

# **Incremento de la capacidad de una instalación de energía solar térmica mediante materiales de cambio de fase**

José Macías Macías

Hospital Juan Ramón Jiménez - Servicio Andaluz de Salud  
Departamento Ingeniería Eléctrica y Térmica, de Diseño y Proyectos  
Universidad de Huelva

# Índice

- 1.- Introducción
- 2.- Descripción de la instalación solar del HJRJ
- 3.- Resultados energéticos obtenidos
- 4.- Prescripciones del CTE – DB - HE4
- 5.- Propuesta de aumento de capacidad
- 6.- Conclusiones
- 7.- Resultados experimentales
- 8.- Bibliografía

# Introducción

- En el Hospital Juan Ramón Jiménez de Huelva existe una instalación de aprovechamiento de la energía solar para producción de agua caliente sanitaria.
- Se dispone de 216 captadores solares planos que cubren una superficie de 490 m<sup>2</sup>.
- Asimismo la instalación consta de 6 depósitos de 6.000 litros de capacidad unitaria para el almacenamiento del agua caliente.
- La instalación ejecutada responde a un esquema de producción de ACS con intercambio entre el circuito primario y la acumulación solar por un lado y entre los acumuladores solares y el circuito de consumo por otro.
- Se propone una modificación para aumentar la capacidad de almacenamiento térmico de la instalación sin realizar grandes cambios físicos en el sistema.





Figura 2.- Captadores solares en el Hospital Juan Ramón Jiménez de Huelva



*Figura 3.- Intercambiador de placas del circuito primario*



*Figura 4.- Intercambiadores de placas en el circuito secundario*



Figura 5.- Depósitos de almacenamiento de agua caliente

Tras varios años en servicio, la instalación descrita ha obtenido los resultados que aparecen en las tablas siguientes.

mes	consumo ACS m <sup>3</sup>	energía captada kwh	gas consumido kwh	energía total kwh	cobertura
enero	1.474	20.200	139.020	159.220	0,127
febrero	1.452	25.590	120.410	146.000	0,175
marzo	1.309	28.540	113.790	142.330	0,201
abril	1.159	29.300	99.080	128.380	0,228
mayo	1.225	34.710	91.940	126.650	0,274
junio	1.239	36.490	81.030	117.520	0,311
julio	1.230	36.980	81.310	118.290	0,313
agosto	1.029	35.920	92.480	128.400	0,280
septiembre	1.130	25.950	90.110	116.060	0,224
octubre	1.364	34.330	98.520	132.850	0,258
noviembre	1.565	22.110	107.510	129.620	0,171
diciembre	1.322	23.110	108.140	131.250	0,176
total	15.498	353.230	1.223.340	1.576.570	0,224

*Tabla 1.- resultados energéticos año 2011*

mes	consumo ACS m <sup>3</sup>	energia captada kwh	gas consumido kwh	energia total kwh	cobertura
enero	1.576	28.820	121.410	150230	0,192
febrero	1.609	34.470	113.160	147630	0,233
marzo	1.559	36.670	106.360	143030	0,256
abril	1.423	30.310	106.090	136400	0,222
mayo	1.480	38.810	95.430	134240	0,289
junio	1.321	38.490	92.120	130610	0,295
julio	1.277	35.770	80.340	116110	0,308
agosto	1.377	39.070	87.250	126320	0,309
septiembre	1.289	30.900	90.190	121090	0,255
octubre	1.148	25.800	91.810	117610	0,219
noviembre	1.311	18.380	105.180	123560	0,149
diciembre	1.286	18.960	108.610	127570	0,149
total	16.656	376.450	1.197.950	1.574.400	0,239

***Tabla 2.- resultados energéticos año 2012***

<b>mes</b>	<b>consumo ACS m<sup>3</sup> energía captada kwh</b>	<b>gas consumido kwh</b>	<b>energía total kwh</b>	<b>cobertura</b>	
enero	1.342	19.090	98.040	117.130	0,163
febrero	1.376	27.810	98.630	126440	0,220
marzo	1.666	24.960	110.010	134970	0,185
abril	1.582	34.310	93.800	128110	0,268
mayo	1.485	34.630	90.390	125020	0,277
junio	1.351	36.220	64.110	100330	0,361
julio	1.243	36.150	68.580	104730	0,345
agosto	1.233	34.560	68.230	102790	0,336
septiembre	1.016	31.030	65.410	96440	0,322
octubre	1.152	27.320	72.250	99570	0,274
noviembre	1.326	22.930	75.510	98440	0,233
diciembre	1.183	19.600	90.720	110320	0,178
total	15.955	348.610	995.680	1.344.290	0,259

***Tabla 3.- resultados energéticos año 2013***

mes	consumo ACS m <sup>3</sup>	energia captada kwh	gas consumido kwh	energia total kwh	cobertura
enero	1.384	18.050	85.890	103.940	0,174
febrero	1.182	18.900	80.810	99710	0,190
marzo	1.084	28.730	72.460	101190	0,284
abril	979	27.610	65.650	93260	0,296
mayo	1.112	34.610	66.740	101350	0,341
junio	1.034	32.230	63.220	95450	0,338
julio	848	27.220	58.140	85360	0,319
agosto	979	26.190	72.830	99020	0,264
septiembre	858	27.140	79.387	106527	0,255
octubre	1.071	25.350	87.526	112876	0,225
noviembre	1.064	18.440	99.330	117770	0,157
diciembre	1.057	19.650	135.290	154940	0,127
total	12.652	304.120	967.273	1.271.393	0,239

***Tabla 4.- resultados energéticos año 2014***

# Comportamiento del sistema solar del HJRJ

- En las figuras siguientes se facilita la evolución de los parámetros más importantes de la instalación en los días más característicos de cada estación. Las gráficas expuestas a continuación nos aportan toda la información que nos da el sistema, en la cual nos hemos basado en gran parte del estudio.

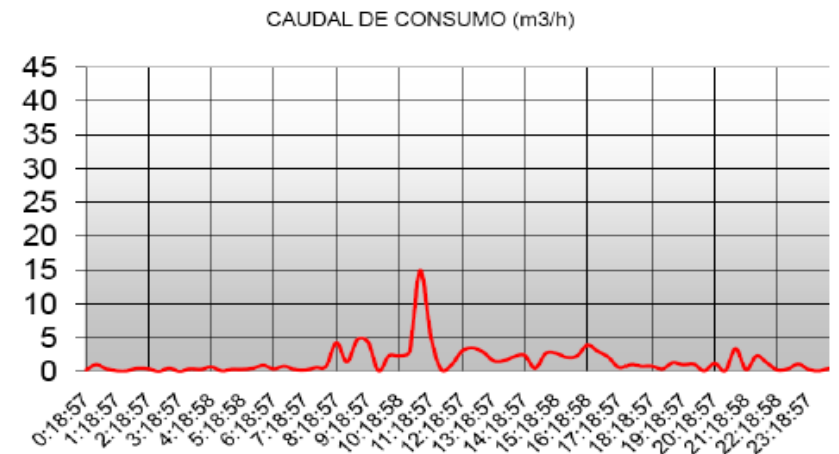
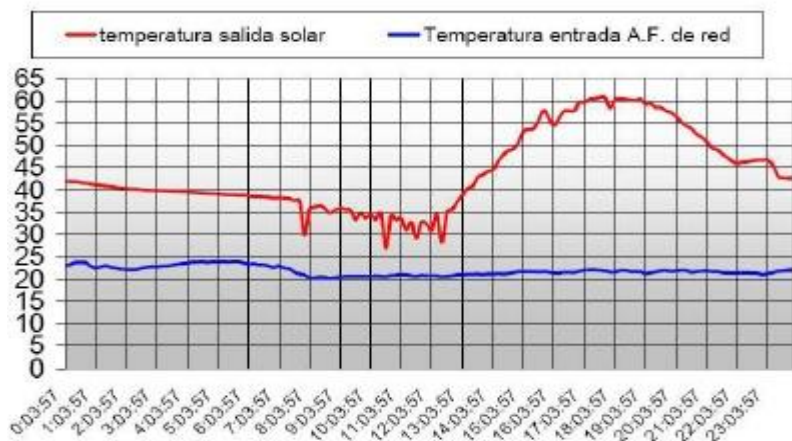
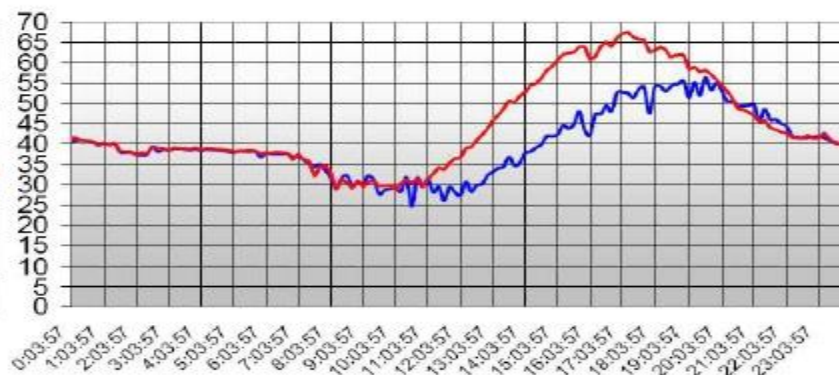
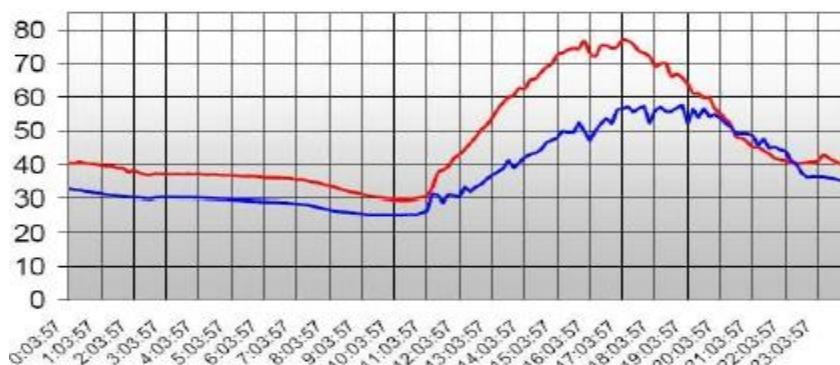
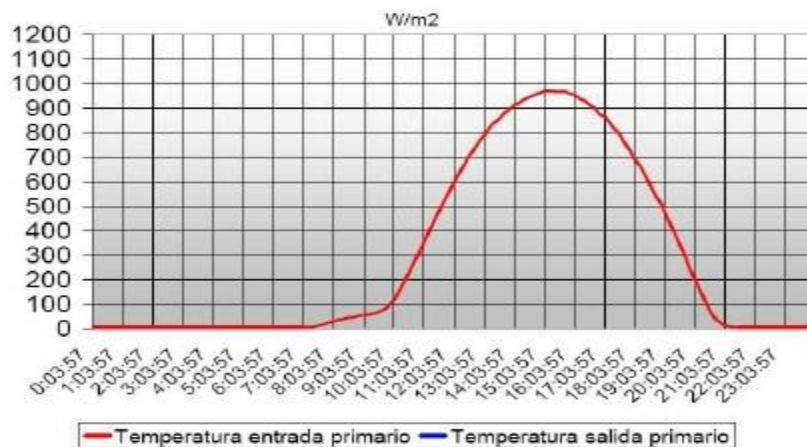
# Días de estudio

- Hemos utilizado datos de días que sean significativos, ya que el programa que usa el sistema de control nos proporciona información de todos los días del año y lo que hemos elegido ha sido un día típico de cada época .
- El día típico es el día que más veces se repite, aquel más característico de cada estación.
- Hemos elegido 4 días tipo, uno de primavera, otro de verano, uno de otoño y otro de invierno.

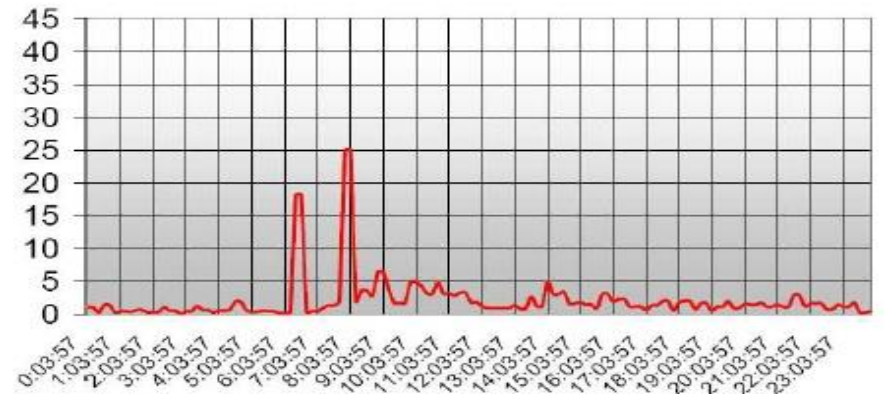
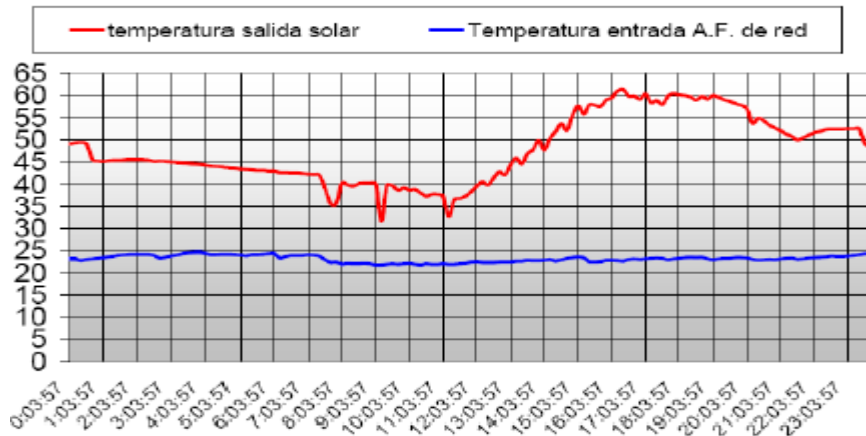
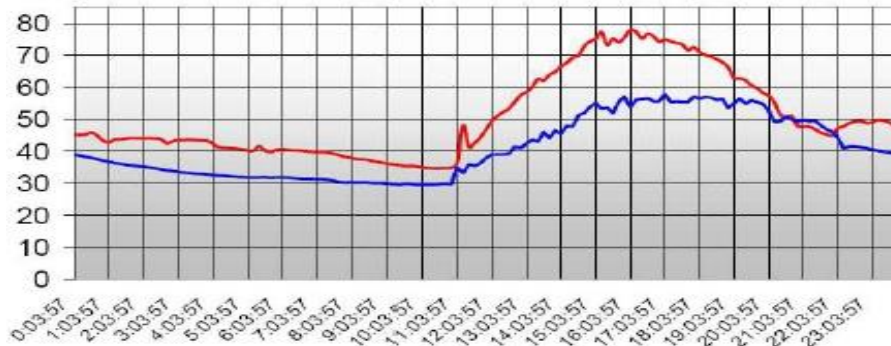
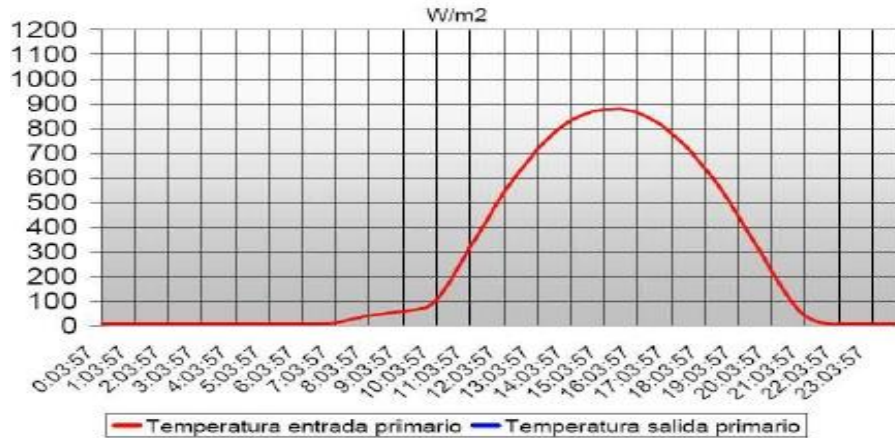
# Nomenclatura usada en las gráficas

- $W/m^2$  : Cantidad de radiación solar recibida en el plano de los colectores.
- Temperatura superior captadores: máxima temperatura instantánea.
- Temperatura entrada – salida primario: Temperatura agua circuitos captadores.
- Temperatura entrada – salida carga secundario: temperatura del agua a la entrada y salida del lado secundario del intercambiador primario.
- Temperatura entrada A.F red: temperatura del agua de red a la entrada de la instalación solar térmica.
- Temperatura salida solar: temperatura del agua de red a la salida de la instalación solar térmica.
  
- Caudal de consumo: Consumo instantáneo de agua caliente sanitaria.

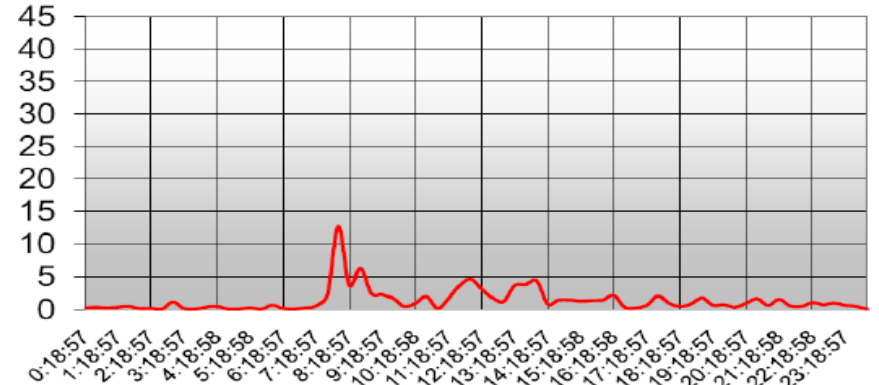
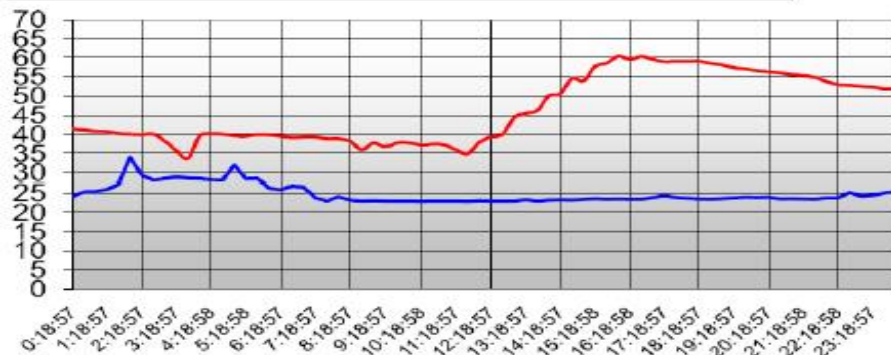
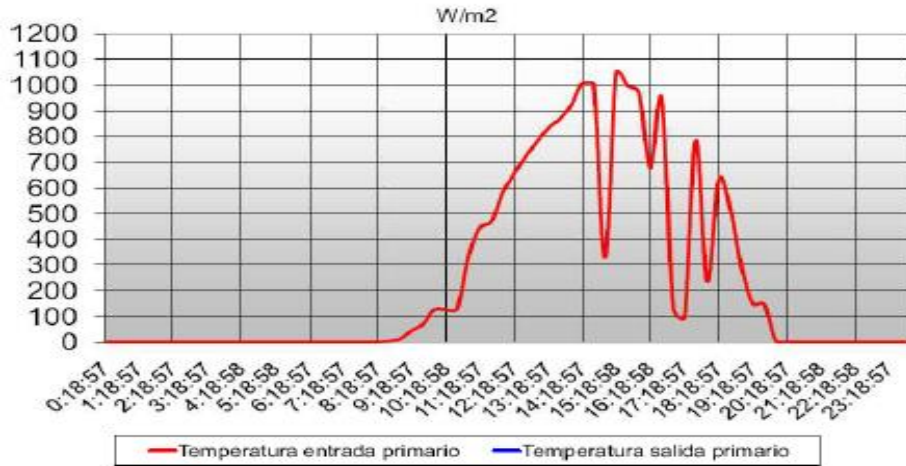
# Datos día típico de primavera



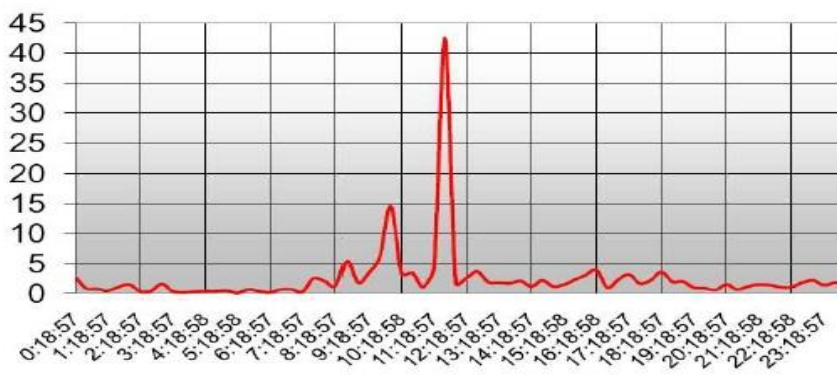
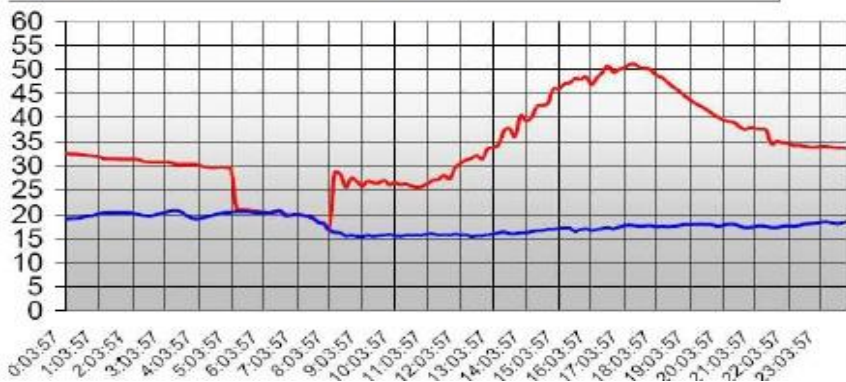
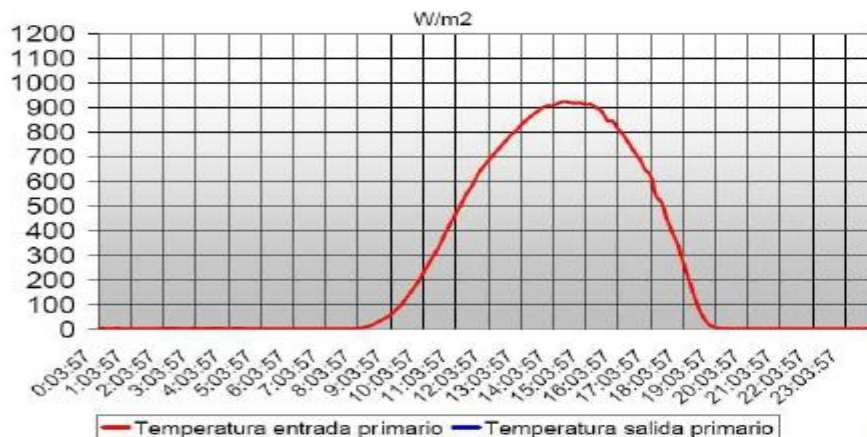
# Datos día típico de verano



# Datos día típico de otoño



# Datos día típico de invierno



# Observaciones

- Se observa que hay periodos del día en los que no es posible guardar más energía en el sistema de almacenamiento, aun existiendo excedentes térmicos solares debido a la limitación que presenta la instalación.
- Esta afirmación está basada en el valor que adquiere la temperatura de retorno del primario, que en ocasiones llega a cerca de 60° C en las horas inmediatamente posteriores al mediodía astronómico.

# Interpretación del fenómeno

- Esto puede interpretarse como que los tanques han alcanzado la máxima temperatura posible, porque no hay demanda de agua caliente sanitaria por parte del edificio.
- Se aprecia también, que en las horas centrales del día se alcanzan en el primario temperaturas superiores a 70° C: al menos 2 horas en primavera, 3 horas en verano, 2 horas en otoño y al menos 2 horas en invierno por encima de 60° C.

# Prescripciones del CTE

- En el Documento Básico HE 4 del Código Técnico de la Edificación se regula la contribución solar mínima para producción de agua caliente sanitaria en los edificios de nueva construcción o en la rehabilitación de inmuebles existentes.
- En el punto *3.2 del citado documento se describen las condiciones generales que deben reunir las instalaciones de aprovechamiento de energía solar para calentar agua y concretamente en su punto 3.2.1.2. b se dice textualmente que “el sistema de acumulación estará constituido por varios depósitos que almacenan el agua caliente...”*.
- *A la vista de esta afirmación, da la sensación que la norma solo contempla el almacenamiento de energía térmica en forma de calor sensible.*

- En su punto 3.2.2.1. a, se puede asimismo leer que “El objetivo básico del sistema solar es suministrar al usuario una instalación que optimice el ahorro energético global de la instalación en combinación con el resto de equipos térmicos del edificio”.
- Los objetivos de grado de cobertura son muy ambiciosos en determinadas regiones españolas, sobre todo en zonas con altos niveles de insolación. Concretamente, en la mayor parte de Andalucía se exige que el 70 % de la demanda térmica para producción de agua caliente se cubra con energía solar. Por otro lado, se limita la potencia de la instalación solar de manera que ningún mes del año la contribución de la misma sea mayor del 110 % de la demanda, ni se permite que tres meses seguidos supere el 100 %.

- En el punto 2.1.4 se indican las soluciones para impedir sobrepasar estos valores límites, que no siempre son posibles de llevar a cabo de forma fácil. En aquellas instalaciones en las que no existe acoplamiento entre las horas de consumo de agua caliente y la disponibilidad de radiación solar o en las que existen diferencias de ocupación semanales, mensuales o estacionales y por tanto, demanda de agua caliente a lo largo del año, el cumplimiento de las disposiciones vigentes es cuando menos, complicado

# Inconvenientes

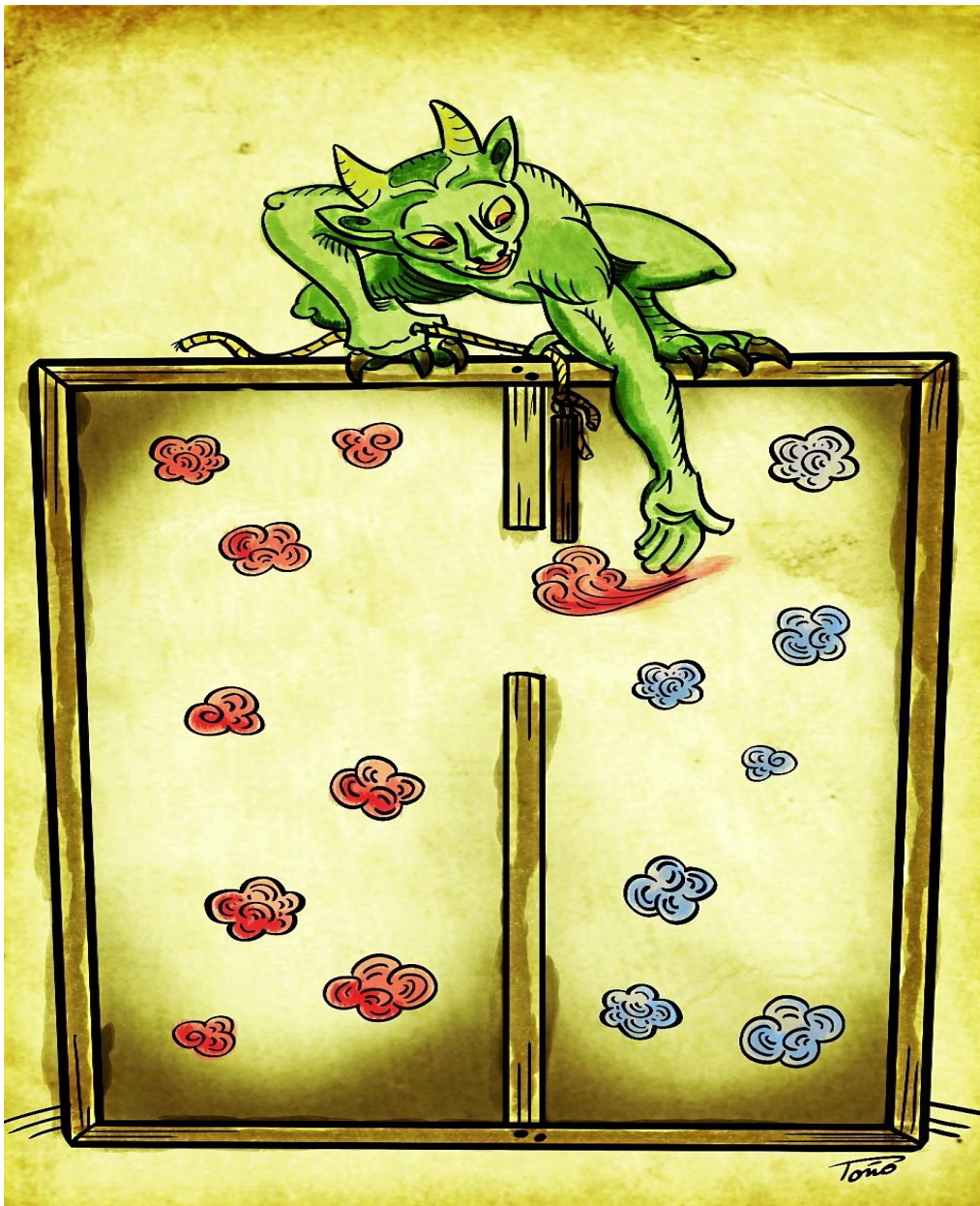
- Se puede dar el caso de tener que parar la instalación o limitar su funcionamiento durante ciertos periodos del año. Asimismo, como ocurre en el caso del HJRJ que se estudia, nos podemos encontrar con situaciones en las que existiendo energía solar disponible no tenemos forma de almacenarla, porque la temperatura del agua caliente en los tanques de almacenamiento ha llegado al punto superior de consigna debido a que no existe demanda por parte de los consumidores de agua caliente.

# Problemas

- Esto implica elevadas presiones y temperaturas en el circuito primario por falta de circulación del fluido, también un envejecimiento prematuro de muchos componentes de la instalación al estar sometidos a condiciones desfavorables ya que no se está retirando la energía solar incidente y se alcanzan condiciones de estancamiento.

# Dificultades de la solución según CTE

- Un aumento del número de tanques para guardar más agua caliente, no resolvería adecuadamente el problema, además de implicar modificaciones sustanciales en la instalación y un gran desembolso económico, y por supuesto más espacio disponible en la sala de máquinas, lo que no siempre es factible



- En este trabajo se propone una solución que no necesita una gran inversión, no implica cambios de ningún tipo en las tuberías, no se precisa más superficie para ubicar nuevos depósitos y se mejora en alto grado el acoplamiento entre producción y consumo de agua caliente.

Figura 6 .- Demonio de Maxwell

# Empleo de materiales de cambio de fase

- En lugar de almacenar la energía solar únicamente en forma de calor sensible, se sugiere hacerlo en forma de calor latente de cambio de estado del agente de trabajo que mejor se adapte a las circunstancias concretas de esta instalación.

# Ventajas de los materiales de cambio de fase

- Estos materiales mantienen constante la temperatura durante el cambio de fase, mientras el agente de trabajo almacena o cede energía. Este hecho supone una mayor densidad energética en comparación con cualquier otro y su uso está ligado al de las energías renovables para ajustar los periodos de suministro a los de demanda, como en el caso que nos ocupa.

# Propiedades del material de cambio de fase

- Temperatura de fusión adecuada para la aplicación
- Calor latente de cambio de fase elevado
- *Alta conductividad térmica*
- Capacidad calorífica elevada
- Densidad elevada
- No debe producirse separación entre sus fases incompatible con la aplicación
- Las variaciones de volumen al cambiar de estado deben ser pequeñas.
- Compatibilidad con el material del contenedor.
- Estable químicamente
- Barato y abundante
- No tóxico,
- No inflamable,
- No contaminante,
- No corrosivo

# Limitaciones

- Uno de los criterios más importantes que ha limitado la aplicación de los materiales de cambio de fase es su estabilidad tras sucesivos ciclos de solidificación/fusión.
- El ciclo de vida (ciclos totales de solidificación/fusión hasta la degradación del material) depende principalmente de dos factores: la estabilidad de sus propiedades termofísicas y la corrosión que se presenta entre el material de cambio de fase y el recipiente que lo contiene. Por ello el diseño del sistema de almacenamiento de energía va muy ligado a las propiedades físicas del material de cambio de fase y a la geometría del contenedor.

# Tipos de materiales de cambio de fase

- Se pueden emplear materiales orgánicos e inorgánicos. En las tablas siguientes aparecen varios de ellos que podrían utilizarse para esta aplicación concreta, ya que se ha limitado el margen de temperaturas de trabajo al intervalo comprendido entre 40 y 80° C.
- En dichas tablas la leyenda n.d. significa *no disponible* en las fuentes consultadas.

# Tabla 5.- Sustancias orgánicas

PCM	$T_m$ [°C]	L [kJ/kg]	$\rho$ (s/l) [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ (s/l) [W/m·K]	$c_p$ (s/l) [kJ/kg·K]
n-Heneicosane	40.2	200.00	-/756	n.d.	n.d.
n-Decosane	44.0	249.00	-/763	n.d.	n.d.
n-Tricosane	47.5	232.00	-/764	n.d.	n.d.
hexacosane	56-59	250.00	800	n.d.	1.9/2.4
heptacosane	58.8	235.00	802	n.d.	1.9/2.4
octacosane	61-64	254.00	803	n.d.	1.9/2.4
nonacosane	63.2	239.00	805	n.d.	1.9/2.5
triacontane	65-67	252.00	806	n.d.	1.9/2.5
polyglycol E6000	66.0	190.00	1212/1085	n.d.	n.d.
stearic acid	67-69	203.00	941	0.17	2.35
dotriacontane	67-72	266.00	809	n.d.	1.9/2.4
biphenyl	69.85	120.45	1166/976	n.d.	1.08/1.46
hexatriacontane	77.7	259.00	815	n.d.	1.84/2.45
heptatriacontane	77.7	275.00	815	n.d.	1.84/2.45
propionamide	79.65	168.20	1088	n.d.	-/2.05
naphthalene	80.1	147.70	1145/976	0.32/0.132	-/1.52

# Parafinas

- Las parafinas son mezclas de hidrocarburos saturados, consistentes en una mezcla de numerosos alcanos obtenidos durante el proceso de refinamiento del crudo de petróleo o producidas sintéticamente.
- Después del refinamiento son un producto inodoro, insípido y no tóxico. La fórmula general de estos hidrocarburos saturados es del tipo  $C_nH_{2n+2}$  donde  $n$  varía entre 18 y 50 (temperatura de fusión entre 30 y 90° C).
- Pueden encontrarse dos tipos: en forma normal, constituidas por cadenas rectas, o en forma iso, cuando estas cadenas tienen ramificaciones.
- Para almacenamiento térmico principalmente se utilizan las normal-parafinas, pues estas poseen una mayor capacidad de acumulación.

# Propiedades de las parafinas

- Su calor específico medio es de 2,1 kJ/kg ° C), superior al de otros materiales utilizados como materiales de acumulación térmica.
- Poseen un elevado calor de fusión por unidad de peso, de entre 180 y 250 kJ/kg.
- Las parafinas son estables hasta 250° C aproximadamente.
- Su viscosidad es baja en la fase líquida.
- Además es un líquido no polar, lo que significa que no se mezclaría con otros líquidos polares como por ejemplo el agua o el alcohol.
- Como la mayoría de compuestos orgánicos, las parafinas tienen una baja conductividad térmica. Esto es una desventaja, que puede ser compensada aumentando la superficie de transferencia de calor.
- Son inflamables, pero su punto de ignición se encuentra por encima de los 250° C.
- La densidad de este material en estado líquido es de 750 a 850 kg/m<sup>3</sup>, y en estado sólido de 800 a 900 kg/m<sup>3</sup>, esto hace que se incremente su volumen aproximadamente un 10% durante el proceso de cambio de fase, valor que se puede considerar como aceptable, si bien condiciona el dimensionado del contenedor.
- Poseen un amplio rango de puntos de fusión a temperaturas relativamente bajas (de -5 a 66° C).
- No son tóxicos ni corrosivos y son estables a lo largo del tiempo pues no existe ninguna reacción química durante el proceso de fusión (los cambios de estado son procesos puramente físicos).
- Son químicamente estables e inertes por debajo de los 500° C.

# Tabla 6.- Sustancias inorgánicas

PCM	$T_m$ [°C]	L [kJ/kg]	$\rho$ (s/l) [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ (s/l) [W/m·K]	$c_p$ (s/l) [kJ/kg·K]
KF·2H <sub>2</sub> O	41.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
K(CH <sub>3</sub> COO)·1½H <sub>2</sub> O	42.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	43.0	142.0	n.d.	n.d.	n.d.
K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	45.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	45.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	48.0	201.0	1729	0.41/0.69	1.86/2.35
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	48.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	54.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O	58.0	265.	1290/1440	0.65/0.41	3.18/2.07
Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	59.5	n.d.	2455	n.d.	n.d.
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	60.0	n.d.	2455	n.d.	n.d.
NaOH·H <sub>2</sub> O	64.0	272.0	1720	n.d.	1.51
Na <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	70.0	184.0	n.d.	n.d.	n.d.
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	75.0	n.d.	1730	n.d.	n.d.
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	75.0	216.0	1620	n.d.	1.98/1.58
Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	78.0	301.0	2180/1937	1.26/0.65	1.17/1.26
AlK(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	80.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

# Características sales inorgánicas

- Cabe destacar las sales hidratadas, que son una combinación de un compuesto y agua, encontrándose esta molécula de agua en el interior de una red cúbica. Este agua se puede liberar cuando la sustancia es sometida a altas temperaturas.
- Poseen un alto calor de fusión, una conductividad térmica relativamente alta y son fácilmente disponibles y económicas. Además al fundirse no se producen variaciones de volumen importantes, pero pierden progresivamente su reversibilidad. Esto es debido a que muchas de las sales hidratadas funden de forma incongruente con la formación de sales menos hidratadas, disminuyendo la eficiencia de almacenamiento.
- Un problema adicional es que a menudo son corrosivas.

# Comparación entre ambos tipos de sustancias

Orgánicos	Inorgánicos
<i>Ventajas</i>	
No corrosivos	Mayor entalpía de cambio de fase
Bajo o nulo subenfriamiento	
Estabilidad térmica y química	
<i>Desventajas</i>	
Menor entalpía de cambio de fase	Subenfriamiento
Baja conductividad térmica	Corrosión
Inflamabilidad	Separación de las fases
	Segregación de las fases, falta de estabilidad térmica

# Configuración del almacenamiento del material de cambio de fase

- Para aprovechar al máximo las propiedades del agente de trabajo, debe estudiarse cuidadosamente la forma en la que se dispone en los depósitos de almacenamiento y las propiedades que debe reunir el material que lo contendrá.
- El análisis de los problemas de transferencia de calor en los procesos de solidificación/fusión, comúnmente llamados problemas de frontera móvil, son especialmente complicados debido a que la interfase sólido/líquido se mueve, dependiendo de la rapidez con la cual se absorbe o se cede calor a través de esta frontera.

# Uso de esferas

- Para evitar alteraciones significativas de la instalación, parece razonable emplear esferas del diámetro más favorable, todas iguales, conteniendo el material de cambio de fase que se introducirán en los actuales tanques de almacenamiento de agua.



Figura 7.- Material de cambio de fase en estado sólido

Figura 8.- Material de cambio de fase en estado líquido

# Empaquetamiento

- El parámetro que permite maximizar la ocupación del volumen de los depósitos es el factor de empaquetamiento, que se define como el cociente entre el volumen ocupado por todos los pequeños elementos de retención del material de cambio de fase y el volumen total del recipiente que los contiene.

# Factor de empaquetamiento

- Como el volumen del depósito de contención es muy superior a los volúmenes elementales de las esferas y estas serán tangentes unas con otras y del mismo diámetro, podemos inferir que la distribución final será del tipo cúbico simple con un factor de empaquetamiento de 0,52 y por tanto con un volumen de huecos (porosidad) del 48 %, la más favorable para nuestros propósitos, ya que es la que menos pérdida de carga introduce.



Figura 9.- Esferas empaquetadas

# Consideraciones termofísicas

En nuestro caso concreto para optimizar el efecto positivo de la reforma que se propone tenemos que llegar a una solución de compromiso dado que intervienen los siguientes factores:

- Conductividad térmica del agente de trabajo
- Material del que están fabricadas las esferas
- Conductividad térmica del material que constituye las esferas envolventes
- Diámetro de las esferas
- Espesor de la pared de las esferas
- Rugosidad de la pared de las esferas
- Temperatura del cambio de fase
- Calor latente del cambio de fase
- Intervalo de temperaturas de trabajo
- Capacidad de almacenamiento del sistema
- Configuración del sistema de almacenamiento térmico
- Fluido de transferencia térmica (en nuestro caso agua sin ningún aditivo)
- Velocidad de circulación del fluido de transferencia térmica.

# Capacidad de almacenamiento térmico

Felix Regin et al.(2) han realizado un análisis numérico perfectamente aplicable a este caso y basándonos en su trabajo, hacemos el siguiente razonamiento:

- Capacidad de almacenamiento actual:  $Q_a = Vt \rho_a C_{pa}(T_{eas} - T_{sas})$
- Capacidad almacenamiento con PCM:

$$Q_{PCM} = 0.48 Vt \rho_a C_{pa}(T_{eas} - T_{sas}) + 0.5 Vt \{ [C_{pPCM_s} \rho_{PCM_s} (60 - T_{sas})] + L_{PCM} + [C_{pPCM_l} \rho_{PCM_l} (T_{eas} - 60)] \} + 0,02 Vt \rho_{pe} C_{ppe}(T_{eas} - T_{sas})$$

## **Nomenclatura y valores de los parámetros:**

- **Qa :** Cantidad máxima de calor que se puede almacenar actualmente: 1.255 kwh.
- **Vt:** Volumen total de los depósitos de almacenamiento de agua caliente solar: 36 M<sup>3</sup>
- **$\rho_a$ :** Densidad del agua: 1.000 kg/m<sup>3</sup>
- **C<sub>p</sub>a:** Calor específico del agua líquida: 4,18 KJ/kg °C
- **Teas :** Temperatura máxima entrada tanques agua caliente solar: 65° C
- **Tsas:** Temperatura mínima salida tanques agua caliente solar: 35° C
- **Q<sub>PCM</sub>:** Cantidad máxima de calor que se podría almacenar con PCM: 1.675 kwh.
- **C<sub>p</sub>PCM<sub>s</sub> :** Calor específico del material de cambio de fase en estado sólido: 1,9 kJ/kg °C
- **$\rho$ <sub>PCM<sub>s</sub></sub> :** Densidad media del material del cambio de fase en estado sólido: 850 kg/m<sup>3</sup>
- **L<sub>PCM</sub> :** Entalpía de cambio de fase del PCM: 190 KJ/kg
- **C<sub>p</sub>PCM<sub>l</sub> :** Calor específico del material del cambio de fase en estado líquido: 2,1 kJ/kg °C
- **$\rho$ <sub>PCM<sub>l</sub></sub> :** Densidad media del material del cambio de fase en estado líquido: 800 kg/m<sup>3</sup>
- **$\rho$ <sub>pe</sub> :** Densidad media del material que contiene el PCM: 920 kg/m<sup>3</sup>
- **C<sub>p</sub>pe :** Calor específico del material que contiene el PCM: 2,3 kJ/kg °C
- **0,48:** porcentaje del volumen de los depósitos ocupados por agua.
- **0,5:** porcentaje del volumen de los depósitos ocupados por el PCM
- **0,02:** porcentaje del volumen de los depósitos ocupados por el material de las bolas.

A la vista de las consideraciones anteriores se propone lo siguiente:

- Fluido de trabajo: Parafina pura con punto de fusión de 58-60° C
- Calor latente de cambio de estado: 190 Kj/kg
- Temperaturas de trabajo: 35- 65° C
- Diámetro de las esferas: 40 mm.
- Material del que están hechas las esferas: polietileno u otro material plástico.
- Espesor de las bolas: 0,5 mm.
- Numero de esferas por tanque: 11.640
- Numero total de esferas: 69.840
- Peso unitario de las esferas con pared de 0,5 mm: 9 gramos aproximadamente.
- Masa de polietileno: 628 kg.
- Flujos de masa del agua a través del tanque de almacenamiento: 0,08-0,16 kg/s
- Empaquetamiento: cúbico simple con porosidad 45-48 %
- Tanques con carga de PCM: todos
- Volumen ocupado en los tanques de almacenamiento: 3.120 litros en cada uno
- Masa de PCM necesaria: 15.300 kg.
- Sentido preferente de circulación del agua caliente: descendente para la carga (fusión de la parafina) y ascendente para la descarga (solidificación)

**Previsión de resultados.-** Al incrementar la capacidad de almacenamiento, el sistema debe ser capaz de proporcionar mejores prestaciones que las actuales. Una característica del cambio propuesto, tal como aparece en la referencia 2, es que el tiempo de carga es bastante más rápido que la descarga, debido a las propiedades termofísicas del agente de trabajo y a la configuración geométrica elegida. Estas circunstancias son favorables para nuestros intereses, ya que la carga se realizaría en las horas centrales del día, con altos grados de insolación y la descarga se haría a lo largo de la tarde, noche y primeras horas de la mañana.

Para hallar los días soleados de un año tipo se ha consultado la base de datos TUTIEMPO.NET, y los valores responden a la media aritmética de 6 años escogidos aleatoriamente en el periodo que va desde el año 1977 hasta 1999 en Huelva capital. La energía adicional se ha hallado multiplicando los días de Sol de cada mes por los excedentes energéticos que aparecen en el párrafo tercero del punto 3.

## Tabla 7.-Cambios en la energía captada en un año típico

mes	dias con Sol	horas punta	energía captada ahora	energía adicional	energía con PCM
enero	22	2	16400	6880	23280
febrero	22	2	24903	7040	31943
marzo	27	2	30027	8480	38507
abril	27	2	33737	9805	43542
mayo	26	2	38740	9435	48175
junio	29	3	34220	11753	45973
julio	30	3	36510	12300	48810
agosto	31	3	35290	12573	47863
septiembre	28	3	32075	11275	43350
octubre	27	2	29320	10773	40093
noviembre	25	2	21860	10167	32027
diciembre	21	2	15120	8417	23537
total	312	624	315410	118899	467101

Tabla 8.- Resultados energéticos instalación solar actual en un año típico

<b>mes</b>	<b>consumo agua m<sup>3</sup></b>	<b>energia captada kwh</b>	<b>gas consumido kwh</b>	<b>energia total kwh</b>	<b>cobertura</b>
enero	1.439	16.400	137.173	153.573	0,106
febrero	1.403	24.903	120.787	145.690	0,171
marzo	1.436	30.027	125.880	155.907	0,193
abril	1.240	33.737	96.203	129.940	0,259
mayo	1.350	38.740	95.607	134.347	0,288
junio	1.214	34.220	88.350	122.570	0,280
julio	1.272	36.510	83.737	120.247	0,304
agosto	1.142	35.290	88.263	123.553	0,286
septiembre	1.244	32.075	91.285	82.240	0,272
octubre	1.265	29.320	89.135	78.970	0,256
noviembre	1.352	21.860	111.455	88.877	0,175
diciembre	1.292	15.120	116.170	87.527	0,124
<b>total</b>	<b>13.931</b>	<b>315.410</b>	<b>1.108.030</b>	<b>1.423.440</b>	<b>0,223</b>

Tabla 9.- Resultados energéticos instalación solar con PCM en un año típico

mes	consumo agua m <sup>3</sup>	energia captada kwh	gas consumido kwh	energia total kwh	cobertura
enero	1.439	23.280	130.293	153573	0,152
febrero	1.403	31.943	113.747	145690	0,219
marzo	1.436	38.507	117.400	155907	0,247
abril	1.240	43.542	86.398	129940	0,335
mayo	1.350	48.175	86.172	134347	0,359
junio	1.214	45.973	76.597	122570	0,375
julio	1.272	48.810	71.437	120247	0,406
agosto	1.142	47.863	75.690	123553	0,387
septiembre	1244	43350	38.890	82240	0,527
octubre	1265	40093	38.877	78970	0,508
noviembre	1352	32027	56.849	88877	0,360
diciembre	1292	23537	63.990	87527	0,269
total	13931	467101	956.339	1423440	0,328

**Breve estudio económico.-** Con idea de conocer, aunque sea someramente, el impacto económico de la reforma propuesta, a continuación se realiza un breve estudio en el que se incluirán las mejoras conseguidas, la inversión a realizar y el periodo de retorno de la misma empleando precios en moneda constante.

1. Precio del kwh. solar abonado por el hospital: 0,055866 €/Kwh.
2. Pago anual por la energía solar aprovechada actualmente: 17.620 €
3. Pago anual por la energía solar aprovechada con PCM: 26.095 €
4. Diferencia entre los costos anteriores: 8.475 €
5. Precio de la parafina en grandes cantidades: 1,17 €/kg.
6. Costo total de la parafina: 17.900 €
7. Precio unitario de las esferas de 40 mm de contención de la parafina: 0.02 €
8. Costo total de las esferas: 1.396 €
9. Manipulación de esferas y envasado de parafina: 5 % de (8 + 9): 965 €
10. Costo total de PCM instalado en los depósitos: 20.260 €
11. Periodo de retorno de la inversión en moneda constante (10/4) : 2,4 años

# Conclusiones propias

- En este trabajo se ha descrito la posibilidad de incrementar la capacidad de almacenamiento de una instalación concreta sin realizar grandes cambios en su configuración ni en las condiciones de trabajo.
- Como es evidente la bondad de la propuesta solo se confirmará si se acometen las modificaciones. La reforma planteada es posible extenderla a otras instalaciones tras un cuidadoso estudio de las condiciones reales de funcionamiento y tras verificar que efectivamente existe un excedente térmico no aprovechable en las horas de máxima insolación.



## 6 Conclusiones

En base a lo expresado puede concluirse:

1. Que la actual instalación solar dispone de un sistema de almacenamiento con poca capacidad de acumulación lo que impide el aprovechamiento de parte de la energía producida por el sistema.
2. Que la ampliación del sistema de acumulación de la instalación, para obtener un mayor aprovechamiento de la energía producida por el campo de captación solar, debe ser de unos 410 kWh.
3. Que la ampliación de la instalación de almacenamiento mediante el sistema que se propone requiere una mayor inversión frente a los necesarios para ser ampliada de forma convencional. Consecuentemente queda condicionada esta opción a la no disponibilidad de espacio para albergar a los dos tanques que se necesitarían para almacenar con agua los 410 kWh.
4. Que aunque existan discrepancias entre los resultados del estudio y los establecidos en este informe, estos son debidos a los criterios de partida empleados en cada caso y consecuentemente pueden avalarse los resultados del estudio.
5. Que aunque la inversión requerida al aumentar el número de bolas se incremente en un 17% y el periodo de retorno pase de los 4,6 años a 5,4 años, en ambos casos la alternativa es viable.

# Resultados experimentales

- En el laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos de la ETSI de Huelva se realiza una práctica dentro de la docencia de la asignatura Tecnología Energética de 1º de Máster en ingeniería industrial para verificar si aumenta la capacidad térmica de un calorímetro empleado como acumulador térmico al introducir el material de cambio de fase, comparándolo con otro que solo tiene agua.

# Material empleado

- 2 Calorímetros
- 2 Fuentes de alimentación eléctrica
- 2 resistencias de  $6 \Omega$
- 2 recipientes de vidrio de 100 ml.
- 2 termómetros digitales
- 200 ml de parafina
- Agua
- Balanza
- 2 Cronómetros

# Método operativo

- En primer lugar se pesan los dos calorímetros vacíos y se anota el resultado.
- Luego se mide el verdadero valor de las resistencias que se van a emplear, que rondará los  $6 \Omega$
- Seguidamente se pesan las botellitas de vidrio que contienen la parafina. La diferencia entre esta pesada, y lo que pesan vacías supone con bastante fiabilidad la masa de parafina empleada.
- Se introducen las botellitas con parafina en uno de los calorímetros.
- Se vierte agua en los vasos internos de los dos calorímetros hasta que ambos alcancen el mismo nivel de agua y ésta llegue a dos centímetros debajo de la boca de ambas botellas
- Se vuelven a pesar ambos calorímetros y se calcula la masa de agua exterior que se ha introducido en cada uno.
- Se anotan las temperaturas iniciales del agua en ambos calorímetros y la ambiental.
- Se colocan las resistencias eléctricas de manera que calienten la masa de agua exterior a las botellas, pero sin tocar a estas.
- Se conectan a las fuentes de alimentación y se ponen los cronómetros en marcha.
- Se anotan las temperaturas del agua de cada calorímetro en intervalos de 2 minutos.
- Cuando el recipiente que contiene agua en la botella llegue a  $70^{\circ} \text{C}$  se corta la alimentación eléctrica y se anota el tiempo transcurrido.
- Cuando el recipiente que contiene parafina en las botellas llegue a  $70^{\circ} \text{C}$ , se observa si se ha fundido toda la parafina de la botellita. En caso negativo, esperar a que lo haga y después se anota el tiempo transcurrido.



Figura 10.- Inicio del experimento



11.- Desarrollo de la prueba

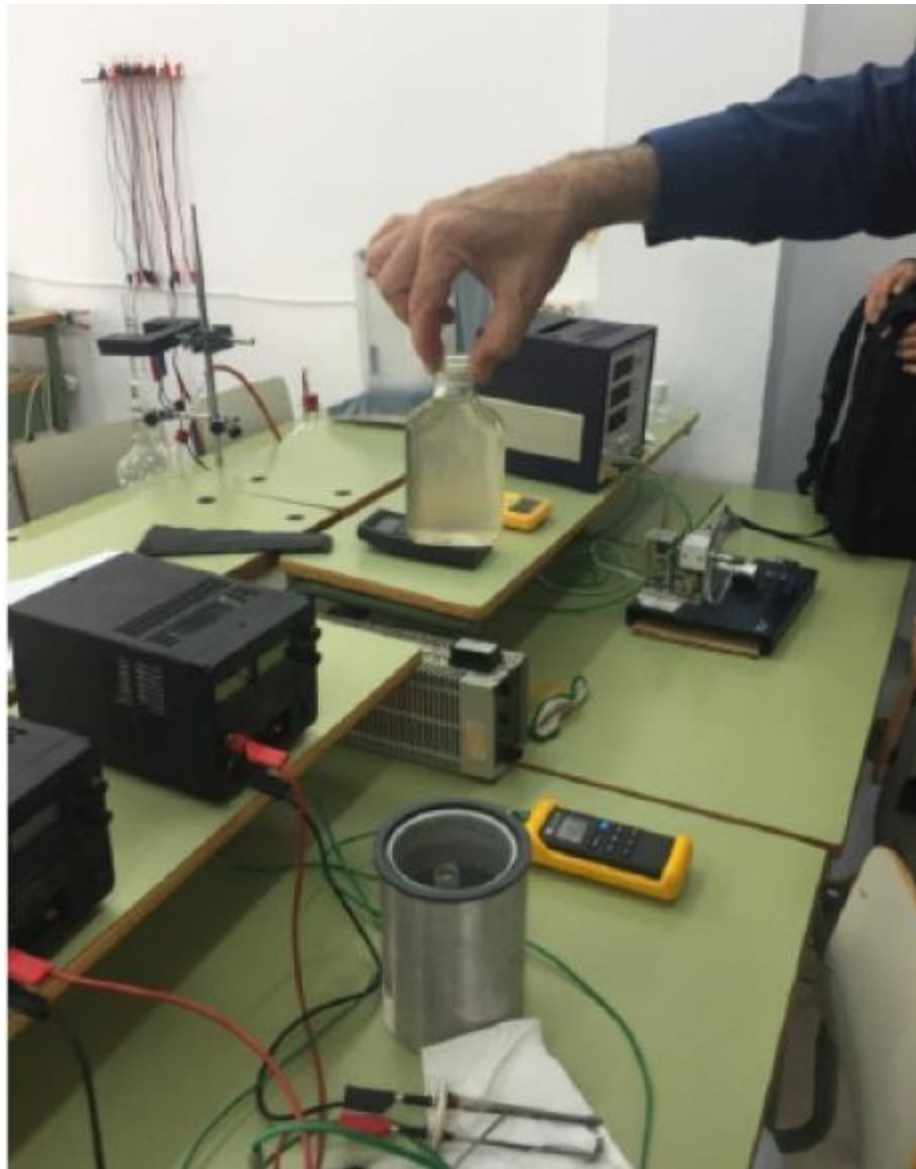


Figura 12.-Parafina liquida en una de las botellas

# Resultados

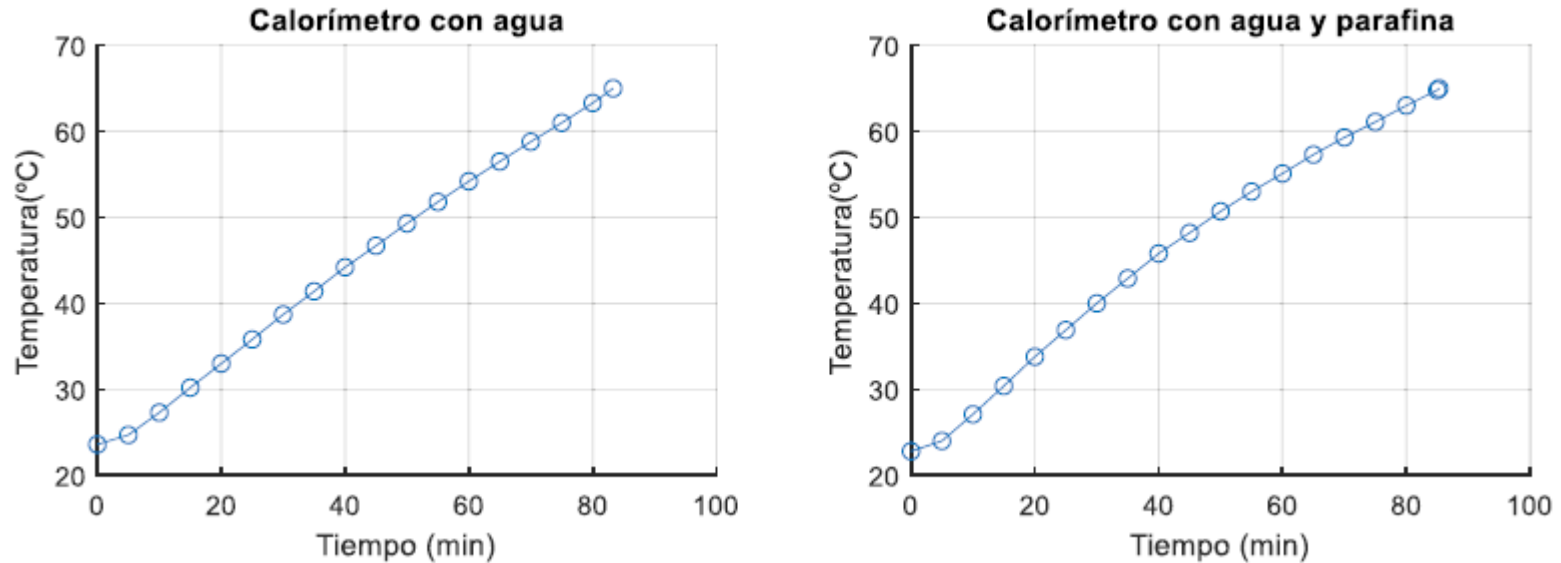


Figura 13 *Representación gráfica de la evolución de la temperatura con respecto al tiempo*

En la gráfica de la evolución de la temperatura del calorímetro que únicamente contiene agua se observa que la variación de temperatura es aproximadamente lineal, sin embargo y comparando esta con la evolución de la temperatura del calorímetro con agua y parafina se observa que la variación de la temperatura no es tan lineal como en el caso anterior.

La variación de la temperatura del calorímetro que contiene agua y parafina no es tan lineal debido a que durante un intervalo de tiempo se encuentra produciéndose un cambio de fase debido a la parafina. Este cambio de fase no es muy apreciable en la gráfica de la figura dos debido a la cantidad de vidrio contenido en el calorímetro el cual mitiga el efecto producido por el cambio de fase de la parafina.

# Energía aportada a los calorímetros

Para el cálculo de energía aportado a cada calorímetro se emplea la ecuación 1 que no es más que el producto de las tensiones, intensidades y el tiempo en cada calorímetro.

$$Q_s = V \cdot I \cdot t \quad (1)$$

Empleando la ecuación 1, se tiene que el calor suministrado por cada fuente a sendos calorímetros son las que se exponen a continuación:

1. Calorímetro con agua:

$$Q_{s1} = V_1 \cdot I_1 \cdot t_1 = 15,4V \cdot 2,25A \cdot 4998s = 173,1807 \text{ kJ}$$

$$Q_{s1} = 173,1807 \text{ kJ}$$

2. Calorímetro con agua y parafina:

$$Q_{s2} = V_2 \cdot I_2 \cdot t_2 = 15,2V \cdot 2,35A \cdot 5118s = 182,81496 \text{ kJ}$$

$$Q_{s2} = 182,81496 \text{ kJ}$$

A la vista de lo anterior y teniendo en cuenta que la masa de vidrio ha sido muy superior a la de parafina en este experimento concreto, el incremento de capacidad térmica ha sido del 5,56 %. Si se disminuye la masa de los contenedores y se aumenta la de parafina, el porcentaje aumentaría, lo que avala la hipótesis estudiada para el caso de la instalación solar del HJRJ.

# Bibliografía

- 1.- Almacenamiento de energía solar térmica usando cloruro de magnesio hexahidratado; Macía Gómez, A. F; Tesis de Grado. Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2007.
- 2.- An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation; A. Felix Regin\*, S.C. Solanki, J.S. Saini; Mechanical & Industrial Engineering Department, Indian Institute of Technology Roorkee; India; Renewable Energy 34 (2009) 1765–1773
3. - Numerical analysis of water melting and solidification in the interior of tubes; S. I. S. de Souza I; H. A. Vielmo II. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI; Campus de Santo Ângelo; Santo Ângelo, RS. Brazil; J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. vol.27 no.2 Rio de Janeiro Apr./June 2005.
4. - Study on a PCM heat storage system for rapid heat supply. Jinjia Wei et al. Energy Technology Research Institute. National Institute of Industrial Advanced Science und Technology: Tsukuba. Japan; Applied Thermal Engineering 25; 2005; 2903-2920.
- 5.- A model for latent heat energy storage systems; Numan Yuksel, Atakan Avci and Muhsin Kilic; Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Uludag University, Gorukle Campus, Bursa, Turkey ; Int. J. Energy Res. 2006; 30:1146–1157.
- 6.- Modelización del cambio de fase sólido líquido. Aplicación a sistemas de acumulación de energía térmica. Bárbara Vidal Jiménez. Tesis Doctoral .Centro Tecnológico de Transferencia de Calor. Departamento de Maquinas y Motores Térmicos. Universidad Politécnica de Cataluña. 2.007.