

Situación y futuro de los PCM (*Phase Change Materials*)

Ángel Del Pozo Pérez

*Investigador Química, Medio Ambiente y Energía
Fundación LEIA C.D.T.*

Parque Tecnológico Álava, 16 de Marzo de 2010



Introducción. Conceptos generales

EL PROBLEMA:

Es necesario un cambio de paradigma en el modelo energético de las sociedades del siglo XXI (dependencia energética, agotamiento y encarecimiento de combustibles fósiles, cambio climático...)

LAS SOLUCIONES:

Las soluciones pasan por un “mix” de iniciativas de gran calado científico-tecnológico:

- Biocombustibles
- Mayor eficiencia energética de los procesos
- Reducción de emisiones de CO₂
- Energías renovables

Necesidad de desarrollo tecnológico

Competitividad económica

Variabilidad en el suministro

Almacenamiento



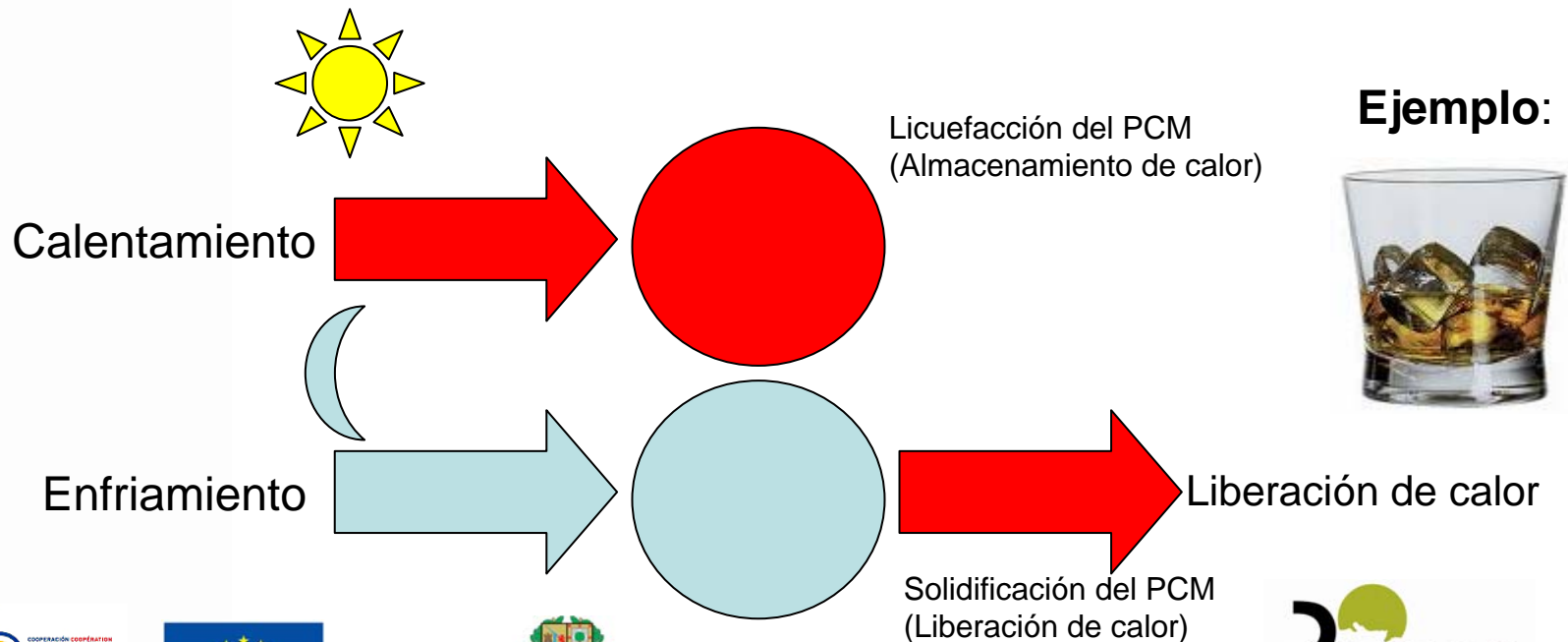
Aplicación de PCM en almacenamiento de energía

EL CONCEPTO:

“Phase Change Materials” (Materiales de cambio de fase)

Son aquellos materiales con un alto calor de fusión, y cuyo punto de transición de fase se encuentra en el entorno de la temperatura de operación, capaces de almacenar y liberar cantidades sustanciales de energía.

Los PCM actúan como “unidades de almacenamiento de calor latente”



Aplicación de PCM en almacenamiento de energía

LAS APLICACIONES

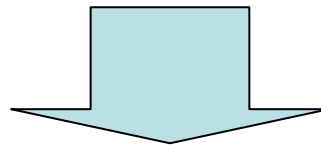
Diversas aplicaciones (desde los años 50 con un impulso a partir de finales de los 70):

- Interruptores electrónicos (primera aplicación)
- Envases “inteligentes” capaces de regular la temperatura de los alimentos (frío/calor)
- Incorporación a elementos constructivos para facilitar y abaratar el confort térmico en edificaciones
- Aditivo en cementos y hormigones para mejorar el fraguado y las propiedades de grandes construcciones (puentes, etc)
- Incorporación en textiles como elemento de confort térmico
- **Almacenamiento de energía térmica en energía solar de aplicación doméstica**
- **Almacenamiento de energía térmica en plantas termosolares**
- **Desarrollo de baterías avanzadas**

LEIA y la investigación en PCM

PROYECTOS MÁS RELEVANTES

- Obtención de un mortero de revoco con propiedades de ahorro energético, mediante la utilización de micropartículas con propiedades de acumulación de calor.
- Integración de biomateriales y/o materiales reciclados como PCM
- Aplicación de PCM en el desarrollo de ropa de trabajo para personal que actúa en situaciones de emergencia (Proyecto Europeo)
- Aplicar los PCM en textiles a situaciones extremas, más allá del uso “clásico” como elemento de confort



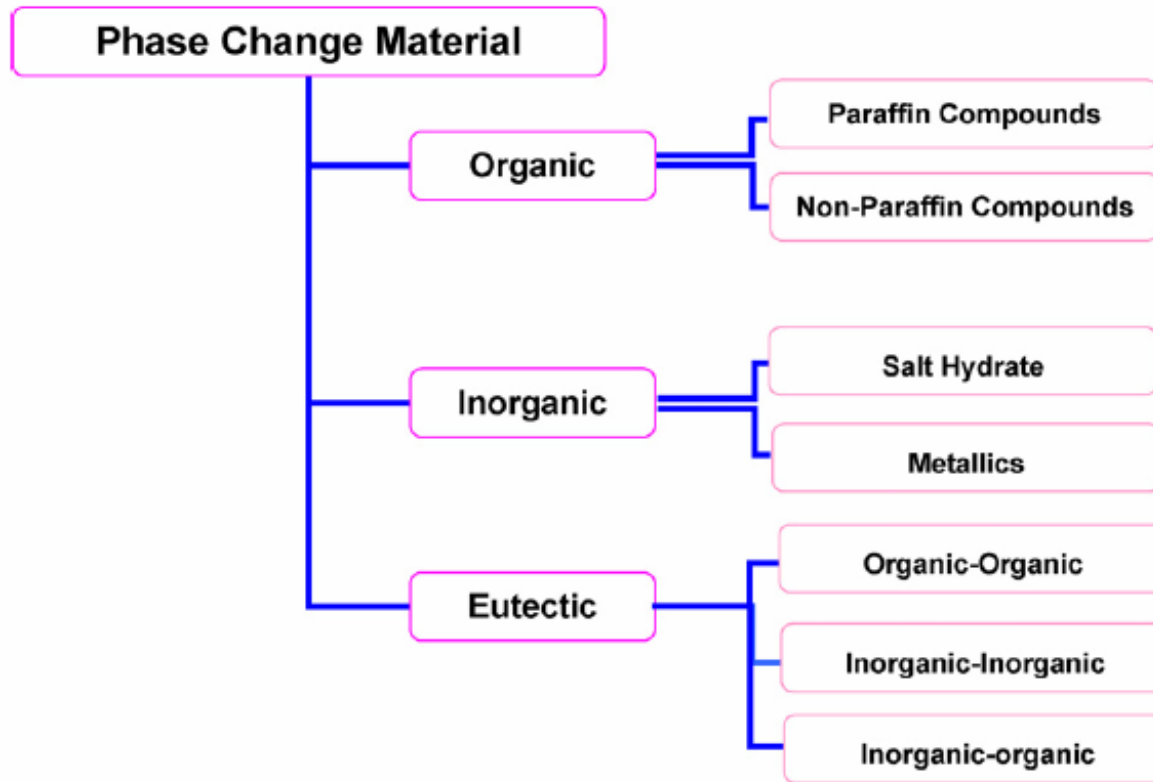
APLICACIONES EN ALTA ENERGÍA Y RENOVABLES

Principales características de los PCM

Características (deseables) de los PCM

- Temperatura de cambio de fase en el entorno de la temperatura de operación requerida
 - Punto de fusión $<15^{\circ}\text{C}$: Aplicaciones de frío
 - Punto de fusión 20°C - 30°C : Aplicaciones en confort térmico
 - Puntos de fusión superiores: Almacenamiento de energía
- Alto calor latente de fusión/solidificación
- Alta conductividad térmica
- Resistencia a las condiciones de operación
- Baja corrosividad
- Alta densidad
- Pequeño cambio de volumen en la transición de fase
- Medioambientalmente sostenible
- Viable desde el punto de vista económico

Clasificación de los PCM



Fuente: Sharma et al.

Propiedades térmicas de potenciales PCM

Aplicaciones de baja/media temperatura:

Parafinas

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28.0	244
19	32.0	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44.0	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68.0	242
32	69.5	170
33	73.9	268
34	75.9	269

Ácidos Grasos

Material	Formula	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Acetic acid	CH ₃ COOH	16.7	184
Polyethylene glycol 600	H(OC ₂ H ₄) _n -OH	20-25	146
Capric acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ -COOH	36	152
Eladic acid	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ -COOH	47	218
Lauric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ -COOH	49	178
Pentadecanoic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ -COOH	52.5	178
Tristearin	(C ₁₇ H ₃₅ COO) ₃ C ₃ H ₅	56	191
Myristic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ -COOH	58	199
Palmatic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ -COOH	55	163
Stearic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ -COOH	69.4	199
Acetamide	CH ₃ CONH ₂	81	241
Methyl fumarate	(CHCO ₂ NH ₃) ₂	102	242

Melting point and latent heat of fusion: salt hydrates

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O	14.0	109
FeBr ₃ ·6H ₂ O	21.0	105
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.5	148
FeBr ₃ ·6H ₂ O	27.0	105
LiCH ₃ COO·2H ₂ O	70	150
Al(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O	72	155
Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	78	265
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	89.9	167
KAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	91	184
MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	167

Sales hidratadas

Propiedades térmicas de potenciales PCM

Aplicaciones de media/alta temperatura:

Inorgánicos

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
LiNO ₃ -NaNO ₃	195 [36]	252 [36]
40%KNO ₃ -60%NaNO ₃	220 [7]	n.a.
54% KNO ₃ -46%NaNO ₃	220 [37]	n.a.
NaNO ₃	307 [35] 308 [4,38]	172 [35] 174 [38] 199 [4]
KNO ₃ /KCl	320 [39]	74 [39]
KNO ₃	333 [4] 336 [38]	266 [3] 116 [38]
KOH	380 [4]	149.7 [4]
MgCl ₂ /KCl/NaCl	380 [39]	400 [39]
AlSi ₁₂	576 [40]	560 [40]
AlSi ₂₀	585 [40]	460 [40]
MgCl ₂	714 [35]	452 [35]
80.5% LiF-19.5% CaF ₂ eutetic	767 [41]	790 [41]
NaCl	800 [35] 802 [4]	492 [35] 466.7 [4]
NaCO ₃ -BaCO ₃ /MgO	500-850 [10]	n.a.
LiF	850 [42]	1800 MJ/m ³ [42]
Na ₂ CO ₃	854 [4,10]	275.7 [4]
KF	857 [35]	452 [35]
K ₂ CO ₃	897 [4,10]	235.8 [4]

Orgánicos

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
Isomalt ((C ₁₂ H ₂₄ O ₁₁ ·2H ₂ O) + (C ₁₂ H ₂₄ O ₁₁))	147 [36]	275 [36]
Adipic acid	152 [36]	247 [36]
Dimethylol propionic acid	153 [36]	275 [36]
Pentaerythritol	187 [36]	255 [36]
AMPL ((NH ₂)(CH ₂)C(CH ₂ OH) ₂)	112 [44]	28.5 [44]
TRIS ((NH ₂)C(CH ₂ OH) ₃)	172 [44]	27.6 [44]
NPG ((CH ₃) ₂ C(CH ₂ OH) ₂)	126 [44]	44.3 [44]
PE (C(CH ₂ OH) ₄)	260 [44]	36.9 [44]

APLICACIONES EN ENERGÍAS RENOVABLES

Aplicaciones en energía solar (baja temperatura)

Calentadores de agua solares

- Relativamente económicos
 - Facilidad de fabricación y mantenimiento
- } Mejora de rendimiento mediante almacenamiento con PCM

Materiales empleados:

- Parafinas (Temperatura de operación: 60° C)
- Cloruro cálcico hexahidratado (30-60° C)
- Cloruro cálcico tetrahidratado (20-30° C)
- Ácido esteárico
- Acetato sódico trihidratado

Ventajas:

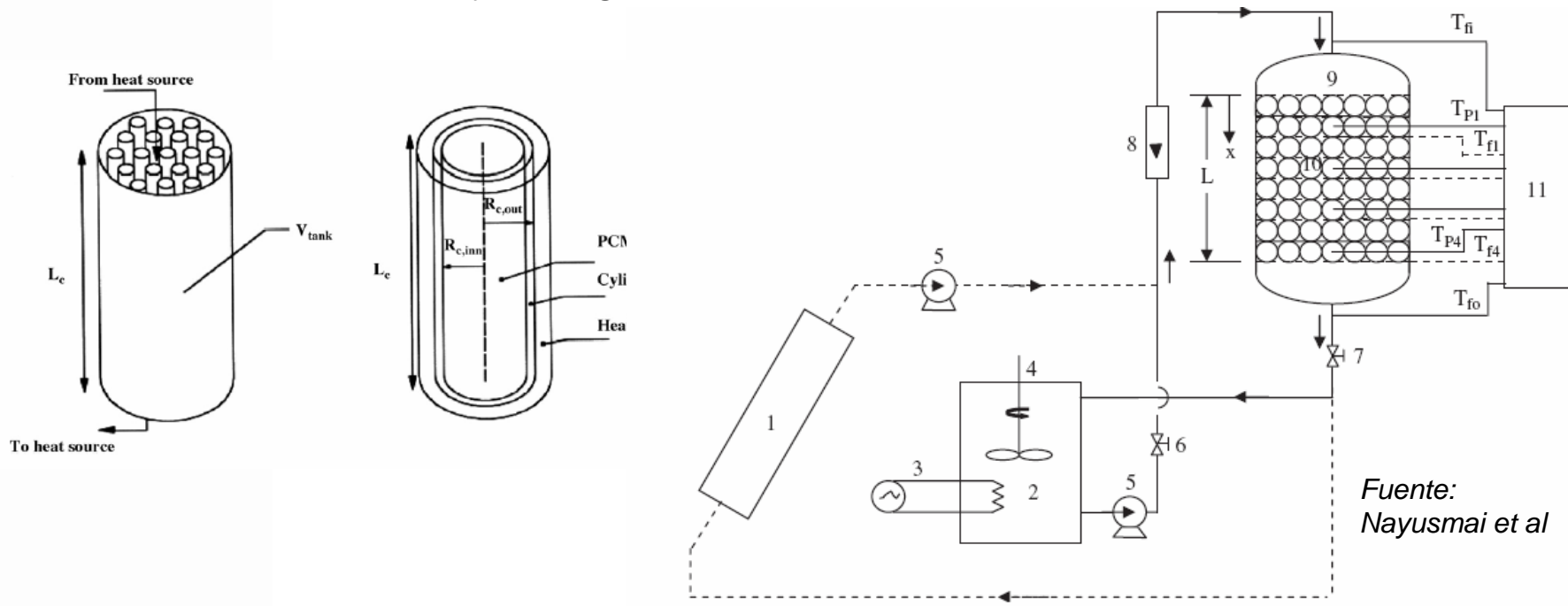
- Menor volumen requerido para el almacenamiento (unidades más pequeñas)
- Mayor efectividad en los ciclos día-noche
- Mayor capacidad de almacenamiento de calor
- Comportamiento isotérmico durante la carga y descarga

Aplicaciones en energía solar (baja temperatura)

Aplicación práctica

El empleo de PCM como único elemento de almacenamiento parece no ser efectivo en costes y rendimiento

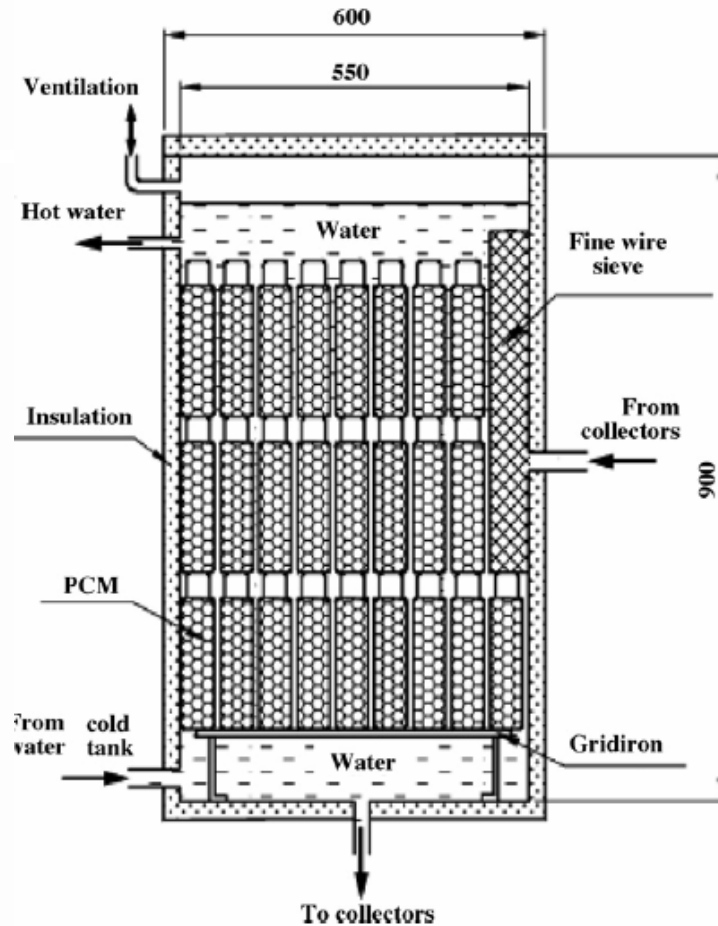
Se están estudiando diversas alternativas de materiales (mejora de conductividad térmica) y configuración



Fuente:
Nayusmai et al

Aplicaciones en energía solar (baja temperatura)

Aplicación práctica



Material: Tiosulfato sódico pentahidratado

Evaluación teórica de otros materiales mediante modelos matemáticos

Tiempo de almacenamiento de agua caliente, cantidad de agua producida y calor total acumulado: 2.59-3.45 veces superior a los sistemas convencionales

Fuente: Suat et al

Aplicaciones en energía solar (baja temperatura)

Otras aplicaciones en este ámbito

Sistemas de calentamiento de aire solares

Sistemas que permiten el acondicionamiento de aire mediante calentamiento por convección, siendo la fuente de calor la energía solar.

- PCM dispuestos en material poroso en el ducto que conduce el aire al interior del edificio
- Calentadores de aire solares por convección natural
- Volúmenes de almacenamiento: Un cuarto del requerido para lechos de guijarro, mitad del requerido empleando agua
- Ahorro potencial de un 12% de la energía requerida en invierno

Cocinas solares

De especial interés para países en vías de desarrollo. Almacenamiento necesario para posibilitar el uso durante la tarde-noche. Se requieren temperaturas en torno a los 100° C



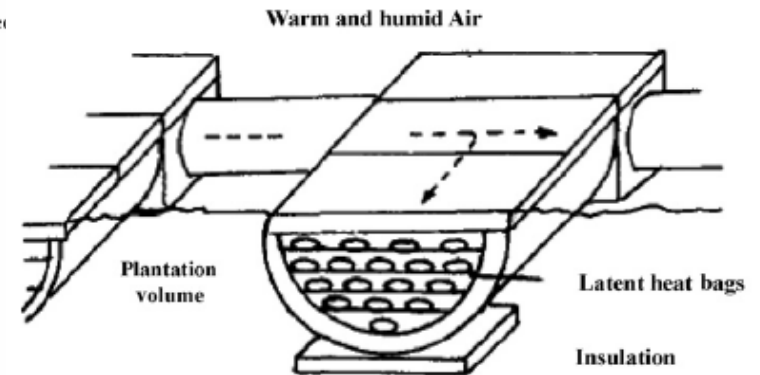
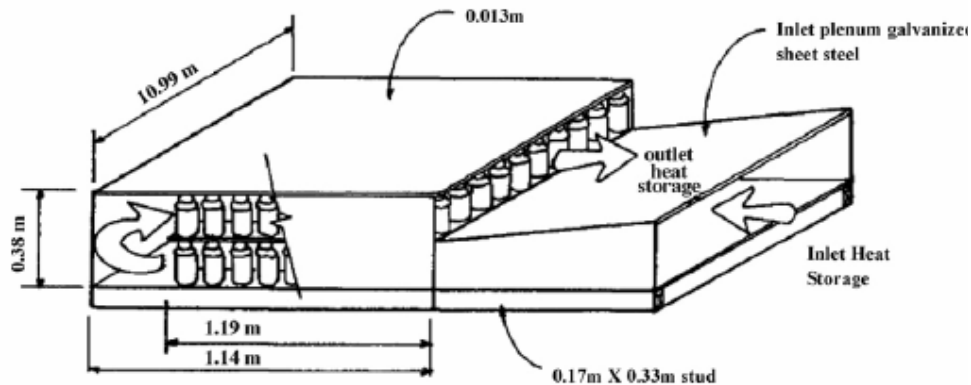
Aplicaciones en energía solar (baja temperatura)

Otras aplicaciones en este ámbito

Invernaderos solares

Almacenamiento de energía solar para el secado, curado y la producción de vegetales.

- Mayor capacidad de almacenamiento que lechos de roca o elementos basados en agua
- Ahorros en propano para calentamiento de hasta el 80% frente a sistemas sin almacenamiento de calor



Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

Plantas termosolares de producción de energía eléctrica

- Energía renovable con gran potencial de desarrollo, estratégica en el caso español
- Interés en el almacenamiento para cubrir picos de demanda y por la propia variabilidad de la fuente de energía
- Diversas alternativas de almacenamiento (sales fundidas, thermocline, cemento, **PCM**)

Materiales empleados (PCM):

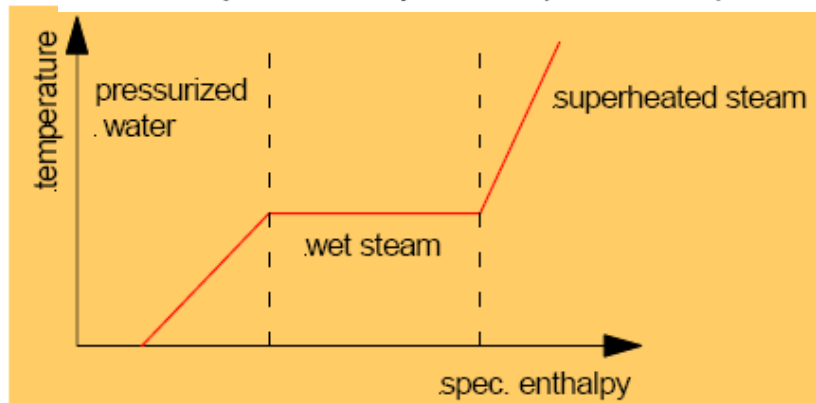
Storage Medium	Temperature		Average density (kg/m ³)	Average heat conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kgK)	Volume specific heat capacity (kWh _t /m ³)	Media costs per kg (US\$/kg)	Media costs per kWh _t (US\$/kWh _t)
	Cold (°C)	Hot (°C)						
Phase change media								
NaNO ₃	308		2,257	0.5	200	125	0.20	3.6
KNO ₃	333		2,110	0.5	267	156	0.30	4.1
KOH	380		2,044	0.5	150	85	1.00	24.0
Salt-ceramics (NaCO ₃ -BaCO ₃ /MgO)	500-850		2,600	5.0	420	300	2.00	17.0
NaCl	802		2,160	5.0	520	280	0.15	1.2
Na ₂ CO ₃	854		2,533	2.0	276	194	0.20	2.6

Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

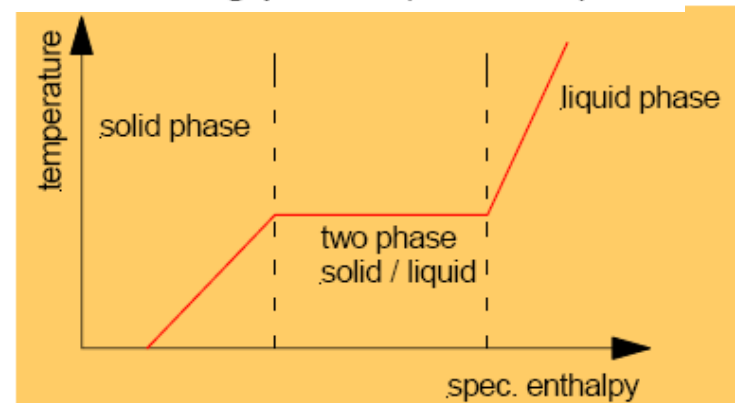
Ventajas

- Alta capacidad de almacenamiento
- Volúmenes de almacenamiento menores comparados con otras tecnologías
- Liberación de calor latente, sin cambio de temperatura ni presión durante la transición de fase
- Especialmente interesantes para plantas de generación directa de vapor (DSG)

Working fluid water/steam:
 => Evaporation phase ($T=\text{const}$)

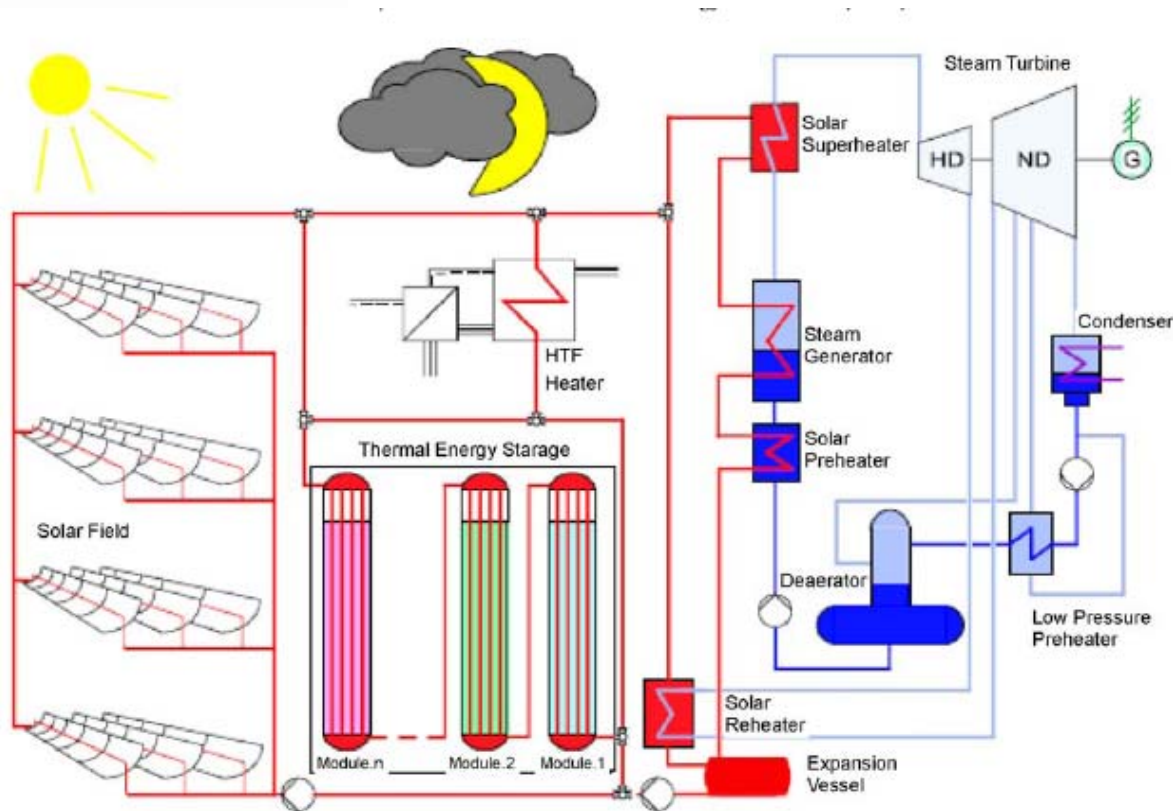


Phase change storage medium
 => Melting phase ($T=\text{const}$)



Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

Almacenamiento de calor latente en cascada



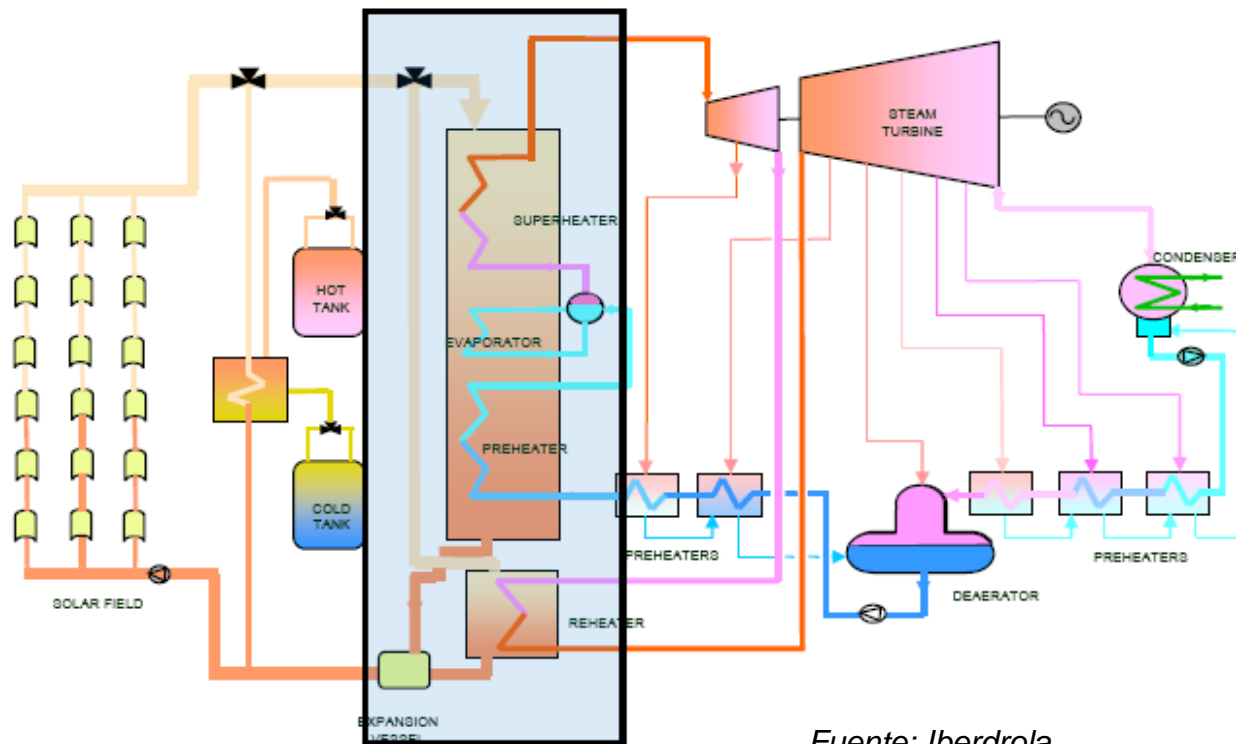
- Mejor eficiencia que el almacenamiento mediante un solo paso
- Mayor uniformidad de T^a en el tiempo
- Apta para colectores cilindro-parabólicos y adaptable a plantas de receptor central
- 92% de fusión del PCM-67% de solidificación
- Necesario esfuerzo de I+D para identificar mejores PCM y mejorar sus características

Fuente: Medrano et al.

Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

Plantas de generación directa de vapor

Planta termosolar basada en aceite



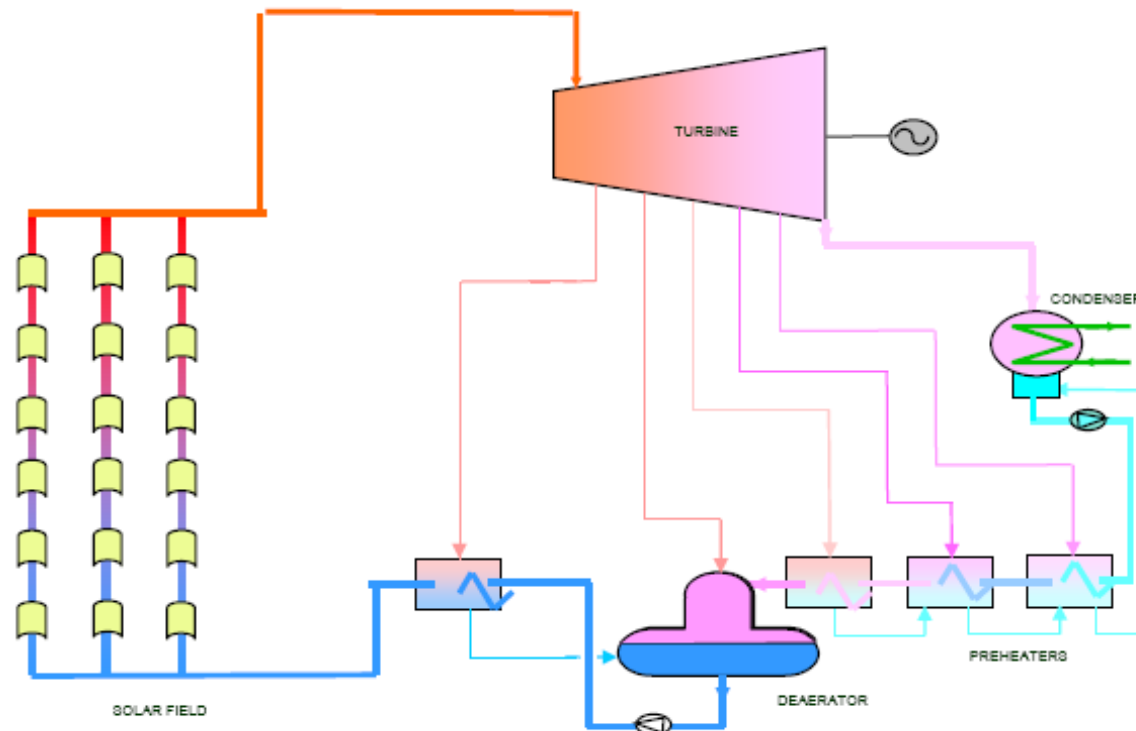
Fuente: Iberdrola

•AVOIDED

Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

Plantas de generación directa de vapor

Planta termosolar con generación directa de vapor



Ventajas:

- Reducción de costes
- Agua como fluido térmico (medioambientalmente más sostenible y segura)
- Eficiencia: Eliminación del límite superior de temperatura

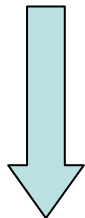
Fuente: Iberdrola

Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

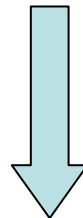
Barreras a la implantación de los PCM

- Necesidad de hallar materiales óptimos para la operación requerida
- Necesidad de optimizar costes
- Depósitos sólidos de PCM en los dispositivos de almacenamiento-materiales
- **Baja conductividad térmica de los PCM**

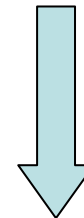
Investigación y Desarrollo Tecnológico



PROCESOS DE
ENCAPSULACIÓN



DESARROLLO DE
NUEVOS MATERIALES

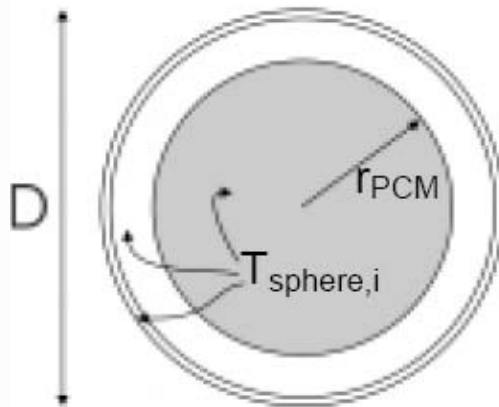


DISPOSITIVOS DE
INTERCAMBIO

Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

Encapsulación

- Microencapsulación (preferentemente en aplicaciones de confort térmico y de baja temperatura)
- Macroencapsulación (aplicaciones de media y alta temperatura)



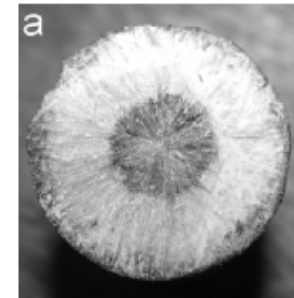
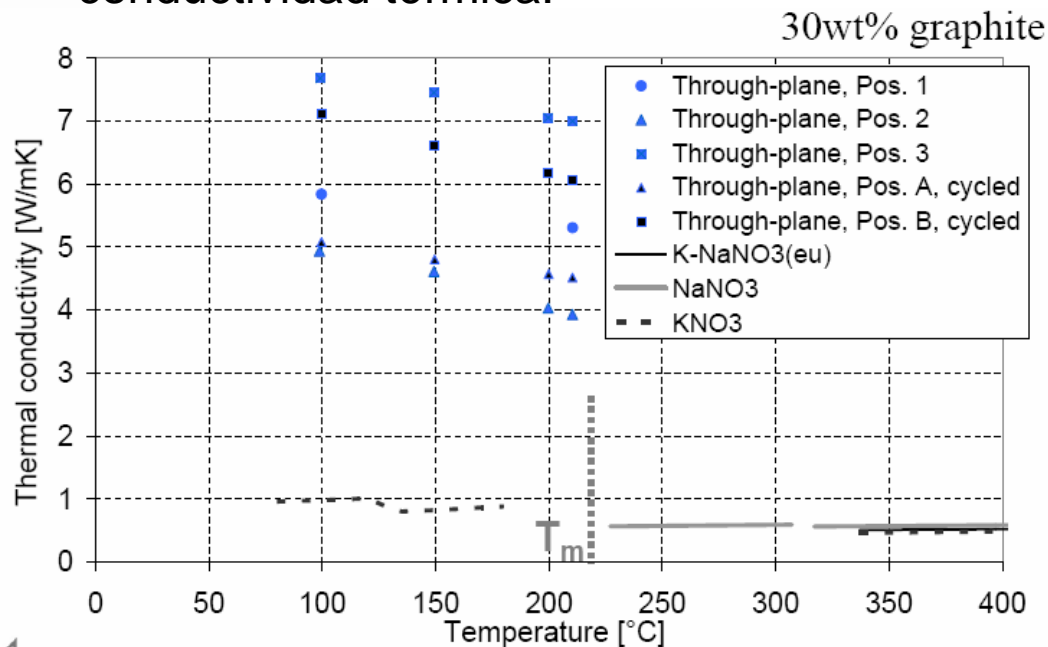
- Mejora de la conductividad térmica
- Protección de y frente al PCM
- Eliminación de depósitos de PCM

Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

Desarrollo de nuevos materiales

Inclusión en los PCM de dopantes (metales) o elaboración de composites (diversas formas de carbono) capaces de mejorar la conductividad térmica

- Enfoque prometedor: Grafito como elemento capaz de mejorar la conductividad térmica.



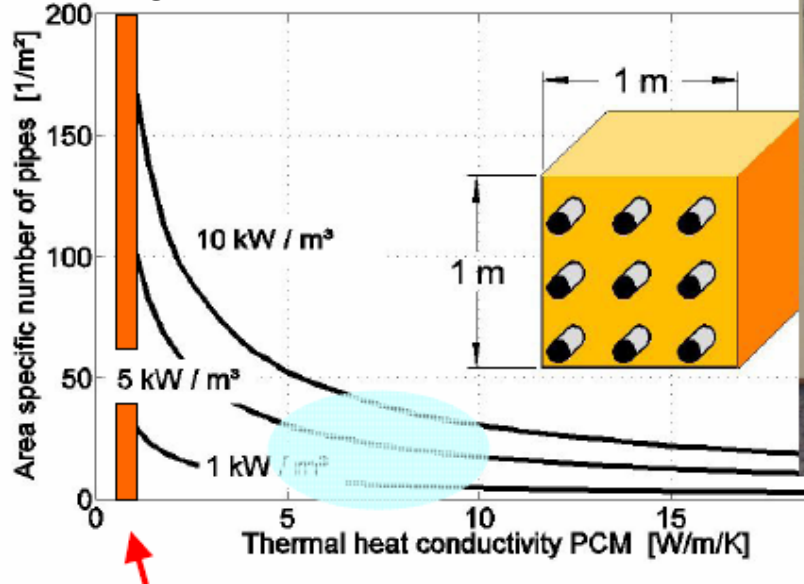
Fuente: Bauer et al, DSR

Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

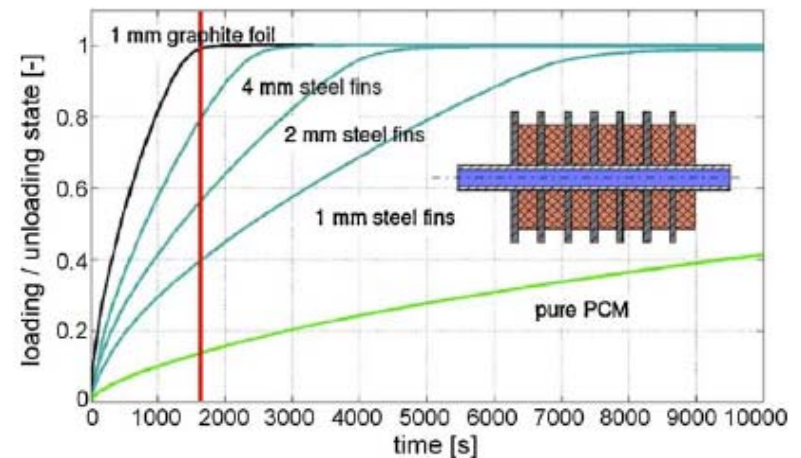
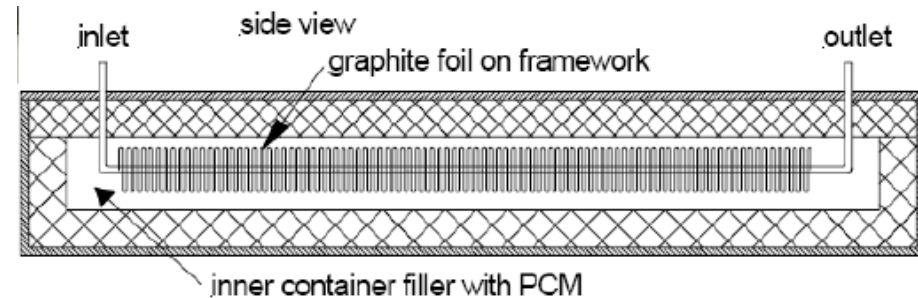
Dispositivos de intercambio

El objetivo es reducir la distancia media de transferencia de calor y mejorar la conductividad térmica. Enfoque: aletas o láminas de grafito o aluminio

Configuración clásica



Configuración "sandwich"



Aplicaciones en energía solar (alta temperatura)

Conclusiones

- Los PCM poseen propiedades que les hacen muy atractivos en el almacenamiento de energía térmica
- Existen diversos ámbitos de aplicación en el campo de las energías renovables, desde los de índole más “local” a las aplicaciones en grandes plantas de generación de energía
- El estado del arte está más desarrollado en aplicaciones de baja media temperatura que en las de alta temperatura
- El desarrollo de plantas termosolares de generación directa de vapor supone un incentivo para la implantación del almacenamiento mediante PCM
- Existe un amplio campo para el I+D en cuanto al “screening” de PCM, la micro/macroencapsulación, el desarrollo de nuevos materiales y de nuevos sistemas de almacenamiento
- En un plazo más largo, la investigación en nanofluidos y nano-PCM puede suponer un importante avance en la aplicación de las tecnologías basadas en PCM

Gracias por su atención

Ángel Del Pozo Pérez

Tfno.: 945 29 81 44 (Ext. 148)

Correo: angelp@leia.es

