( $C_{ps}$ )

Para cada medición efectuada (frecuencia 1 minuto), se plantea el balance térmico de la Ec. 3 para el caso en que el fluido calorportador entrega calor al conjunto sal y calorímetro. En el caso en que la sal sea quien cede calor al calorímetro y al fluido calorportador, se emplea la Ec. 4. Ambos procesos se identifican como absorción y liberación de calor, respectivamente, desde el punto de vista de la muestra de sal.

$$E_{fluido,i} = E_{sal,i} + E_{calorímetro,i} \quad (3)$$

$$E_{sal,i} = E_{fluido,i} + E_{calorímetro,i} \quad (4)$$

Donde:

$$E_{fluido,i} = m_{v,i} \cdot C_a \cdot (T_{e,i} - T_{s,i}) \cdot \Delta t_i \quad (5)$$

$$E_{calorímetro,i} = m_c \cdot C_{pc} \cdot (T_{c,i+1} - T_{c,i}) \quad (6)$$

Siendo  $m_{v,i}$  el caudal másico de vapor que ingresa y atraviesa al serpentín de cobre,  $C_a$  la capacidad calorífica del agua,  $T_{c,i+1}$  y  $T_{c,i}$  la temperatura del calorímetro en dos mediciones sucesivas. La capacidad calorífica de la sal está dada por la Ec. 7, donde  $m_s$  es la masa de la muestra de sal y  $T_{sal,i+1}$  y  $T_{sal,i}$  la temperatura de la muestra de sal en dos mediciones sucesivas, siendo las mismas el promedio entre  $T_{s1}$  y  $T_{s2}$  en cada una de las mediciones. El valor promedio de  $C_{ps}$  se obtiene con la Ec. 8. Dado que la Ec. 7 presenta restricciones en cuanto a los valores de temperatura que alcanzan las sales paréntesis de apertura mayúscula T subíndice , s a. l, i. más 1 final subíndice si y solo si mayúscula T subíndice , s a. l alcanzan las sales ( $T_{sal,i+1} \leftrightarrow T_{sal,i}$ ), se plantea un filtro

para los valores de  $C_{ps,i}$  tomando como referencia la capacidad calorífica del agua (Peón Peralta, 2007) (Ec. 9).

$$C_{ps,i} = \frac{E_{sal,i}}{m_s \cdot (T_{sal,i+1} - T_{sal,i})} \quad (7)$$

$$C_{ps} = \sum_{i=1}^{i=N} C_{ps,i} \quad (8)$$

$$|C_{ps,i}| < 4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad (9)$$

## 3. RESULTADOS

Se realizaron mediciones repetitivas para cada muestra de sal alojada en el calorímetro. Se trabajó en los días en los que se presentaron condiciones de cielo claro, permitiendo al CCP generar agua caliente y vapor en un amplio espectro de temperaturas. Las Figuras 4 y 5 muestran los perfiles de temperaturas y la distribución (histogramas) de las temperaturas de las sales. Se observa una buena respuesta del calorímetro al minimizar las pérdidas de calor, permitiendo que las sales alcancen temperaturas cercanas a la del vapor de salida del CCP.  $T_e$  y  $T_s$  corresponden a la temperatura del vapor a la entrada y salida del calorímetro, respectivamente. Por otro lado, la curva negra continua es la temperatura promedio de la sal ( $T_{sal\_prom}$ ), determinada en base a  $T_{s1}$  y  $T_{s2}$ , ambas de trazo discontinuo. De la distribución representada por los histogramas, se observa que las sales pueden ser aplicables a TES cuya temperatura de almacenamiento supere los 60 °C, en promedio, y mejor aplicabilidad a partir de los 80 °C. En este sentido, todas las muestras presentaron similares cualidades de almacenamiento.

La capacidad de absorción y liberación de calor se relaciona intrínsecamente con la morfología granular de las muestras. En Dellicompagni et al. (2024b) se revelan diferencias en la estructura a una escala de 5  $\mu\text{m}$  bajo microscopía electrónica, donde los cristales aparecen combinados con estructuras porosas. Se identifican formas cúbicas y prismáticas en las muestras M1 y M2, lo que sugiere una mayor área para el intercambio de calor. En el caso de los ensayos aquí abordados, interesa correlacionar los resultados a nivel macroscópico con los microscópicos, referidos a la capacidad calorífica. La Tabla 4 muestra los resultados de  $C_{ps}$  arribados con la Ec. 9.

Tabla 3: Instrumental de medición empleado en los ensayos.

| Magnitud   | Sensor                       | Error                 | Adquisidor                 | Software                 |
|--|------------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|
| Temperatura (entrada y salida CCP, ambiente, entrada y salida calorímetro, muestra de sal) | Termocupla Fluke - K         | 0,1 °C                | Digi Sense de doce canales | ScanLink 2.0 Cole Parmer |
| Caudal másico (entrada)  | Caudalímetro Arduino YF-S401 | 10 <sup>-3</sup> kg/s | Arduino UNO                | Arduino 1.8.16           |
| Masa (del calorímetro y muestras)  | Balanza Scout Pro SP601      | 10 <sup>-4</sup> kg   | Display                    | -                        |

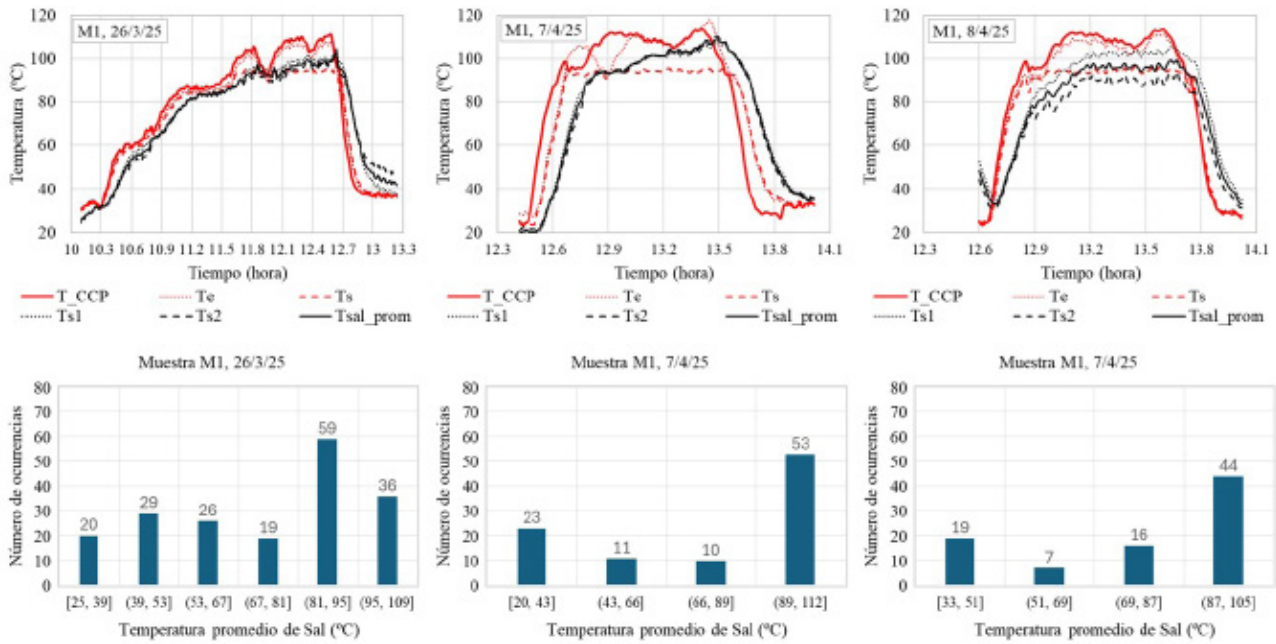


Fig. 4: Perfiles de temperatura para ensayos sobre la muestra M1 e histogramas de temperatura de promedio de la Sal.

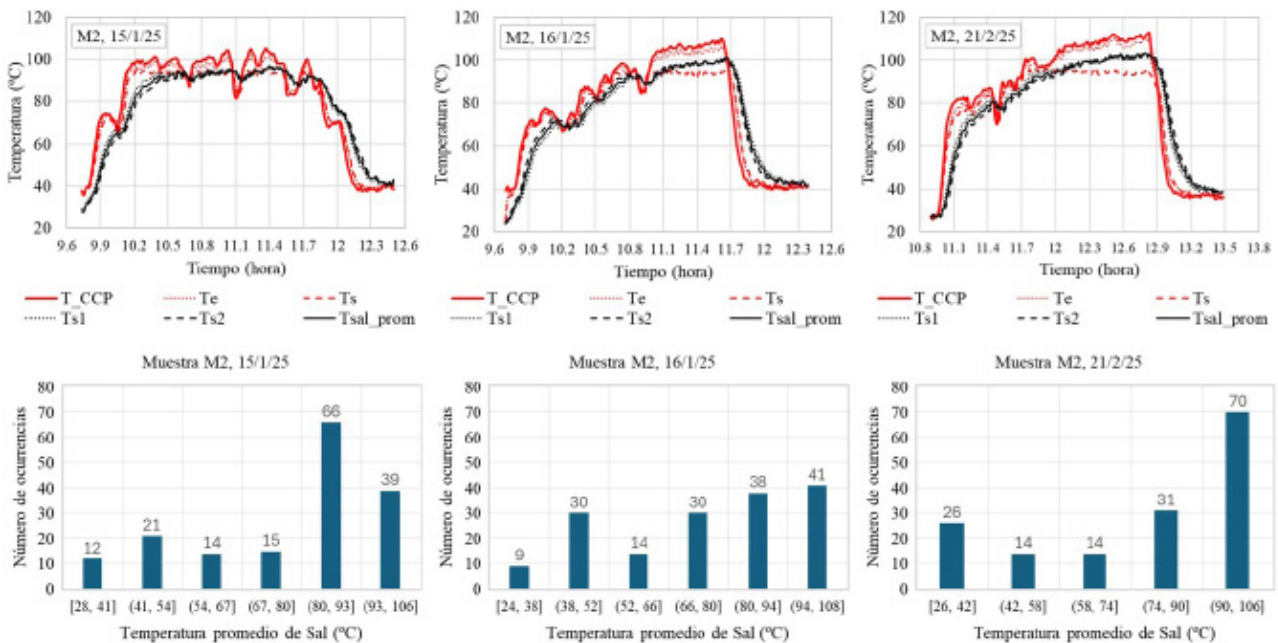


Fig. 5: Perfiles de temperatura para ensayos sobre muestra M2 e histograma de temperatura de promedio de la Sal.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo se centró en la determinación de la capacidad calorífica de sales residuales de los procesos de obtención de carbonato de litio. Para ello fue necesario contar con un calorímetro adaptado a las necesidades de realizar mediciones con muestras de mayor tamaño a las que se acostumbra a emplear en laboratorios, del orden de 0.5 kg. Dicho calorímetro fue construido y caracterizado en vacío, es decir, sin sales, pero con mezclas de agua fría/caliente, para determinar su capacidad calorífica (promedio obtenido  $1155 \pm 5\%$  J/kg°C). Esta caracterización permitió establecer el balance térmico del calorímetro-serpentina-muestra para la determinación de las capacidades caloríficas de las sales. Re-

sultó que, durante los ensayos, la variación del caudal de agua de la red provocó la variación de la temperatura de salida del CCP y la necesidad de regular las válvulas de entrada y salida para operar dentro de rangos de temperaturas que no pusieran en riesgo los equipos. Se presentaron situaciones en las que la temperatura del vapor superó a la temperatura de la sal, produciéndose así la absorción de calor en la muestra (almacenamiento), como así situaciones en las que la temperatura de la sal fue superior a la del vapor, ocasionando la liberación de calor (despacho). La figura 6 muestra el intercambio de energía térmica, expresado por las Ecs. 3 y 4, para la muestra M2. Se observa que para las distintas situaciones de desequilibrio térmico (dadas por la variación del caudal) la muestra de sal está permanentemente absorbiendo y

Tabla 4: Capacidad calorífica de las sales, valores en J/kg°C.

| Muestra M1    |       |       | Promedio | Promedio (50°C - 100°C)*** |
|---------------|-------|-------|----------|----------------------------|
| Absorción     | 1605  | 1532  | 1663     | 1600                       |
| Liberación    | -1401 | -1398 | -1414    | -1404                      |
| e% $C_{ps}^*$ | 5%*   | 4%*   | 4%*      | 13%**                      |
| Muestra M2    |       |       |          |                            |
| Absorción     | 1257  | 1279  | 1290     | 1275                       |
| Liberación    | -1175 | -1139 | -1138    | -1151                      |
| e% $C_{ps}$   | 5%*   | 5%*   | 4%*      | 14%**                      |

\* Error relativo porcentual promedio, en base a la propagación de errores en Ecs. 4-7

\*\* Valor obtenido de la propagación del error en el cálculo de  $C_{ps}$  promedio. Errores absolutos de instrumentación digital:  $\Delta m = 0.001$  kg/s,  $\Delta m = 0.0001$  kg,  $\Delta T = 0.1$  °C,  $\Delta(\Delta t) = 0.01$  s,  $\Delta C_{pc} = 57$  J/kg°C (corresponde al 5% obtenido en Tabla 3).

\*\*\*Capacidades caloríficas promedio extraídas de Dellicompagni et al. (2023).

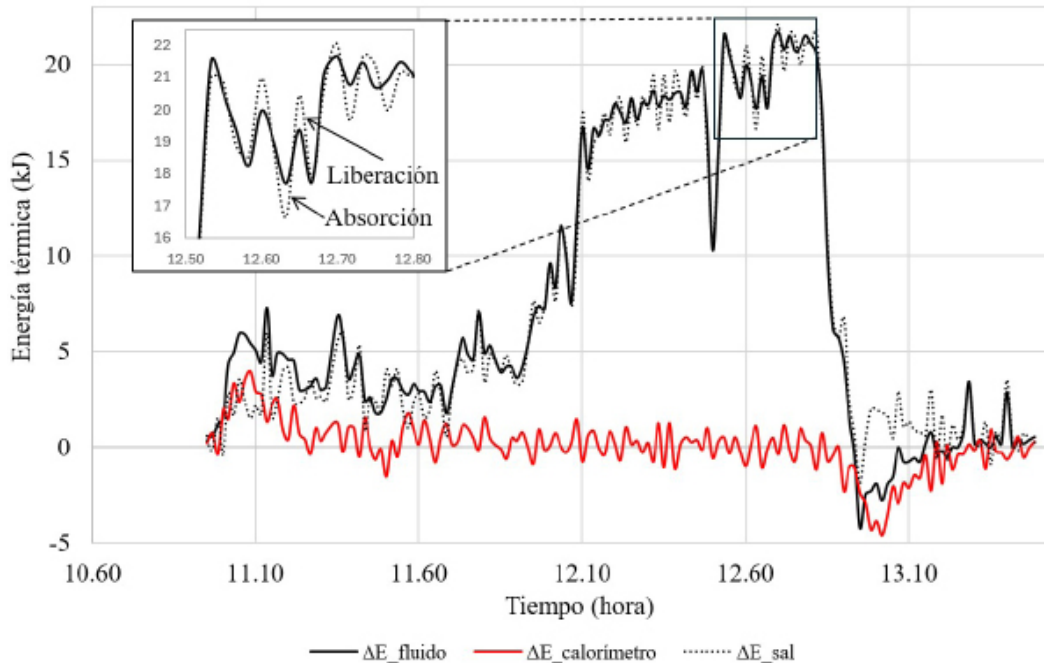


Fig. 6: Perfiles de energía térmica puesta en balance entre la muestra de sal, el fluido caloportador y el calorímetro. Caso de análisis: muestra M2, 21/2/25.

liberando energía, como lo hace también el calorímetro en sí. Resulta que todo el sistema se encuentra en permanente oscilación, lo cual permitió determinar las capacidades caloríficas de la sal tanto en estado de absorción como en el de liberación de calor.

En cuanto a las capacidades caloríficas de las muestras, se determinó para M1 un valor de 1600/-1404 J/kg°C, para absorción y liberación, respectivamente. Para M2, se obtuvieron 1275/-1151 J/kg°C. Estos valores se aproximan a aquellos determinados en la

literatura y su comparación con otras sustancias se puede observar en la Tabla 5. Se observan capacidades caloríficas superiores a las determinadas para sustancias como cloruro de sodio y carbonato de potasio (Miró et al., 2014) así como otras sustancias de mayor abundancia como lo son la arena y la sílice (en forma de sílice industrial) (Alva et al., 2010).

Para sistemas TES, se puede concluir que las sales aquí estudiadas poseen un gran potencial de aplicación en estado sólido si se

Tabla 5: Comparación de capacidades caloríficas.

| Situación  | Presente trabajo |       | Dellicompagni et al. (2023) |      | Miró et. al (2014) |                                | Alva et al. (2017) |        |
|------------|------------------|-------|-----------------------------|------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------|
|            | M1               | M2    | M1                          | M2   | NaCl               | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Arena              | Sílica |
| Absorción  | 1600             | 1275  | 1652                        | 1254 | 850                | 738                            | 830                | 1150   |
| Liberación | -1404            | -1151 | -                           | -    | -                  | -                              | -                  | -      |

consideran sus capacidades caloríficas. No obstante, otros parámetros físico-térmicos deben ser estudiados, como por ejemplo la conductividad térmica. En cuanto a sistemas TES de escalas aplicables a procesos industriales, la utilización de estas sales podría impactar en reducción de costos y complejidad de instalaciones ya que no se requieren bombas y ductos para el desplazamiento, por almacenar/liberar calor de manera estática y sin cambio de fase. Por otro lado, la incorporación de las sales residuales como almacenadoras de calor en los procesos industriales conlleva un beneficio ambiental, ya que se les estará dando valor agregado al ser reutilizadas y removidas del lugar donde son depositadas en yacimiento, evitando así posibles filtraciones al suelo y esparcimiento por viento en las cercanías del lugar. Asimismo, jugarían un rol en la economía circular de las empresas que las producen, ya que presentan un nicho de mercado a través del cual se podrían generar ingresos y beneficios económicos al implementar su comercialización. Desde el punto de vista de los procesos industriales, el empleo de estas sales en almacenamiento de calor extenderá la cuota renovable de las industrias, así como mejoras en la continuidad del abastecimiento térmico de cara a la intermitencia del recurso solar, en el caso de que la fuente de calor sea de base solar renovable.

#### FUENTE DE FINANCIAMIENTO

El presente trabajo se encuentra financiado mediante un proyecto CIUNSA Tipo B, N° 2960, denominado Sistemas de almacenamiento térmico basados en sales residuales de la industria de litio.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al profesor Carlos Martínez, del Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas (UNSA), por su colaboración en los ensayos de caracterización del calorímetro y la puesta a disposición de los laboratorios del Departamento y sus accesorios.

#### REFERENCIAS

- Alva G., Liu L., Huang X., Fang G. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (2017) 693–706. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>.
- Blindu, A. (2022). Diseño y modelado de tanques de almacenamiento térmico con sales fundidas [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. BibLIUS. <https://biblus.us.es/bibbing/proyectos/abreproy/72384/fichero/TFM-2384+Blindu.pdf>
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2015). Materials for thermal energy storage: Classification and selection. *Applied Energy*, 137, 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.066>
- Caraballo A., Galán-Casado S., Caballero A., Serena S. Molten salts for sensible thermal energy storage: a review and an energy performance analysis. *Energies* 2021, 14, 1197. <https://doi.org/10.3390/en14041197>.
- Dellicompagni P., Franco J., Aparicio H., Linares J. F. (2024a). Concentrador solar cilindro parabólico de mediana entalpía: ensayos de operación y caracterización. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 53, pp. 11-17. ISSN en línea 2684-0073. <https://portaldervistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/4751>.
- Dellicompagni P., Franco J., Santapaola J., Flexer V., Flores Larsen S. (2024b). Analysis and characterization of residual salts from lithium carbonate industry: Their potential uses for thermal storage systems. *Next Energy*. 5. 100160. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100160>.
- Dellicompagni, P. R., Franco, J., Santapaola, J., & Flexer, V. (2023). Estudio experimental de propiedades térmicas de sales sólidas residuales de la industria de carbonato de litio. *Revista ERMA*, 15(2), 45-60. <https://portaldervistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/4362>
- Fernández A. G., Galleguillos H., Fuentealba E., Pérez F. J. Thermal characterization of HITEC molten salt for energy storage in solar linear concentrated technology. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. 122(1), 3–9. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4715-9>.
- Han, X., Wang, Y., & Xu, C. (2022). Experimental study on thermal performance of eutectic nitrate salts in TES systems. *Energy Conversion and Management*, 267, 115945. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115945>
- Hasnain S. M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management* Vol. 39, No. 11, pp. 1127-1138. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9).
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- Li N., Wang Y., Liu Q., Peng H. Evaluation of thermal-physical properties of novel multicomponent molten nitrate salts for heat transfer and storage. *Energies* 2022, 15, 6591. <https://doi.org/10.3390/en15186591>.
- Li, X., Ding, J., & Wang, Z. (2022). Temperature-dependent heat capacity of molten salts for TES. *Energy*, 254, 124345. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124345>
- Liu M., Saman W., Bruno F. Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 2118–2132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.020>.
- Miró L., Navaro M. E., Suresh P., Gil A., Fernández A. I., Cabeza L. F. (2014). Experimental characterization of a solid industrial by-product as material for high temperature sensible thermal energy storage (TES). *Applied Energy* 113. pp. 1261–1268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.082>.
- Peón Peralta J. (2007). El agua, una sustancia tan común como sorprendente. *Ciencia*. Volumen. 58, Número 3. pp. 17 - 25. ISSN 2954-5285. Disponible en <https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/index.php/ediciones-antiores>.
- Saravia L., Alía de Saravia D., Echazú R., Alcorta G. (2007). La simulación de sistemas termomecánicos solares con el programa Simusol. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Volumen 11. 03.01-3.08. ISSN 0329-5184. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/92501>.
- Serrano-López R., Fradera J., Cuesta-López S. Molten salts database for energy applications. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2013. 73. 87-102. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2013.07.008>.

- Serway R. A., Jewett J. W. (2004). *Physics for Scientists and Engineers* (6th edition). Thomson Brooks/Cole.
- Silvester S., Sarges Guerra R. Determinación del equivalente en agua de un calorímetro. Trabajo Práctico de la cátedra de Física II. Departamento de Materias Básicas. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario. Disponible en [https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/EQUIVALENTE\\_EN\\_AGUA\\_CALORIMETRO.pdf](https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/EQUIVALENTE_EN_AGUA_CALORIMETRO.pdf). (Último acceso 10 de Enero, 2025).
- Tawalbeh M., Khan H. A., Al-Othman A., Almomani F. (2023). A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids*. 18. 100326. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100326>.