



## ACUMULACION SOLAR TERMICA DE ENERGIA

Cora Placco, Luis Saravia  
INENCO, UNSa –CONICET  
Salta

### INTRODUCCION

El sol es nuestra principal fuente de energía renovable, pero el sol no brilla todo el tiempo, debido a las condiciones meteorológicas del lugar (heliofanía) o a los movimientos de rotación y traslación terrestres.

Esta fuente de energía es intermitente y por lo general no coincide la demanda con la disponibilidad, ya que el mayor consumo de energía se observa por las noches, en ausencia de radiación solar. Si deseamos utilizar la energía renovable a gran escala, para sustituir los combustibles fósiles o la energía nuclear, es necesario incluir, en los procesos de conversión fototérmica, algún tipo de sistema de almacenamiento de energía. De esta manera el exceso de energía térmica producida durante el día se almacena para su uso posterior durante la noche o para proporcionar energía durante los días nublados (Figura 1).



Figura 1: Almacenamiento de energía térmica en un día

Muchas veces, aún contando con sistemas de almacenamiento, las demandas no pueden ser satisfechas y por lo tanto es necesario utilizar fuentes auxiliares de energía convencional, a estos tipos de sistemas se los denomina híbridos o mixtos.

En el pasado, ha habido mucho énfasis puesto en la adaptación de las turbinas de alta temperatura de combustible fósil a la energía solar, con una capacidad de utilizar el combustible fósil como energía de reserva, para acompañar la demanda. Sin embargo, recientemente, ha habido un cambio en el interés de aumentar la fracción solar o de tener plantas solares del 100% debido a los incentivos terminantes que se han instalado en países como España, y Alemania

El diseño óptimo del sistema de turbina y la unidad de acumulación para una planta solar pura puede ser muy diferente de la que se diseña para un híbrido de solar/fósil. Tal unidad funcionaría en una temperatura más baja para reducir al mínimo las pérdidas térmicas, esto implica que la tecnología del colector debe ser de un costo muy bajo para ser rentable con una turbina que trabaje a una temperatura más baja y que posea una eficacia limitada, y también se necesitará un sistema de almacenamiento barato que permita la utilización completa de la turbina de día y de noche.

La disponibilidad de sistemas de almacenamiento es un elemento clave elemento para la mayor penetración en el mercado de las plantas de energía solares térmicas.

### FORMAS DE ACUMULACION DE ENERGIA

Los sistemas de acumulación térmica, pueden ser clasificados según diferentes aspectos. Desde el punto de vista de la temperatura, pueden ser sistemas de Alta o Baja Temperatura. También pueden clasificarse como Sistemas Activos o Pasivos; o hablar de almacenamiento térmico por Calor Sensible o por Cambio de Fase.

En los sistemas de energía solar, la energía térmica puede ser almacenada como calor sensible (involucra un cambio de temperatura) o como calor latente (involucra un cambio de fase). Existen otras formas de almacenar energía mediante procesos donde ocurre una reacción química irreversible, pero este tipo de almacenamiento no será tratado en el presente informe.

### Almacenamiento de Calor Sensible

El almacenamiento de calor Sensible para la producción de energía es tal vez, conceptualmente, la forma más simple de almacenar energía térmica.

En su configuración más simple, el líquido frío contenido en un tanque aislado se calienta a altas temperaturas con los fluidos calientes provenientes del campo de colectores solares, como se muestra en la Figura 2.

En la mayoría de los sistemas industriales de energía solar, el líquido en los colectores y en los tanques de almacenamiento es el mismo. Este concepto es bastante similar a la forma en que trabajan, los sistemas solares de agua caliente de uso residencial.

En cambio, cuando se acumula mediante calor latente, el fluido que circula por los colectores es diferente al existente en los tanques de almacenamiento, que sufre un cambio de fase, por ello es necesaria la existencia de un intercambiador de calor entre ambos fluidos.

#### ↗ Almacenamiento Multi-Tanques

En los sistemas ilustrados en la Figura 2, el fluido almacenado está a una temperatura promedio entre la inicial que posee el tanque de acumulación y temperatura elevada del fluido proveniente de los colectores; esto representa un problema cuando la cantidad de energía térmica proveniente de los colectores es insuficiente (por ej. en días parcialmente nublados), debido a que la temperatura de acumulación será muy baja. Para evitar este problema se utilizan sistemas de almacenamiento con dos o más tanques de acumulación como se muestra en la Figura 3.

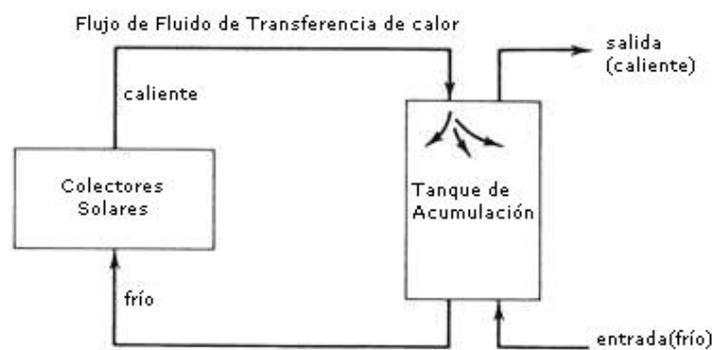


Figura 2: Almacenamiento de calor Sensible en un solo tanque.

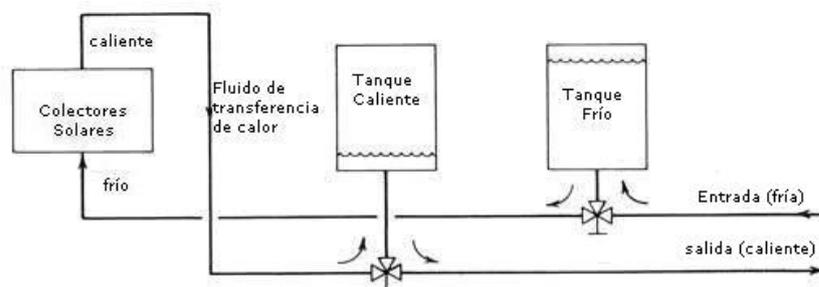


Figura 3: Sistema de acumulación con dos tanques

#### ↗ Almacenamiento de Energía Termoclina

En este tipo de sistemas, los fluidos calientes y fríos ocupan el mismo tanque, obteniendo una reducción en el volumen de almacenamiento. Conceptualmente, el funcionamiento de un sistema de almacenamiento de calor Termoclina se ilustra en la Figura 5.

Al inicio de operación, el tanque de almacenamiento está lleno de fluido frío, este líquido se retira de la parte inferior del tanque y es calentado en los colectores solares. El líquido, ahora caliente, es introducido al tanque de almacenamiento por su parte superior. Como el fluido caliente es menos denso,

estos quedarán “flotando” en la parte superior del tanque, sobre el fluido frío, creando lo que se denomina termoclina. Este fenómeno, es bastante común en muchos sistemas de fluidos que van desde el océano al agua caliente para uso residencial.

Este tipo de sistema de almacenamiento ha recibido mucha atención debido a su bajo costo, proveniente de la reducción del volumen de almacenaje.

Uno de los parámetros más importantes en el diseño de un sistema de almacenamiento termoclina es el difusor utilizado a la entrada del fluido, ya que este debe reducir al mínimo la mezcla para impedir la formación de vórtices o de chorros de la entrada de líquido.

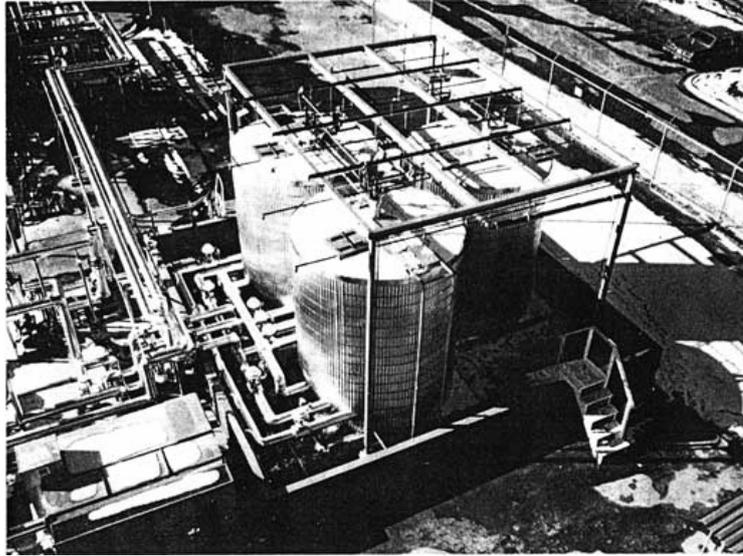


Figura 4: Sistema de Almacenamiento de Calor Sensible en tres tanques instalado en Sandia National Laboratories, Albuquerque.(EE.UU)

#### ☞ **Sistemas Mixtos de Almacenamiento Termoclina**

Los aceites orgánicos se utilizan normalmente como fluido de transferencia en sistemas de energía solar de alta temperatura, de esta forma se evitan los altos costos de las cañerías de alta presión, pero, la mayoría de los aceites orgánicos utilizados para transferencia de calor, son muy caros.

Los sistemas Mixtos de Almacenamiento Termoclina tratan de desplazar los costosos fluidos de transferencia derivados del petróleo, por materiales menos costosos para el almacenamiento, como por ejemplo, la piedra. De esta forma la cantidad de aceite a ser utilizado como fluido de transferencia en el sistema se reduce un 75% y el medio de acumulación es la arena, piedra o grava. Las rocas llegan hasta 300 °C de temperatura.

#### ☞ **Almacenamiento de Calor Sensible de Alta Temperatura**

La capacidad de almacenar energía térmica a altas temperaturas está limitada por la disponibilidad de fluidos de transferencia térmica. Por encima de los 400 ° C, la mayoría de los fluidos orgánicos de transferencia de calor tienden a descomponerse. Para la generación de energía eléctrica y otras las aplicaciones a altas temperaturas, deben utilizarse fluidos, tales como las sales fundidas, metales líquidos, y el aire.

El sistema de almacenamiento de calor sensible que emplea sales fundidas ha sido probado en Sandia National Laboratories, pero actualmente no se comercializan.

Para almacenar energía térmica utilizando aire a alta temperatura, suelen utilizarse sistemas que poseen materiales sólidos inertes, como la roca. Estos sistemas de almacenamiento son conceptualmente similares a los utilizados en sistemas de energía solar residenciales.

La Figura 6 ilustra un diseño de un sistema de almacenamiento de Calor Sensible de Alta Temperatura que utiliza helio (He) en lugar de aire. Las corrientes de gas caliente fluyen a través de ladrillos de óxido de magnesio (MgO), estos ladrillos almacenan el calor. El gas helio se utiliza comúnmente en lugar de aire, debido a que el aire posee características muy pobres respecto a la transferencia de calor. Un sistema de almacenamiento como el que se ilustra en la Figura 6 sería compatible con un motor de ciclo Brayton que use gas helio.

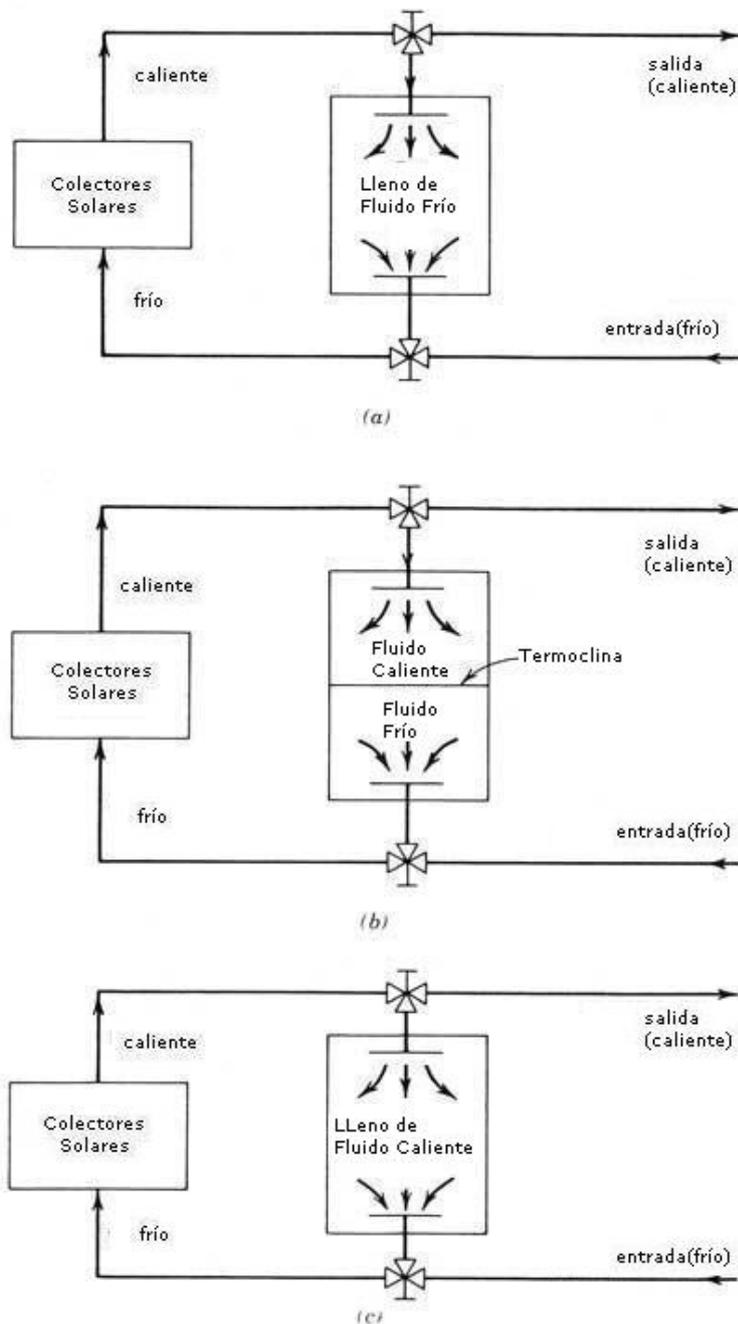


Figura 5: Operación de Almacenamiento de Calor Sensible Termoclina.

a) Inicio      b) Medio Día      c) Final del Día

#### ⇒ Fluidos a Presión (vapor o agua)

El costo de la mayor parte de los sistemas de almacenamiento de energía térmica se ve fuertemente influido por el precio del líquido de almacenamiento. Los fluidos orgánicos para transferencia de calor suelen ser bastante caros. Los sistemas mixtos de almacenamiento, representan un intento de reducir estos costos. El uso de agua o vapor como medio de almacenamiento representa otra forma de reducir los costos del fluido.

El uso del agua o vapor como líquido de almacenamiento es muy utilizado en sistemas solares térmicos que generan electricidad mediante un sistema de vapor. Estos sistemas almacenan líquido a presión y temperatura de cambio de fase; cuando se abre la válvula, se genera el vapor que se utiliza para mover la turbina. Aunque las ventajas son importantes, hay que tener en cuenta el costo elevado del tanque de almacenamiento presurizado (por ejemplo, para acumular agua saturada a  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  es necesaria una presión de aproximadamente  $8,8\text{ MPa}$ .)

Desarrollos recientes, utilizando hierro fundido pre-tensado para la construcción de los tanques, han mostrado cierta promesa de proporcionar grandes reservorios, de bajo costo para el almacenamiento de agua y vapor a presión. Estos tanques se pueden construir en grandes cantidades y soportan temperaturas hasta los 400 °C.

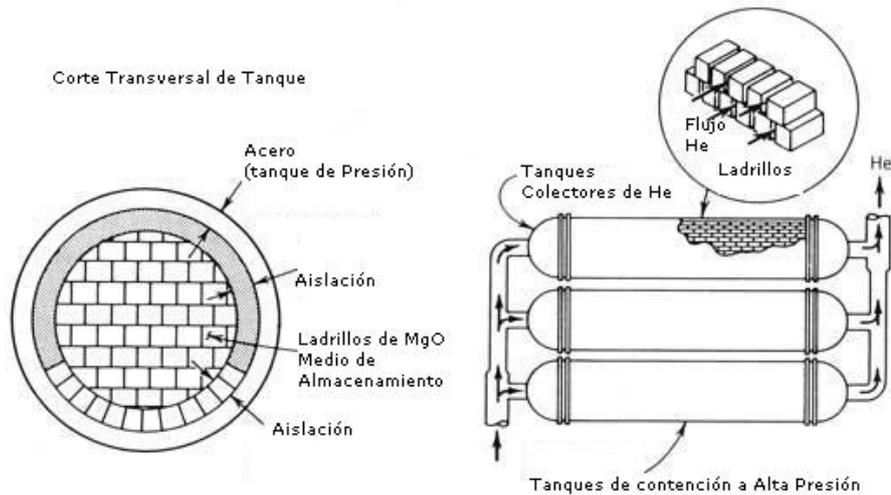


Figura 6: Almacenamiento de Calor Sensible de Alta Temperatura, usando Helio como fluido de transferencia

### Almacenamiento de Calor Latente

La mayoría de los materiales poseen una baja capacidad para almacenar calor. Incluso el agua, cuya capacidad calorífica es de 4.186 kJ/k K no es un medio de acumulación que posea una gran densidad de energía. Los fluidos más utilizados para almacenamiento de calor son los aceites orgánicos que poseen una capacidad calorífica de 0.5 a 0.7 veces mayor que el agua. En comparación, los procesos con Calor Latente, pueden proporcionar una mayor densidad de energía de almacenamiento. Los sistemas de almacenamiento de Calor Latente siempre involucran un cambio de fase de la sustancia que se utiliza como medio de acumulación. Por ejemplo, un proceso de calor latente, considera la fusión de hidróxido de sodio (NaOH). El calor latente de fusión del NaOH es 156 kJ / kg. Esto significa que cuando 1 kg de NaOH se derrite, 156 kJ de energía térmica es absorbida. Por lo tanto, los mecanismos de almacenamiento térmico que utilizan calor latente, tienen como objeto aumentar la densidad de energía de almacenamiento y, de esta forma reducir los costos, disminuyendo el tamaño del tanque de almacenamiento.

Dado que el material de almacenamiento es sometido a una transición de líquido a sólido y viceversa, este componente no puede ser bombeado a través del campo de colectores; esto se traduce en la necesidad de incluir un intercambiador de calor dentro del sistema de almacenamiento. Además, como el medio de almacenamiento sufre un cambio de fase, los intercambiadores de calor deben ser cuidadosamente diseñados teniendo en cuenta la baja difusividad térmica del material sólido. Este requisito se traduce en un aumento de los costos del sistema en comparación con los sistemas que utilizan almacenamiento de calor sensible.

## ESTADO DEL ARTE A NIVEL INTERNACIONAL

### Sistemas de Almacenamiento en Dos Tanques

Este sistema de almacenamiento utiliza como fluido de transferencia y acumulación aceite mineral (Caloría). El mismo ha sido probado por muchos años y sigue siendo utilizado en la planta de CCP de California SEGS II, el sistema opera con temperaturas inferiores a los 304°C. El almacenamiento en aceite en plantas de CCP con ciclo Ranking fue examinado en un informe reciente de NREL, el mismo indica que el costo de almacenamiento térmico usando aceite mineral en sistemas de dos tanques se acerca a los U\$S 14/kWh. [8, 14]

### Sistemas de Almacenamiento DISTOR (Energy Storage for Direct Steam Solar Power Plants) [3,4]

El objetivo de este proyecto es desarrollar un nuevo sistema de almacenamiento de energía térmica que sea competitivo y resulte adecuado para plantas termosolares que produzcan vapor directamente en los tubos absorbentes de colectores cilindro parabólicos (proceso conocido como Generación Directa de Vapor, GDV).

El sistema de almacenamiento en desarrollo está basado en materiales con cambio de fase, de modo que la carga del sistema de almacenamiento se efectúa a temperatura constante, mediante la fusión del medio de

almacenamiento a partir del vapor producido por los colectores solares; de este modo el vapor se condensa y el medio de almacenamiento se funde. De modo análogo, la descarga del sistema de almacenamiento se efectúa mediante la solidificación del medio de almacenamiento, que provoca la evaporación del agua de alimentación.

En DISTOR se utilizan materiales avanzados para el almacenamiento basados en el micro-encapsulamiento del material, transferencia de calor mediante reflujo y el uso de grafito expandido como medio conductor térmico.

El desarrollo del proyecto, que está por concluir el presente año, proporcionará los siguientes beneficios y resultados:

- Desarrollo de materiales avanzados basados en cambio de fase y adaptados a la generación/condensación de vapor en el rango de temperaturas de 200 a 300 °C.
- Desarrollo de modelos de simulación para sistemas de cambio de fase.
- Evaluación de un prototipo de sistema de almacenamiento avanzado mediante cambio de fase con una potencia nominal de 100 kW, bajo condiciones solares reales. Esto se llevará a cabo conectando dicho prototipo a una planta experimental existente en la PSA (Plataforma Solar Almería).
- Identificación de un diseño de sistema de almacenamiento apto para ser escalado y con el potencial de alcanzar un coste específico de 20 €/por kWt de capacidad.

El proyecto DISTOR es un proyecto de ámbito europeo que cuenta con el apoyo financiero de la Comisión Europea y en el cuál participan más de 10 empresas.

### Almacenamiento en Sales Fundidas

Los Proyecto **Andasol 1 y 2**, y **Extresol 1** de 50 MWe de potencia, cada uno, introducen el almacenamiento térmico en sales fundidas en plantas de concentradores cilíndricos parabólicos que utilizan aceite como fluido térmico de transferencia.

Como se muestra en la Figura 7 el sistema de almacenamiento térmico, de estas plantas, consta de 2 tanques de sales fundidas de sodio y potasio (60%  $\text{NaNO}_3$ +40% $\text{KNO}_3$ ). La temperatura de fusión de estas sales es de 221°C y el rango de temperatura de trabajo es de 291°C a 384°C. Debido a que el fluido que proviene del campo de colectores cilindro parabólicos (CCP) es aceite orgánico, existe un intercambiador de calor entre el fluido térmico y estas sales fundidas.

La capacidad de almacenamiento que poseen estas plantas es de 7,5 hs. a su potencia nominal de 50MW.

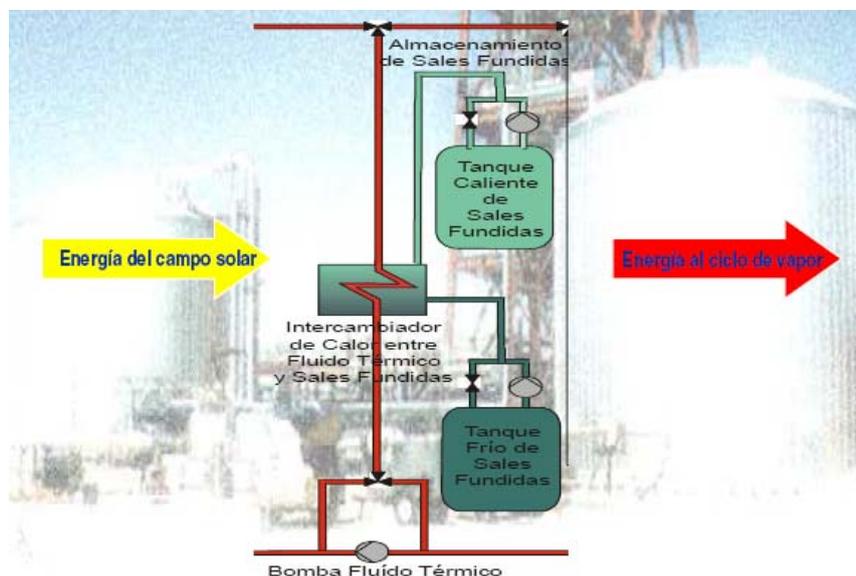


Figura 7: Gráfico del sistema de acumulación en Sales Fundidas en Plantas CCP

Con el mismo medio de almacenamiento en Sales Fundidas, se espera que entre en operación, a principios del 2009, la Planta **Solar Tres**. Esta planta es una planta de demostración a escala comercial de generación eléctrica de 17 MW de potencia nominal. Solar Tres es una planta de receptor central y campo de heliostatos con un sistema de acumulación en Sales Fundidas.

En este caso, como se muestra la figura 8, el fluido de transferencia térmico es el mismo fluido de almacenamiento (sales fundidas). Las sales fundidas circulan a través de tubos en el receptor, recogiendo la energía del sol y luego, se dirigen a un tanque de almacenamiento térmico aislado, donde la energía se puede almacenar con un mínimo de pérdidas. Para generar electricidad, las sales fundidas calientes se dirigen a un intercambiador de calor (o generador de vapor) y se usan para producir vapor a alta presión y temperatura. El

vapor se utiliza para mover una turbina de vapor convencional y generar electricidad. Después de salir del generador de vapor, las sales fundidas frías se envían al tanque de almacenamiento térmico y el ciclo se repite.

Esta Planta posee una capacidad de acumulación de 15 hs. a potencia nominal.

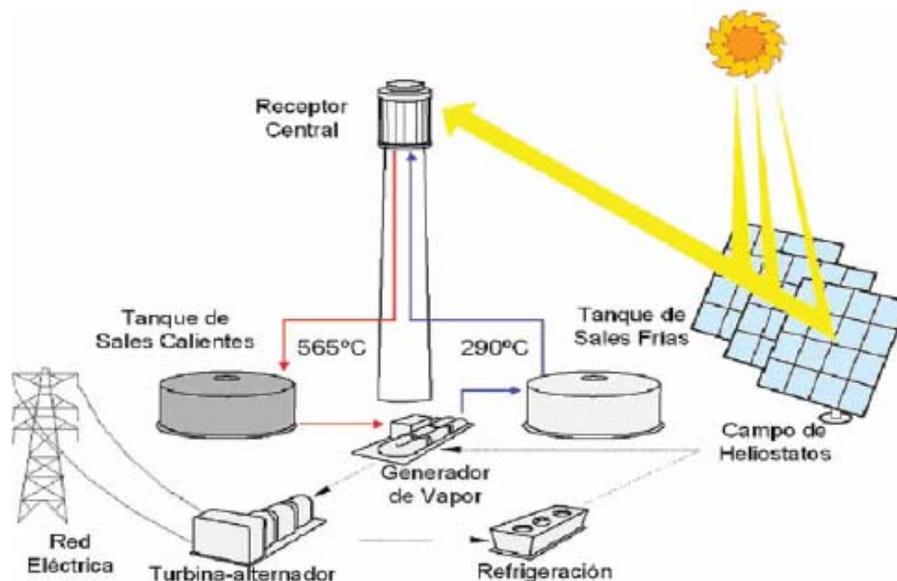


Figura 8: Sistema de funcionamiento Planta Solar Tres [5]

### Sistema de Almacenamiento en Agua Saturada

**PS10** es una planta termosolar de concentración, de 11 MWe de potencia, basada en la tecnología de torre central y campo de heliostatos que trabaja según el concepto de generación directa de vapor saturado, a temperatura y presión relativamente bajas (250 °C, y 40 bar respectivamente). Esta planta posee un pequeño sistema de almacenamiento térmico que le permite a la planta disponer de una pequeña capacidad de energía para seguir funcionando en periodos nublados transitorio. La capacidad del mismo es de 20MWh (operando al 50%), lo que significan 50 minutos de almacenamiento. El esquema de funcionamiento de la planta puede visualizarse en la figura 9 [6].

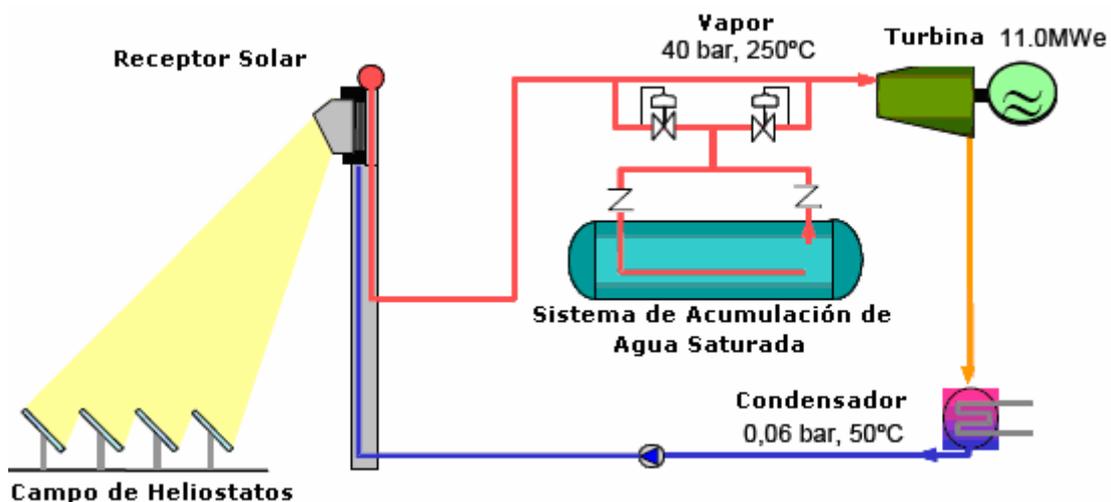


Figura 9: Sistema de funcionamiento Planta PS10

### Almacenamiento en Cerámica

El proyecto **CESA-I** en la Plataforma Solar Almería, data del año 1983, en la actualidad ya no produce electricidad, sino que se opera, con un alto grado de flexibilidad, como una instalación de ensayo de componentes y subsistemas como heliostatos, receptores solares, sistemas de almacenamiento térmico y control.

Esta es una planta de torre central y campo de helióstato que proporciona 7MWe posee un sistema de almacenamiento térmico que consiste en un lecho de bolas cerámicas ( $Al_2O_3$ ) dentro de un tanque cilíndrico aislado y alcanza una capacidad de almacenamiento de 1000 kWh. [4]

### Almacenamiento en Concreto (Hormigón) y Cerámica

Estas unidades de almacenamiento están constituidas por tubos de acero de alta temperatura insertos en bloques de hormigón o cerámica. Los tubos actúan como intercambiadores de calor y se encuentran distribuidos uniformemente en los bloques de material (Figura 10).

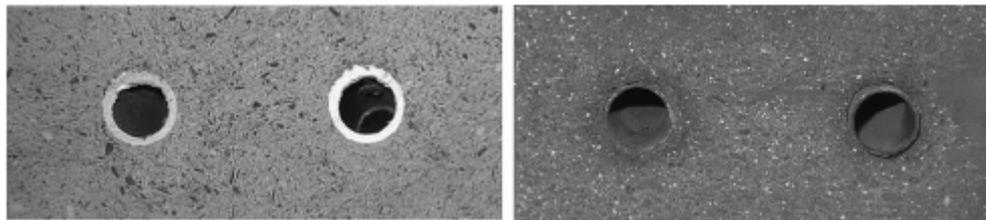


Figura 10: Corte transversal de las unidades de almacenamiento. A la izquierda, en concreto y a la derecha, en cerámica

El Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y el CIEMAT, probaron estos sistemas de almacenamiento en la Plataforma Solar de Almería (PSA) en España, integrados a un campo de colectores cilíndrico parabólicos que utilizan como fluido de transferencia aceite. (Figura 11) Las unidades de almacenamiento fueron diseñadas con una capacidad de 350 kWh y se han alcanzado temperaturas de almacenamiento de 325 °C [7].

Los estudios realizados demostraron que para altas temperaturas la acumulación en hormigón es preferible a la cerámica, debido a su menor costo, mayor resistencia del material, y manejo más fácil. Además no se observaron indicios de degradación entre el intercambiador de calor de las tuberías y el material de almacenamiento.[8]

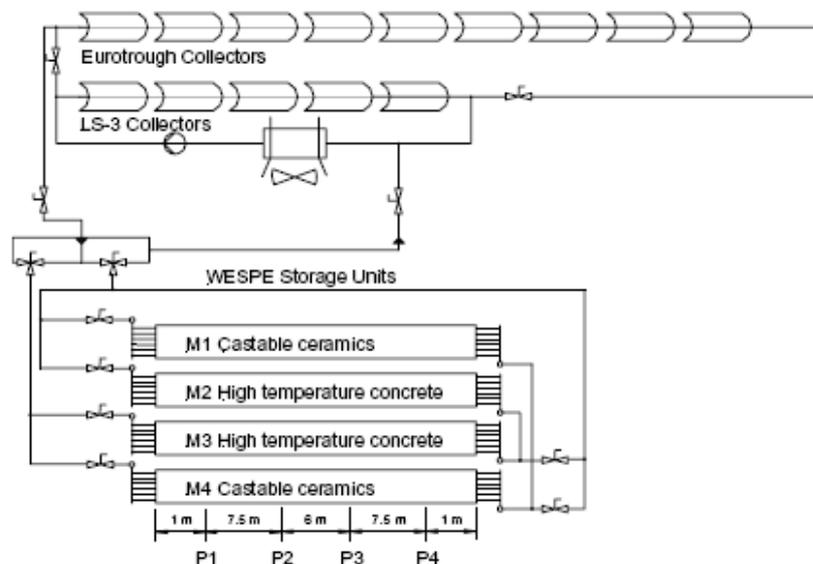


Figura 11: La integración de módulos de almacenamiento al campo de colectores CCP en PSA

Estimaciones preliminares de costos para este tipo de almacenamiento en sistemas a escala comercial muestran que los costos de inversión son de menos de 20 €/kW h

### Almacenamiento subterráneo de energía térmica (Underground Thermal Energy Storage – UTE) [9, 10, 11]

Estos sistemas también son conocidos como **Almacenamiento en Cavernas**, e implica el almacenaje del agua bajo presión en depósitos de metal en cavernas profundas. Este método fue estudiado a principio de los años 80 y es el método más barato de almacenamiento para sistemas grandes. Más recientemente, en el 2003 se realizó un estudio para la utilización del almacenamiento en cavernas aplicado a sistemas CFLR (Reflectores Fresnel Lineal compacto). Este estudio investigó los costos actuales de una caverna alineada de acero a profundidades de 200m y 400m e indica que el almacenaje en cavernas es mucho más barato que otros métodos propuestos actualmente para acumulación de energía.

Otra ventaja de estos sistemas es que no hay intercambiadores de calor. El vapor de agua se almacena a presión en la caverna y desde allí se inyecta en la turbina.

El almacenamiento en cavernas no puede realizarse con temperaturas superiores a los 360°C, su concepto es muy simple y se ha demostrado que este es un medio ideal para el almacenamiento de calor en grandes cantidades y durante largos períodos de tiempo a muy bajo costo.

Geólogos y compañías de explotación minera sugieren que el concepto puede ser aplicado extensamente y que las estructuras geológicas convenientes de la roca son comunes.

Las consecuencias para el medio ambiente de un accidente en el almacenaje en caverna serán mínimas, pues el medio de acumulación es el agua en contraposición con los derrames de aceites que son muy contaminantes.

Estos mismos sistemas de almacenamiento de calor en el rango de 10-40 ° C han sido muy probados y se utilizan para acondicionamiento térmico de edificios. De esta forma se equilibran las fluctuaciones de la energía térmica estacionales [13].

## COSTOS

En una publicación, sobre el diseño de una Central Solar Térmica pura de 240 MW, con una capacidad de almacenamiento térmico de 12 hs. (Mills, et.al.) [14], los autores realizan comparaciones de rendimiento y costo en relación a las temperaturas de funcionamiento de la central, llegando a la conclusión que la relación costo/rendimiento mejora cuando las temperaturas de funcionamiento más bajas. En este mismo artículo se realiza un análisis de los costos de almacenamiento que poseen los siguientes sistemas:

- Almacenamiento en dos tanques con Aceite y Sal fundida
- Almacenamiento Termoclina Directo con Sal HTF
- Almacenamiento en Cavernas (UTES)
- Almacenamiento en dos tanques con Aceite Mineral (Caloría)

Medio de Almacenamiento	\$/kWe
Dos Tanques. Aceite y Sal Fundida	958
Termoclina – Sal HTF a 450°C	425
En Cavernas a 300°C	92
Dos Tanques - Caloría	674

El almacenamiento en Cavernas no puede realizarse a temperaturas superiores a los 360 °C y aún hay alguna incertidumbre respecto a su desarrollo, pero el concepto es muy simple y varios informes lo han identificado como el sistema de almacenamiento de menor costo, además desde el punto de vista ambiental, este medio de almacenamiento es más seguro que otros que utilizan soluciones salinas o aceites.

## Bibliografía

- [1] "Power From The Sun." William B. Stine and Michael Geyer (2001) [www.powerfromthesun.net](http://www.powerfromthesun.net)
- [2] [www.quimica.urv.es](http://www.quimica.urv.es). Facultat de Química de Tarragona. Universitat Rovira i Virgili
- [3] [www.flagsol.com](http://www.flagsol.com)
- [4] [www.psa.es](http://www.psa.es)
- [5] [www.sener.es](http://www.sener.es)
- [6] [www.abengoa.es](http://www.abengoa.es)
- [7] Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. Solar Energy 80 (2006) 1283–1289
- [8] NREL National Renewable Energy Laboratory
- [9] High Temperature Underground Thermal Energy Storage. State-of-the-art and Prospects A review within ECES Annex 12 of the International Energy Agency IEA edited by Burkhard Sanner
- [10] Design of a 240 MWe Solar Thermal Power Plant - Mills - Eurosun 2004 Conference
- [11] Underground Thermal Energy Storage (UTES) - Burkhard Sanner -Institute of Applied Geosciences, Justus-Liebig-University. Diezstrasse 15, D-35390 Giessen, Germany
- [12] <http://www.iea-eces.org/energy-storage/storage-techniques>
- [13] Thermal Energy Storage - State-of-the-Art –A report within the research program. Smart Energy-Efficient Buildingsat NTNU and SINTEF 2002-2006. Principal author: Kai Nielsen,
- [14] LOWER TEMPERATURE APPROACH FOR VERY LARGE SOLAR POWER PLANTS D. Mills\*