

V.- ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR

La energía solar es una fuente de energía que depende del tiempo; para una amplia gama de aplicaciones las necesidades de energía dependen también del tiempo, pero en forma distinta del suministro de energía solar, por lo que el desfase entre los períodos de disponibilidad de la energía solar y los períodos de consumo, requieren de alguna forma de almacenamiento.

El almacenamiento de energía solar se tiene que realizar teniendo en cuenta,

- *El tipo de colector solar*
- *Las unidades de almacenamiento*
- *Los aparatos de conversión (tales como acondicionadores de aire o motores), cargas, suministros de energía auxiliares o suplementarios, etc*
- *Los sistemas de control.*

Las características y el COP de cada uno de estos elementos están relacionados con la temperatura; en un proceso termosolar de generación de potencia, el sistema de almacenamiento de energía térmica provoca una gran diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del fluido, lo que a su vez implica una baja temperatura de entrada en la máquina térmica y, por lo tanto, un bajo COP de ésta y de toda la instalación.

La capacidad de almacenamiento óptimo de la energía solar es función de su disponibilidad, que depende de,

- *El tiempo*
- *La naturaleza de las cargas que se pueden esperar en el proceso*
- *La forma en que se suministra la energía auxiliar*
- *Un análisis económico que determina qué parte de las cargas totales de energía deben ser de tipo solar y qué otras partes procedentes de otras formas de energía.*

V.1.- CARGAS DEL PROCESO DEL COLECTOR SOLAR

Si se considera un proceso solar en el que la variación de la carga P con el tiempo y la ganancia del colector, están relacionados de forma que durante una parte del tiempo, la energía disponible sobrepasa a la carga y viceversa.

Un sistema de almacenamiento tiene que permitir almacenar un exceso de calor Q_{col} sobre la carga P, cuando Q_{col} sea mayor que P y devolverlo cuando P sea mayor que Q_{col} .

El valor de Q_{col} es,

$$Q_{col} = (G c_p)_{col} (T_{c2} - T_{dep}) = C_{col} (T_{c2} - T_{dep})$$

en la que G es el gasto másico del agua que circula por el colector, c_p su calor específico, C_{col} la capacidad calorífica del colector, T_{c2} la temperatura de salida del agua en el colector y T_{dep} la temperatura del depósito

La información que se deriva de los valores de Q_{col} y de A (superficie de intercambio térmico en el depósito), sobre el coste del suministro de energía solar, permite calcular la fracción de las necesidades de la energía total que se cubren con las fuentes de energía solar o auxiliar.

Los parámetros básicos que permiten definir el depósito de almacenamiento son,

- La duración del almacenamiento
- La cantidad de energía a almacenar
- La temperatura deseada en el sistema receptor de la energía, que viene condicionada por la utilización de esta energía

Los medios de almacenamiento se clasifican en,

- Almacenamiento a plazo corto (horas o días)
- Almacenamiento de larga duración (meses), generalmente del verano para el invierno

V.2.- ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN LOS PROCESOS SOLARES

El almacenamiento de la energía solar se puede hacer,

-- En forma de **calor sensible**, en el que el calor almacenado aumenta la temperatura de un medio líquido, sólido o gaseoso

- En forma de calor latente, como el calor de fusión en sistemas químicos
- En forma de calor sensible y latente, en el que el calor almacenado entraña una variación de temperatura y un cambio de estado del sistema receptor (sólido o líquido); la restitución del calor corresponde al cambio de estado inverso.

- En forma de energía química originada en algunas reacciones químicas
- En forma de energía mecánica que se puede transformar en energía potencial mediante el almacenamiento de fluidos a ciertas alturas
- En forma de sustancias obtenidas en procesos solares no energéticos, como el agua destilada en un alambique solar que se puede almacenar en depósitos para su utilización posterior

La elección de los medios de almacenamiento de energía depende de la naturaleza del proceso.

- Para el calentamiento de agua, resulta lógico el almacenamiento de energía bajo forma de calor sensible.

- Si se usan colectores de calentamiento para acondicionamiento de aire, el almacenamiento puede ser tanto en forma de calor sensible como latente.

- Si se usan procesos fotovoltaicos o fotoquímicos, el almacenamiento es en forma de energía química.

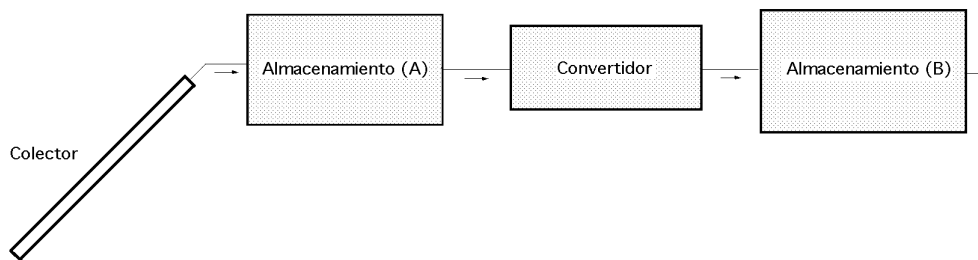


Fig V.1.- Esquema de almacenamiento alternativo

A la hora de diseñar el componente de almacenamiento de energía, pueden existir varias alternativas.

Si por ejemplo se considera un proceso en el que un motor térmico transforma la energía solar en energía eléctrica, el almacenamiento se puede disponer,

- Como almacenamiento térmico entre el colector solar y el motor

- Como almacenamiento mecánico entre el motor y el generador

- Como almacenamiento químico en una batería (acumulador) entre el generador y la aplicación energética definitiva, como puede ser la refrigeración solar mediante un acondicionador de aire, o el frío generado por el acondicionador de aire que se puede almacenar en una unidad de almacenamiento térmico de baja temperatura por debajo de la del medio ambiente.

Estas alternativas no son equivalentes, ni en la capacidad, ni en los costes, ni en las formas de diseño, ni en el COP del sistema. La capacidad necesaria en una unidad de almacenamiento, Fig V.1, en la posición B es inferior a la que hace falta en la posición A, debido a la eficiencia del convertidor que interviene. El almacenamiento de energía térmica en A tiene la ventaja de que el convertidor se puede diseñar para funcionar a un régimen más próximo al régimen estacionario, originando así una eficiencia de conversión superior y un factor de uso más alto en el convertidor.

La elección entre el almacenamiento de energía en A o en B puede tener efectos muy distintos en la temperatura de funcionamiento del colector solar, en el tamaño del colector y en el coste.

Estos argumentos se pueden modificar de forma sustancial, según se utilice o no energía auxiliar.

Las características principales de un sistema de almacenamiento de energía térmica son,

- Su capacidad por unidad de peso o de volumen

- El campo de temperaturas dentro del cual funciona, es decir, la temperatura a la que se aplica y se extrae calor del sistema

- Los medios para aplicar y extraer calor y las diferencias de temperatura asociadas con ellos

- La estratificación de la temperatura en la unidad de almacenamiento
- Las necesidades energéticas para añadir o extraer calor
- Los contenedores, depósitos y otros elementos estructurales asociados con el sistema de almacenamiento
- Los medios para controlar las pérdidas térmicas del sistema de almacenamiento
- Su coste

En cualquier sistema de almacenamiento de energía solar tienen un significado especial los factores que afectan al funcionamiento del colector. La ganancia útil de un colector disminuye a medida que aumenta la temperatura media de la placa; una relación entre la temperatura media del colector y la temperatura a la cual transmite el calor, se puede poner en la forma,

$$\begin{aligned}
 T(\text{colector}) - T(\text{transmisión}) &= \\
 &= T(\text{transporte desde el colector al almacenamiento}) + T(\text{almacenamiento de entrada}) + \\
 &+ T(\text{pérdida de almacenamiento}) + T(\text{salida de almacenamiento}) + \\
 &+ T(\text{transporte desde el almacenamiento a la aplicación}) + T(\text{entrada en aplicación})
 \end{aligned}$$

La temperatura del colector, que es la que determina su ganancia útil, es más alta que la temperatura a la cual se utiliza el calor, debido a la suma de una serie de incrementos como consecuencia de las pérdidas, por lo que uno de los objetivos del diseño general del sistema y sobre todo de la unidad de almacenamiento, es el reducir al mínimo estas caídas de temperatura.

V.3.- ALMACENAMIENTO POR CALOR SENSIBLE PARA EL AGUA

El agua es un elemento útil, barato y fácilmente disponible para el almacenamiento de calor sensible, en forma de agua caliente sanitaria o agua para calefacción. La energía térmica solar se aplica al gasto G que pasa por el colector y se extrae mediante un gasto m de agua sanitaria o calefactora en la unidad de almacenamiento, en donde se produce el intercambio térmico entre dichos fluidos. Si los sistemas están bien diseñados, los costes de bombeo son pequeños y de fácil cálculo; tanto las unidades de almacenamiento de agua, como el colector, pueden funcionar en circulación natural o forzada.

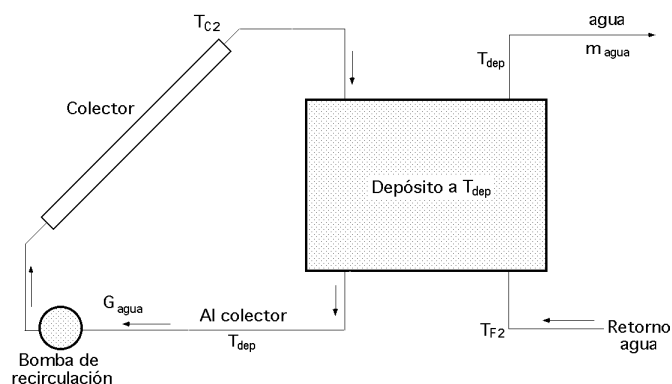


Fig V.2 .- Unidad de almacenamiento de depósito de agua con circulación de agua procedente del colector para aplicar energía calorífica y salida de la carga (agua sanitaria) para aprovechar dicha energía.

La capacidad de almacenamiento de energía por una unidad de líquido almacenado, que funciona en un intervalo finito de temperaturas, $T = T_{dep} - T_{F2}$, viene determinada por,

$$Q_{dep} = (m c_p)_{dep} (T_{dep} - T_{F2}) = C_{dep} (T_{dep} - T_{F2})$$

siendo Q_{dep} el calor comunicado al agua sanitaria entre las temperaturas T_{dep} y T_{F2} , m es el gasto másico de agua correspondiente, en kg/seg, y C_{dep} su capacidad calorífica

El margen de temperaturas en que la unidad puede funcionar viene determinado, en la mayoría de las aplicaciones, entre un límite inferior definido por las exigencias del proceso, y un límite superior definido por la presión de vapor del líquido.

BALANCE ENERGÉTICO.- El balance energético sobre el depósito de almacenamiento sirve para predecir su temperatura como una función del tiempo. Haciendo un balance energético sobre el depósito *sin estratificar*, la variación de energía interna del sistema tiene que ser igual a la suma de los calores y cargas puestos en juego,

$$C_{dep} \frac{dT_{dep}}{dt} = Q_{col} - P - (U A)_{dep} (T_{dep} - T_a)$$

ecuación en la que,

P es la carga a la entrada del colector, función del tiempo

Q_{col} es la energía captada en el colector, que depende del tipo de colector, de la forma,

$$Q_{col} = C_{col} (T_{C2} - T_{dep})$$

donde C_{col} es la capacidad calorífica del fluido que circula por el colector y T_{C2} es la temperatura del fluido caliente a la salida del mismo.

El gasto másico G que circula por el colector puede ser accionado o no por una bomba.

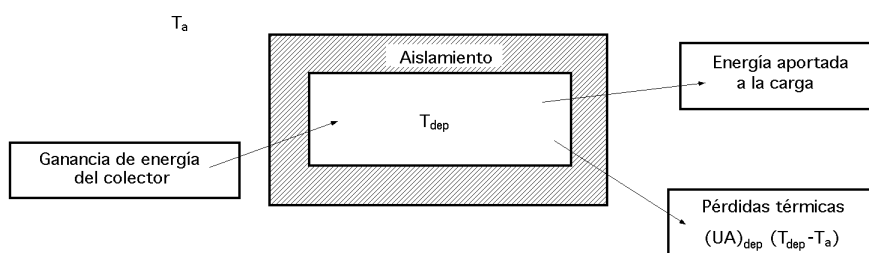


Fig V.3.- Almacenamiento sin estratificación de masa, con el ambiente a T_a

Si se supone que la tubería que conecta el colector con el depósito de almacenamiento está bien calorifugada, se puede despreciar la caída de temperatura del fluido a lo largo de ella. Con esta interpretación se puede poner,

$$Q_{col} = F C_{col} (T_{C2} - T_{dep})$$

en la que F es una función de control, cuyo valor oscila entre 1 cuando la bomba está funcionando y

0 en otras circunstancias.

La función de control F proporciona las posiciones de marcha o parada del sistema de control de la bomba, que la acciona cuando T_{C2} es mayor que T_{dep} (es decir, cuando se puede aplicar energía a la unidad de almacenamiento); en estas circunstancias, la velocidad de flujo másico en cualquier momento es, $F G$.

Para una carga determinada se pueden presentar relaciones en donde los resultados conforman un sistema de ecuaciones, de forma que Q_{dep} viene determinado por la ecuación del rendimiento del colector y P por las exigencias de la carga. Estas ecuaciones se resuelven para obtener tanto la temperatura T_{dep} como las variaciones de energía en función del tiempo; también se puede incluir la energía auxiliar añadiéndola al depósito o al caudal que sale del mismo hacia la carga.

DEPOSITO ESTRATIFICADO.- Los depósitos de agua pueden funcionar también con diversos grados de estratificación, es decir, cuando el agua no está a una temperatura uniforme, lo que origina densidades distintas estratificadas; ésto hace que según el agua vaya entrando busque su propio nivel de densidad, siempre que entre a baja velocidad.

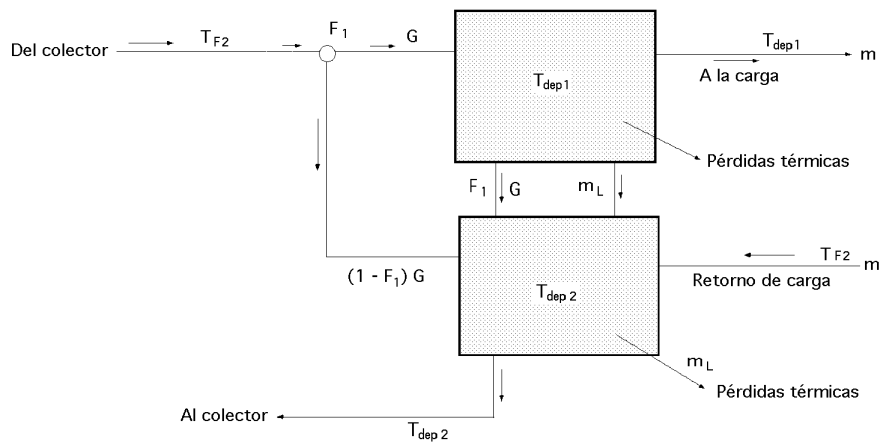


Fig V.4.- Sistema de almacenamiento de agua parcialmente estratificada

Si se considera un depósito de dos secciones, Fig V.4, para la superior se puede hacer el siguiente balance energético,

$$\frac{dT_{dep1}}{dt} = \frac{F_1 C_{col} (T_{C2} - T_{dep1}) + C_L (T_{dep2} - T_{dep1}) - (UA)_{dep1} (T_{dep1} - T_a)}{C_{dep1}} = \frac{F_1 C_{col} (T_{C2} - T_{dep1}) + C_L (T_{dep2} - T_{dep1}) - (UA)_{dep1} (T_{dep1} - T_a)}{C_{dep1}}$$

El primer sumando entre paréntesis es la ganancia del colector, multiplicada por una función de control F_1 que,

- Es 1 cuando T_{C2} es superior a T_{dep1}
- Es 0 cuando T_{dep1} es mayor que T_{C2} y ésta mayor que T_{dep2}

El segundo sumando representa la carga suministrada por la sección superior del depósito; el retorno de la carga para este sistema de almacenamiento, siempre se hará a la sección inferior.

La carga total es,

$$(m c_p)_L (T_{dep1} - T_{L,ret}) = C_L (T_{dep1} - T_{L,ret})$$

La carga suministrada por la sección de arriba, es,

$$(m c_p)_L (T_{dep1} - T_{dep2}) = C_L (T_{dep1} - T_{dep2})$$

y la carga suministrada por la sección de abajo,

$$(m c_p)_L (T_{dep2} - T_{L,ret}) = C_L (T_{dep2} - T_{L,ret})$$

El término $(UA)_{dep1}(T_{dep1} - T_a)$ es el correspondiente a las pérdidas desde la sección superior al medio exterior.

Un balance energético para la segunda sección es,

$$\begin{aligned} \frac{dT_{dep2}}{dt} &= \\ &= \frac{F_1 C_{col} (T_{dep1} - T_{dep2}) + (1 - F_1) C_{col} (T_{C2} - T_{dep2}) + C_L (T_{L,r} - T_{dep2}) - (UA)_{dep2} (T_{dep2} - T_a)}{(m c_p)_{dep2}} \end{aligned}$$

V.4.- ALMACENAMIENTO DE N SECCIONES

Lo anteriormente visto se puede generalizar para un almacenamiento de N secciones, si se definen dos funciones de control, una para el lado del colector y otra para el lado de la carga.

Para el colector se puede poner,

$$F = 1 \quad ; \quad T_{i-1} > T_{C2} > T_i$$

$$F_i^C = 0, \text{ en otros casos}$$

Para la carga se tiene,

$$F = 1 \quad ; \quad T_i > T_{L,ret} > T_{i+1}$$

$$F_i^C = 0, \text{ en otros casos}$$

por lo que el balance energético será,

$$\begin{aligned} (m c_p)_i \frac{dT_i}{dt} &= C_i \frac{dT_i}{dt} = \\ &= C_{col} \left\{ F_i^C (T_{C2} - T_i) + (T_{i-1} - T_i) \prod_{j=1}^{i-1} F_j^C \right\} + C_L \left[F_i^L (T_{L,r} - T_i) + (T_{i+1} - T_i) \prod_{j=i+1}^N F_j^L \right] + (UA)_i (T_a - T_i) \end{aligned}$$

Puede suceder que existan circunstancias en las que el fluido en el colector o en la carga no sea igual al del depósito de almacenamiento, como se presenta en la Fig V.5, en la que se observa un

depósito único en el que los circuitos de las placas colectoras y de carga están separadas por intercambiadores.

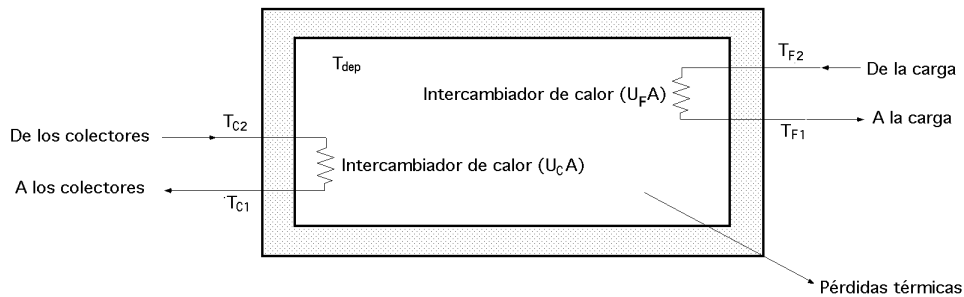


Fig V.5

ALMACENAMIENTO EN LECHO DE ROCAS.- Una unidad de almacenamiento en lecho de rocas (guijarros o cantos) Fig V.6, se basa en la capacidad calorífica de ciertos materiales ligeramente compactos, a través de los cuales se hace circular un fluido, generalmente aire.

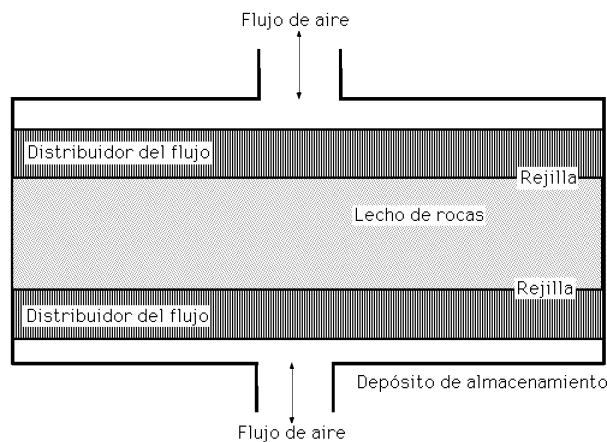


Fig V.6.- Unidad de almacenamiento de lecho compacto

Para las aplicaciones de energía solar, los lechos de rocas bien diseñados, que utilizan la propia roca, tienen varias características interesantes, como,

- a) El coeficiente de transferencia de calor entre el aire y el material sólido es alto
- b) El coste del material de almacenamiento es bajo
- c) La conductividad térmica del lecho es baja cuando no circula aire a su través.

Las partes que componen una unidad de este tipo de lecho compacto son,

- a) Un contenedor
- b) Una estructura porosa para contener y apoyar el lecho
- c) Distribuidores de aire para el flujo en ambas direcciones que reduzcan al mínimo el paso del aire.

Durante el funcionamiento, el flujo pasa a través del lecho en una dirección aportando calor (generalmente hacia abajo) y en dirección contraria al extraer calor. No se puede aportar y extraer calor de esta unidad al mismo tiempo; ésta es una diferencia fundamental con los sistemas de

almacenamiento de agua donde es posible aportar y extraer calor simultáneamente.

Las necesidades de aislamiento en la superficie exterior del lecho de rocas son mínimas, si el almacenamiento es para períodos de tiempo cortos, puesto que la conductividad térmica del lecho en las direcciones radiales es baja.

Los intercambiadores de lecho de guijarros tienen una transferencia de calor muy buena entre el aire y los sólidos del lecho, lo que tiende a reducir al mínimo las diferencias de temperatura entre el aire y los sólidos cuando se calienta el lecho y entre los sólidos y el aire cuando se enfría el lecho.

Se han realizado muchos estudios sobre el calentamiento y el enfriamiento de lechos de rocas en sistemas químicos con materiales de relleno de tamaño uniforme y forma regular, pero pocos ofrecen un verdadero interés para las aplicaciones en los sistemas termosolares.

Para la determinación del coeficiente de transferencia de calor en lechos de rocas se puede utilizar la expresión, (Lof y Hawley, 1948)

$$h_v = 650 \frac{G^{0,7}}{D}$$

en la que, h_v es el coeficiente de transferencia de calor en, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

G es la velocidad de masa superficial en, $kg/seg.m^2$

D es el diámetro equivalente de la partícula, en, m , dado por

$$D = \sqrt[3]{\frac{6}{\text{Número de partículas}} \frac{\text{Volumen neto de las partículas}}{\text{Número de partículas}}}$$

Un lecho bien diseñado debe tener un tamaño de partículas lo suficientemente pequeño como para que se reduzcan al mínimo los gradientes de temperatura en dichas partículas.

Aplicando el criterio de Biot para esferas de radio R y conductividad térmica k si, $Bi = \frac{h_c R}{k} < 0,1$

la resistencia térmica de las partículas y sus gradientes de temperatura se pueden considerar despreciables, (sólidos con resistencia térmica interna despreciable).

El coeficiente de transmisión de calor por convección h_c está relacionado con h_v mediante la ecuación,

$$h_v = \frac{A}{V} h_c$$

siendo $\frac{A}{V}$ la inversa de la longitud característica del lecho, que es el cociente entre la superficie de contacto del lecho ocupada por el material y su volumen.

Tanto en los lechos de rocas experimentales como en los prácticos, se han utilizado tamaños de roca de aproximadamente 1 a 5 cm. Los tamaños de partículas deben ser bastantes uniformes con el fin de obtener una buena parte de espacios vacíos y así reducir al mínimo la caída de presión.

Si se considera un lecho de rocas de longitud total L dividido en N secciones iguales, de longitud x , y suponiendo que los gradientes de temperatura radiales son despreciables, se puede considerar

que el material del lecho tiene una temperatura uniforme $T_{lecho,i}$ lo que implica el que el numero de Biot de las partículas del lecho sea inferior a 0,1.

Para valores del coeficiente de transferencia de calor bajos, la temperatura del fluido no es igual a la temperatura del lecho y será necesario hacer dos balances energéticos, uno para el lecho y otro para el fluido.

El balance energético para el calentamiento del lecho (flujo de aire hacia abajo), para la sección i del lecho, según se muestra en la Fig V.7, es,

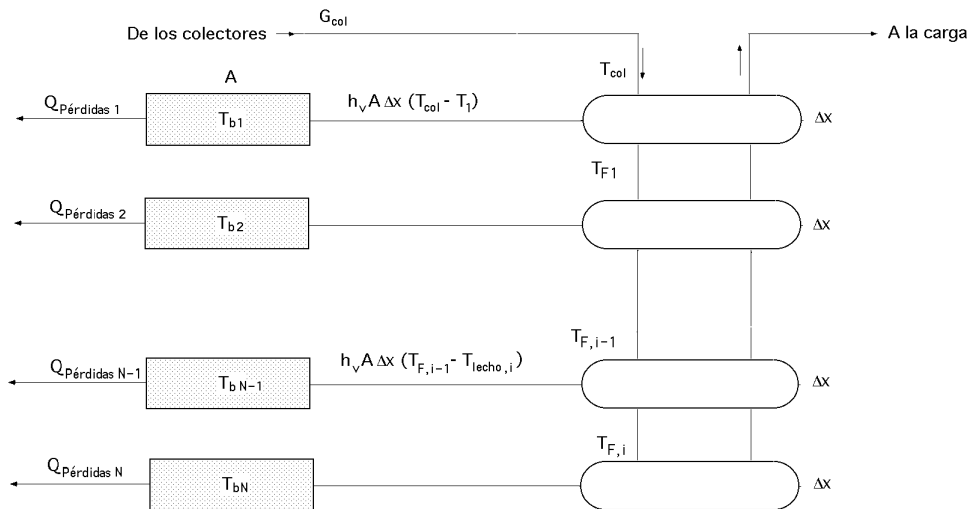


Fig V.7.- Aproximación numérica del lecho de rocas

$$(c_m A x)_{lecho} \frac{dT_{lecho,i}}{dt} = h_v A x (T_{F,i-1} - T_{lecho,i}) - Q_{(pérdidas)_i}$$

en la que A es el área de la sección transversal del lecho, ρ es su densidad y c_m es el calor específico del material que lo compone.

Las pérdidas al exterior $Q_{(pérdidas),i}$ se pueden representar en función de la temperatura interior y exterior del aire que rodea al lecho.

La temperatura del medio exterior, para el cálculo de las pérdidas de almacenamiento, no coincide con la temperatura del aire exterior, puesto que para algunos sistemas, como los utilizados en el calentamiento de espacios habitables, la unidad de almacenamiento está situada dentro de la vivienda, por lo que en estos casos, las pérdidas de almacenamiento se convierten en ganancias.

Si la capacidad calorífica del fluido es despreciable en comparación con la capacidad calorífica del lecho, (el fluido es generalmente aire), la temperatura del fluido $T_{F,i}$ de la sección i viene dada por,

$$C_{col} (T_{F,i-1} - T_{F,i}) = h_v A x (T_{F,i-1} - T_{lecho,i}) \quad T_{F,i} = T_{F,i-1} - \frac{h_v A x}{C_{col}} (T_{F,i-1} - T_{lecho,i})$$

lo que implica que en la elección de x hay que tomar un valor lo suficientemente pequeño para que se cumpla la condición impuesta a las capacidades térmicas, $\frac{h_v A x}{C_{col}} < 1$

Las ecuaciones anteriores configuran dos sistemas de N ecuaciones para las N temperaturas desconocidas del lecho y para las N temperaturas también desconocidas del fluido.

Cuando se está extrayendo energía del lecho, se puede obtener un sistema de ecuaciones similar. Hay que tener en cuenta que la velocidad del fluido desde el colector puede que no sea igual a la de la carga, así como que el valor de h_v para el calentamiento del lecho puede no ser el mismo que en el enfriamiento.

Cuando el coeficiente volumétrico de transferencia de calor es grande, pero el número de Biot es todavía inferior a 0,1, la diferencia de temperaturas entre el lecho y el fluido se hace pequeña. La temperatura del fluido $T_{F,i}$ a la salida de una sección será entonces igual a la temperatura del fluido local del lecho $T_{lecho,i}$. Las ecuaciones anteriores se pueden combinar en la forma,

$$(c A x)_{lecho} \frac{dT_{lecho,i}}{dt} = C_{col} (T_{lecho,i-1} - T_{lecho,i}) - Q_{(pérdidas)_i}$$

que representa un sistema de N ecuaciones para las N temperaturas del lecho y del fluido desconocidas.

V.5.- CAMBIO DE FASE EN EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

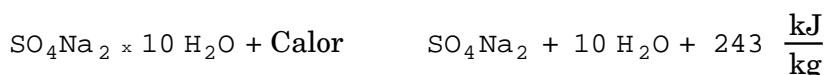
Los materiales que experimentan cambio de fase dentro de un determinado campo de temperaturas, pueden resultar útiles para el almacenamiento de energía si se satisfacen algunos criterios, como que el cambio de fase tiene que ir acompañado por un elevado efecto del calor latente.

El cambio de fase se tiene que producir,

- a) Con un superenfriamiento limitado
- b) Tiene que haber medios disponibles para contener el material y transferir el calor hacia y desde él
- c) El coste del material y de los contenedores tiene que ser razonable

Si se cumplen estos criterios, los sistemas de almacenamiento de energía con cambio de fase pueden llegar a tener unas capacidades de almacenamiento de energía interesantes funcionando dentro de pequeños intervalos de temperatura, con importantes reducciones de peso y volumen.

Una de las primeras unidades de almacenamiento de cambio de fase, que se estudiaron experimentalmente, para aplicaciones en calefacción de edificios fue el compuesto ($SO_4 Na_2 \times 10 H_2O$), que se descompone a unos $32^\circ C$ con un calor latente de fusión de 243 kJ/kg ; la reacción es,



La energía total añadida depende del campo de temperaturas dentro del cual se calienta el material, puesto que admite calor sensible (precalentamiento) para calentar la sal hasta la temperatura de transición, calor latente (fusión) para provocar el cambio de fase y calor sensible (sobrecalentamiento) para calentar el $SO_4 Na_2$ y la solución hasta la temperatura definitiva.

La extracción de energía del almacenamiento es un proceso inverso y la reacción se produce de derecha a izquierda, invirtiéndose los efectos térmicos.

Este sistema plantea una dificultad práctica, que consiste en la disminución del COP cuando se repiten los ciclos, con la consiguiente reducción de la capacidad térmica del sistema; ésto es debido a que por encima del punto de fusión del $(\text{SO}_4 \text{Na}_2 \times 10 \text{H}_2\text{O})$ a medida que su temperatura en el sobrecalentamiento aumenta, las fases líquida (solución) y sólida (sal) del $\text{SO}_4 \text{Na}_2$ se separan, y como la densidad de la sal es más alta que la densidad de la solución, se puede llegar a producir una separación de fases, hecho que no interesa y que hay que evitar.

Una posibilidad que tiende a soslayar este problema, está basada en utilizar materiales con un adecuado punto de fusión; la transición del hielo a agua constituye un buen ejemplo que ha sido muy utilizado como almacenamiento de energía durante siglos; actualmente se consideran las parafinas como posibles medios de almacenamiento de energía.

Los compuestos con puntos de fusión congruentes como el $\{\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}\}$ funden de igual manera que las sustancias puras; también se están considerando eutécticos como los indicados en la Tabla V.1.

Otras consideraciones relativas a los materiales de almacenamiento con cambio de fase, tratan sobre la posibilidad del sobreenfriamiento en la recogida de energía; si la materia se sobreenfría puede que no se recobre el calor latente de la fusión o que se pueda recobrar a una temperatura significativa por debajo del punto de fusión. Este problema se ha estudiado desde tres puntos de vista, mediante

- Una selección de materiales que no tienen una tendencia fuerte al sobreenfriamiento
- La adición de agentes nucleantes
- Medios ultrasónicos de nucleación

Tabla V.1.- Mezclas eutécticas de interés para el almacenamiento de energía térmica

Composición	Punto de Fusión °C	Calor latente Kcal/kg
$\text{Cl}_2 \text{Ca} + \text{Cl}_2 \text{Mg} + \text{H}_2\text{O}$ (41-10-49)	25	41,7
$(\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}) + (\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \times 9 \text{H}_2\text{O})$ (53-47)	61	35,4
Ácido acetamida-esteárico (17-33)	65	52
Urea- $\text{NO}_3 \text{NH}_4$ (45,3-54,7)	46	41
$\text{SO}_4 \text{Na}_2 + 10 \text{H}_2\text{O}$	32,5	60,5
$\text{LiNO}_3 + 3 \text{H}_2\text{O}$	30	70,7
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	130	
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	90	38,2

Con estas consideraciones, la viscosidad de un material en el punto de fusión es un factor principal a la hora de determinar la capacidad de formación del cristal en la fusión y, por lo tanto, su tendencia al sobreenfriamiento.

El fluido que transfiere calor (generalmente el aire) se hace circular sobre los recipientes como en lecho de rocas, por lo que el problema de transferencia de calor por el exterior de los recipientes, es parecido al de un lecho de rocas.

Internamente se pueden considerar dos fenómenos adicionales:

- a) El calor latente, que aporta una gran cantidad de calor específico en un rango muy pequeño de temperaturas

b) La resistencia térmica a la transferencia de calor dentro del material, que es variable con el grado de solidificación si se produce un calentamiento o un enfriamiento del material.

A medida que se extrae calor de un material con cambio de fase, se produce una cristalización en las paredes del recipiente; cuando el material solidificado se va calentando, la fusión se produce primero en las paredes y luego se va adentrando hacia el interior del material.

Hay que tener en cuenta otros factores prácticos, como la corrosión, pérdidas térmicas laterales, presión de vapor, toxicidad y coste.

V.6.- CAPACIDAD DE LOS MEDIOS DE ALMACENAMIENTO

No se pueden hacer comparaciones entre los medios de almacenamiento sin considerar un proceso solar total, incluyendo las características de los colectores solares asociados, cargas sobre el proceso, ciclos meteorológicos más probables, costes y muchos otros factores. En la Tabla V.2 se muestran algunos datos referentes a las propiedades de los posibles medios de almacenamiento útiles, que no resultan suficientes por sí mismos para poder apreciar las propiedades relativas de los medios, pero sí dan una indicación de sus capacidades, pesos y volúmenes necesarios para el almacenamiento de una cantidad dada de energía para cualquier rango de temperaturas; estos datos pueden sacarse de manuales standard.

Los datos presentados en la tabla son de medios que podrían utilizarse en aplicaciones para el calentamiento y el enfriamiento de edificios; se aplican consideraciones idénticas en el almacenamiento de energía a altas temperaturas. El rango de temperatura puede variar desde 90°C hasta 150°C (almacenamiento para un proceso de acondicionamiento de aire), llegando hasta valores de 800°C a 1000°C (en una aplicación de un motor térmico).

Los principales factores que determinan la capacidad óptima de los sistemas de almacenamiento para edificios son,

a) El coste de la unidad de almacenamiento, que incluye,

- El coste de los recipientes

- El medio de almacenamiento

- El lugar donde se sitúa

- El coste de funcionamiento de la unidad de almacenamiento (costes de desplazamiento del medio que transfiere calor).

b) El efecto que la capacidad de almacenamiento tenga sobre el funcionamiento del resto del sistema y sobre todo sobre el colector.

Una unidad de almacenamiento más pequeña, funcionando a una temperatura media más alta, puede llegar a producir pérdidas grandes a la salida del colector, en comparación con sistemas parecidos con unidades de almacenamiento grandes, matizando el hecho de que el almacenamiento *a corto plazo* para cubrir cargas para períodos de unos cuantos días, puede resultar el más económico para aplicaciones en la construcción.

c) Hay que considerar que las pérdidas térmicas de la unidad de almacenamiento dependen de la diferencia de temperaturas entre el medio de almacenamiento y el ambiente; la transferencia total de energía es

también función de su tiempo de almacenamiento.

Si se considera el almacenamiento de energía durante períodos largos, las pérdidas térmicas pueden ser importantes, llegándose a la conclusión de que para calefacción de casas, el almacenamiento durante largos períodos parece no ser muy viable económicamente.

Tabla V.2.-Calor específico y densidad para medios de almacenamiento de energía, dentro del rango de temperaturas de funcionamiento de colectores de placa plana.

Material	Cp kJ/kg°C	Densidad Kg/m ³
Agua (líquida)	4,19	1000
(hielo)	2,2	
Piedras	0,84	2500 a 3500
Ferralla (Virutas de hierro)	0,5	7860
SO ₄ Na ₂ × 10 H ₂ O (solución)		1460
SO ₄ Na ₂	0,92	2700
CO ₃ Ca	0,96	2900
Al ₂ O ₃	1	4000
Alumbre a granel	0,96	2700
Hormigón	1,13	2240
Ladrillos	0,84	2240

Hay que recalcar que en algunas operaciones, sobre todo en calefacción de viviendas, la unidad de almacenamiento se puede situar dentro del espacio al cual va a aplicarse calor; en estas condiciones, las pérdidas de la unidad al ambiente no se pueden considerar como tales, ya que se trata de una transferencia de energía incontrolada desde el almacenamiento al espacio a calentar. La situación puede resultar crítica en los sistemas de refrigeración de viviendas, si las pérdidas térmicas del almacenamiento se añaden a la carga de enfriamiento.

MÉTODOS ALTERNATIVOS DE ALMACENAMIENTO.- Se pueden considerar otras formas de almacenamiento de energía para aplicaciones específicas, como,

a) La conversión de energía mecánica en potencial y recobrar la energía potencial cuando se desee; de esta forma se tiene un almacenamiento energético para sistemas mecánicos. Estos sistemas pueden bombear agua a una reserva elevada durante los períodos en que existe radiación solar disponible y recobrar la energía haciendo circular el agua a través de una turbina cuando hiciese falta la energía.

Este método añade dos ineficiencias al sistema total, como son la bomba y la turbina, siendo la eficiencia del sistema de almacenamiento el producto de las dos.

b) Se pueden concebir procesos en los que la radiación solar produzca una descomposición fotoquímica; un ejemplo de esto es la composición fotoquímica del, NOCl, de la forma,



pudiéndose llevar a cabo la reacción inversa para recobrar la energía de los fotones que entran en la reacción.

En este caso, el almacenamiento en el sistema sería debido a los productos químicos y la unidad de almacenamiento consistiría en recipientes para cada uno de los productos.

c) Los productos que generan energía eléctrica a partir de energía química, la pueden almacenar en baterías eléctricas; se pueden considerar varios tipos de baterías o sistemas de almacenamiento de células energéticas que incluyen baterías de plomo, níquel-hierro y níquel-cadmio.

Las eficiencias de estos sistemas varían del 60% al 80%, para cifras de descarga bajas y cifras de carga moderadas; también es posible descomponer electrolíticamente el agua con energía eléctrica generada mediante técnicas solares, almacenando oxígeno e hidrógeno y volverse a combinar en una célula energética para recuperar la energía eléctrica.

Estos sistemas de almacenamiento tienen como característica principal un coste elevado por (kW/hora) almacenado y se pueden aplicar a situaciones de baja capacidad, como el suministro de potencia auxiliar para vehículos espaciales, suministros de potencia para repetidores telefónicos aislados, suministros de potencia para instrumentación, etc.

La cuestión del almacenamiento de energía no se puede separar completamente de la de utilización del suministro de energía auxiliar; para determinar el tamaño óptimo del colector y de la unidad de almacenamiento en una aplicación concreta, se puede realizar un análisis del COP de los sistemas, costes del equipo solar y costes de la energía auxiliar (convencional) y así hallar las cantidades relativas tanto de energía solar, como de energía auxiliar, que se deben suministrar.