Apuntes

Energy Storage

Tema 2: Almacenamiento térmico

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Versión v1.0

Índice general

1 Clasificación **2**

2 Calor sensible **2**
2.1 Dos tanques isotermos 2
2.2 Tanque termoclino 2

3 Calor latente **3**

4 Aplicación: centrales CSP **3**

5 Pérdidas térmicas y rendimiento del almacenamiento **4**

6 Estratificación y termoclino **4**

7 Materiales de cambio de fase (PCM) **4**

8 Comparación de opciones **5**

1 Clasificación

Todos los métodos se basan en la variación de entalpía del medio.

- **Calor sensible:** cambio de temperatura de un sólido o líquido.
- **Calor latente:** cambio de fase (normalmente sólido-líquido).
- **Termoquímico:** calor de reacción reversible (tema 6).

Un sistema es **simple** si el fluido almacena y transporta la energía, y **dual** si almacena un medio (p. ej. roca) y otro fluido transporta el calor. El agua es el medio de referencia entre 0 y 100 °C. Fuera de ese rango se usan sólidos o líquidos (aceites, sales) según corrosión, erosión, coste y nivel térmico.

2 Calor sensible

Fórmulas clave

$$E = m\,c_p\,(T_c - T_f) \qquad V = \frac{E}{\rho\,c_p\,(T_c - T_f)}$$

Con ρ a la temperatura media o fría. En dos tanques isotermos cada tanque debe poder albergar todo el volumen de fluido.

Medio	T_f (°C)	T_c (°C)	ρ (kg/m^3)	kWh/m^3	€/kWh$_t$
Hormigón armado	200	400	2200	100	1,0
Aceite mineral	200	300	770	55	4,2
Sales de nitritos	250	450	1825	152	12,0
Sales de nitratos	265	565	1870	250	5,2
Sales de carbonatos	450	850	2100	430	11,0
Sodio líquido	270	530	850	80	21,0

2.1 Dos tanques isotermos

Un tanque a T_c y otro a T_f. Es el esquema típico de una central termosolar de torre. Evita la estratificación, pero duplica el volumen de contención.

2.2 Tanque termoclino

Una sola vasija con fluido estratificado: el caliente arriba y el frío abajo, por la menor densidad al aumentar T. La zona de transición es el volumen efectivo de almacenamiento.

Fórmulas clave

$$E_{eff} = (\rho c_p)_{eff}\,V_{eff}\,(T_c - T_f) \qquad (\rho c_p)_{eff} = \epsilon\,(\rho c_p)_{fl} + (1-\epsilon)\,(\rho c_p)_{sol}$$

$$V_t = V_{eff} + V_{df} + V_{dc} = \frac{\pi D_t^2}{4} H_t \qquad V_{sol} = (1-\epsilon)(V_{eff} + V_{df})$$

- ϵ es la porosidad (fracción de huecos). Sin relleno $\epsilon = 1$.
- Relación de aspecto habitual $H_t/D_t = 1{,}6$–$2{,}5$ (valor típico 1,8).
- El relleno estabiliza la termoclina y abarata (menos fluido caro), pero introduce pérdida de carga y tensiones por dilatación térmica.

3 Calor latente

Fórmulas clave

$$E = m\,[c_{p,s}(T_m - T_f) + L + c_{p,l}(T_c - T_m)]$$

La energía se acumula casi a temperatura constante T_m, con mayor densidad energética en un rango estrecho de temperatura. Limitaciones: baja conductividad de los PCM, que exige encapsulado o superficies ampliadas, y subenfriamiento/segregación.

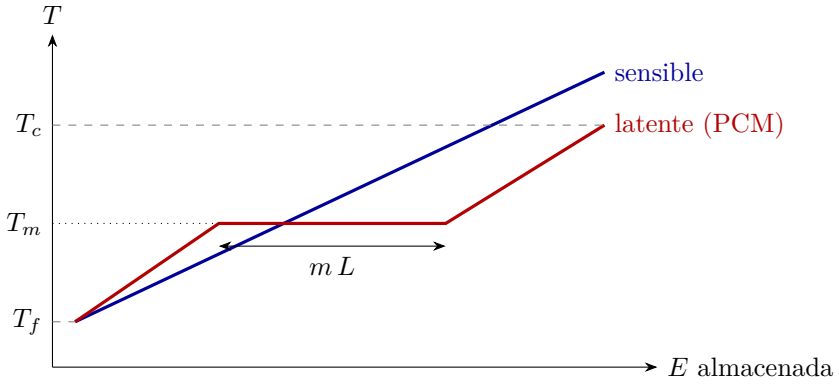


Figura 1. Para el mismo salto de temperatura $T_f \to T_c$, un material de cambio de fase almacena además el calor latente $m\,L$ a temperatura casi constante T_m y, por tanto, necesita menos masa y volumen.

4 Aplicación: centrales CSP

- El almacenamiento (típicamente sales) desacopla captación y generación y da gestionabilidad.
- **Múltiplo solar** $SM = P_{th,campo}/P_{th,bloque}$. Con almacenamiento $SM > 1$ para cargar mientras se genera.
- $E_{TES} = \dfrac{P_e}{\eta}\, t_{alm}$ con t_{alm} horas de almacenamiento a plena carga.

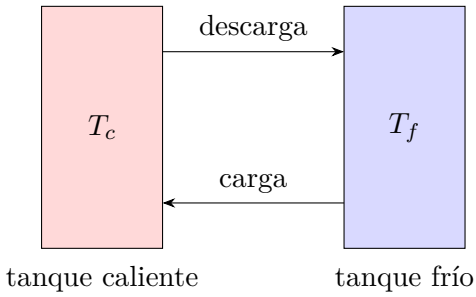


Figura 1. Esquema de dos tanques isotermos.

Idea clave

Mayor ΔT y mayor ρc_p implican menor volumen. En termoclino el volumen total es V_{eff} más las zonas de distribución, mientras que en dos tanques son 2 vasijas del volumen de fluido.

5 Pérdidas térmicas y rendimiento del almacenamiento

Fórmulas clave

$$\dot{Q}_p = U\,A\,(T - T_{amb}) \qquad \Delta T_{dia} = \frac{\dot{Q}_p\,\Delta t}{m\,c_p} \qquad \eta_{TES} = \frac{E_{descarga}}{E_{carga}}$$

Las pérdidas dependen del área exterior, el aislamiento ($U = k_{aisl}/e$ más resistencias de convección) y el tiempo de almacenamiento. Como $A/V \propto 1/D$, los tanques grandes pierden proporcionalmente menos: en almacenamiento estacional importa más el volumen que en el diario. El rendimiento energético de los TES de sales es muy alto (típicamente por encima del 95 %), pero el exergético es menor porque cada transferencia de calor degrada la temperatura.

6 Estratificación y termoclino

- La estabilidad se debe a que ρ decrece con T: el fluido caliente se mantiene arriba mientras no haya mezcla por entrada de caudal.
- El espesor de la termoclina crece por conducción y por dispersión. Se reduce con difusores de entrada de baja velocidad, caudales moderados y relleno.
- El volumen *no utilizable* de la zona de transición (hasta que la temperatura de salida cae por debajo de la de consigna) es la principal pérdida de capacidad. Por eso se define V_{eff} y se añaden V_{df}, V_{dc}.
- Con relleno hay que cuidar la **pérdida de carga** (ecuación de Ergun), el *ratcheting* térmico de la pared (el relleno se compacta con los ciclos y carga la pared del tanque) y la compatibilidad química sal/roca.

7 Materiales de cambio de fase (PCM)

Familia (ejemplo)	T_m (°C)	L (kJ/kg)	k (W/m K)	Observaciones
Hielo / agua	0	334	2,2	Frío industrial
Parafinas	20 – 70	150 – 250	$\approx$ 0,2	Edificación, bajo k
Hidratos de sal	30 – 120	150 – 280	0,5 – 1	Subenfriamiento, corrosión
$NaNO_3$	306	$\approx$ 175	$\approx$ 0,5	CSP, bajo coste
KNO_3	334	$\approx$ 100	$\approx$ 0,5	CSP
Sales eutécticas, carbonatos	400 – 700	200 – 500	1 – 3	Alta temperatura

Valores orientativos de literatura. [REVISAR] antes de usarlos en diseño.

Frente de solidificación (Stefan cuasi-estacionario)

$$s(t) = \sqrt{\frac{2\,k\,\Delta T\,t}{\rho\,L}} \qquad \dot{q} = \frac{k\,\Delta T}{s}$$

El espesor de sólido crece como $\sqrt{t}$ y la potencia de descarga decae al aumentar s (la capa sólida aísla). Con k bajo, la potencia queda limitada por la transferencia de calor, no por la capacidad: de ahí el uso de aletas, matrices de grafito o microencapsulado. Criterios de selección: T_m adecuada al proceso, L alto, conductividad alta, cambio de volumen pequeño, ciclabilidad sin segregación y bajo coste.

8 Comparación de opciones

	Sensible	Latente	Termoquímico
Densidad energética	baja – media	media	alta
Temperatura de operación	variable	casi constante	según reacción
Pérdidas en almacenamiento	sí (aislamiento)	sí (aislamiento)	prácticamente nulas
Madurez	comercial (CSP)	demostración	laboratorio – piloto
Complejidad	baja	media	alta

Idea clave

Para un mismo salto de temperatura, el calor latente suma L a $c_p \Delta T$. Su ventaja real aparece cuando el proceso opera en un intervalo estrecho en torno a T_m y cuando la transferencia de calor no limita la potencia.