



Almacenamiento térmico en plantas termosolares

José M^a Martínez-Val

Grupo de Investigaciones Termoenergéticas.
UPM-ETSII

FEE, 29 de Octubre, 2009

Gestión de la energía (electricidad)

- **Almacenamiento** energético
 - Eléctrico .
 - En origen: combustibles almacenables o térmico.
- **Hibridación** con otras fuentes (con garantía de suministro):
 - Directa (calor)
 - Eléctrica (a través de al Red)
- **Regulación legal desviada:**
 - Limita la hibridación directa (al 15% en gas, para solar).
 - Ignora que las renovables más desplegadas, Eólica y Fotovoltaica, se hibridan con las CGCC por la Red.

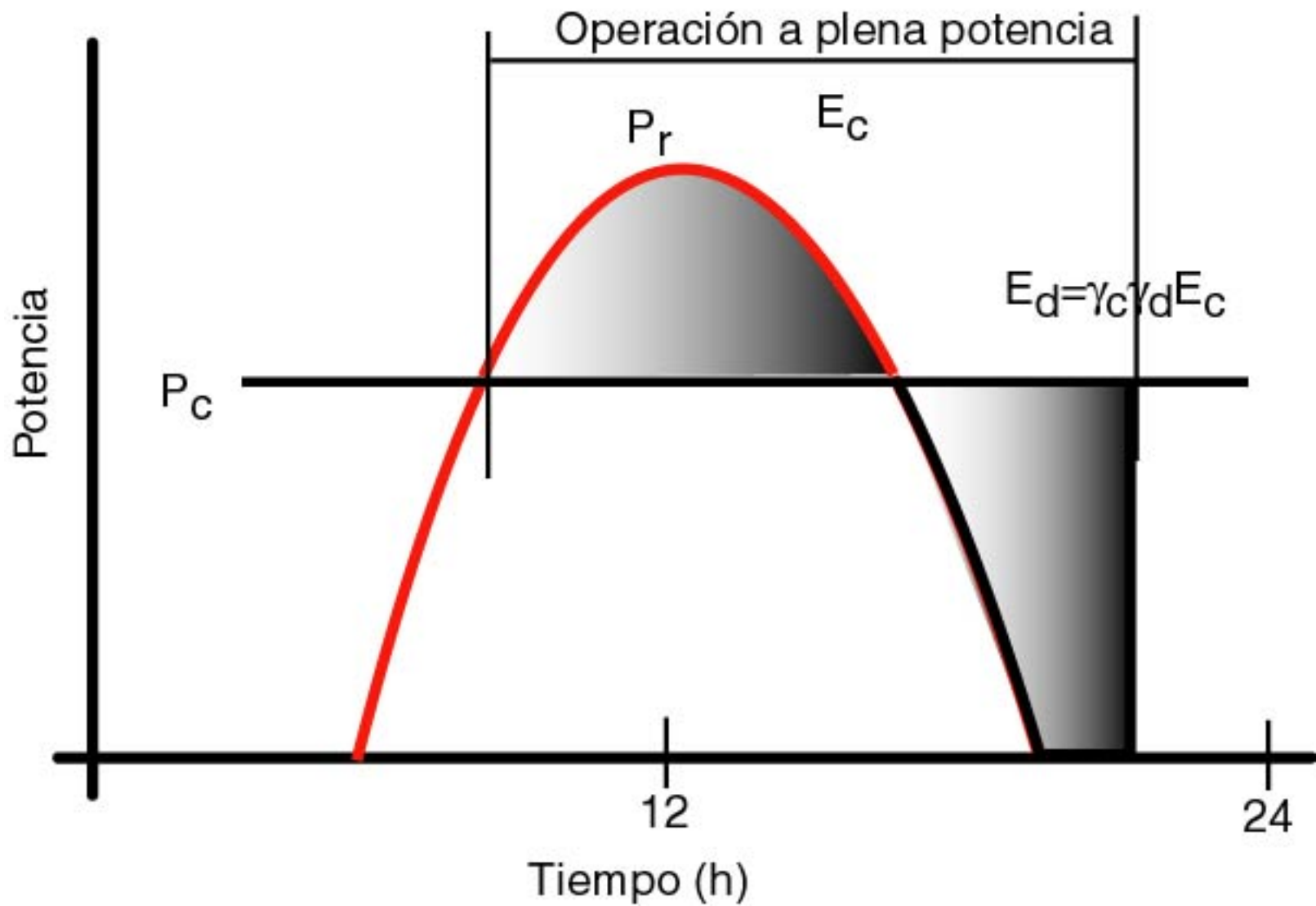
Alternativas posibles

- Almacenamiento térmico:
 - Calor sensible.
 - Calor latente.
- Almacenamiento químico:
 - Hidrógeno
 - Metanol
- Almacenamiento mecánico:
 - Volantes de inercia.
 - Aire comprimido.
 - Bombeo hidráulico.
- Almacenamiento electroquímico (baterías)

Aprovechamiento del recurso solar

- Existen una serie de **circunstancias operativas** relacionadas con el aprovechamiento del recurso solar:
 - **Recurso variable** en función del día y la hora en cada emplazamiento.
 - **Ausencia de recurso** durante al menos la mitad del tiempo disponible.
 - Indisponibilidad de recurso en periodos relativamente largos por **causas climatológicas** generales.
 - Disponibilidad de recursos transitoria por **perturbaciones a corto plazo** en días nublados o no claros.
 - **Demanda desacoplada** con la disponibilidad de recurso.
- Se hace deseable la **modulación** de todos estos efectos mediante la utilización de medios de almacenamiento que permitan:
 - **Gestionar la producción eléctrica**, adaptándola a la demanda, incluso más allá de los momentos en los que se dispone de recurso.
 - **Modular los transitorios** de operación de la planta.
 - **Optimizar** el funcionamiento del **bloque de potencia**.

Operación planta



Requisitos sistema de almacenamiento

- Alta densidad energética del medio de almacenamiento
- Buena tasa de transferencia térmica entre el fluido calorífero del campo solar y el medio de almacenamiento.
- Estabilidad mecánica y química del medio de almacenamiento.
- Reversibilidad completa para un gran número de ciclos de carga/descarga del proceso.
- Bajas pérdidas térmicas, energéticas y exergeticas.
- Facilidad de regulación y control.

Aplicación de sistemas de almacenamiento

- Complementar o sustituir a la irradiación solar en **transitorios** imprevistos durante las horas de insolación.
- **Prorrogar** el funcionamiento de la central posteriormente a las horas solares astronómicas
- Estos dos objetivos, aunque formalmente análogos, presentan requisitos técnicos muy diferentes:
 - En el **almacenamiento para prórroga**, se tendrá un proceso de carga gradual, que durará prácticamente las horas efectivas de alta insolación y un proceso de descarga a lo largo de las horas de prórroga
 - la velocidad de termo-transferencia o de respuesta en descarga, sobre todo, ha de ser mayor en el caso de un **almacenamiento para transitorio** con respecto al de prórroga, aunque no será necesaria esa característica durante la carga.

Factor de capacidad (CF) y Múltiplo solar (SM)

- La **capacidad de almacenamiento** se mide como el tiempo en horas que un sistema de almacenamiento puede soportar el funcionamiento del sistema a plena potencia. Se define el **factor de capacidad**, en donde W_a es la energía anual producida y P_{out} es la potencia nominal de la planta como:

$$CF = \frac{W_a}{P_{out} \cdot 8760}$$

- En el caso de tener almacenamiento, la planta se diseña para proporcionar una potencia de diseño (P_c), inferior a la potencia total que es absorbida por el receptor (P_r), con lo que se define el **múltiplo solar** como:

$$SM = \frac{P_r}{P_c}$$

- La **eficiencia de la planta** se ve afectada por las pérdidas que se producen en el almacenamiento, que se determinan como:

$$\gamma_{St} = 1 - \delta_{St} \cdot (1 - \gamma_c \cdot \gamma_d)$$

- En donde δ_{st} es la fracción de la energía anual enviada al almacenamiento y γ_c y γ_d son los valores de la eficiencia de carga y descarga del almacenamiento

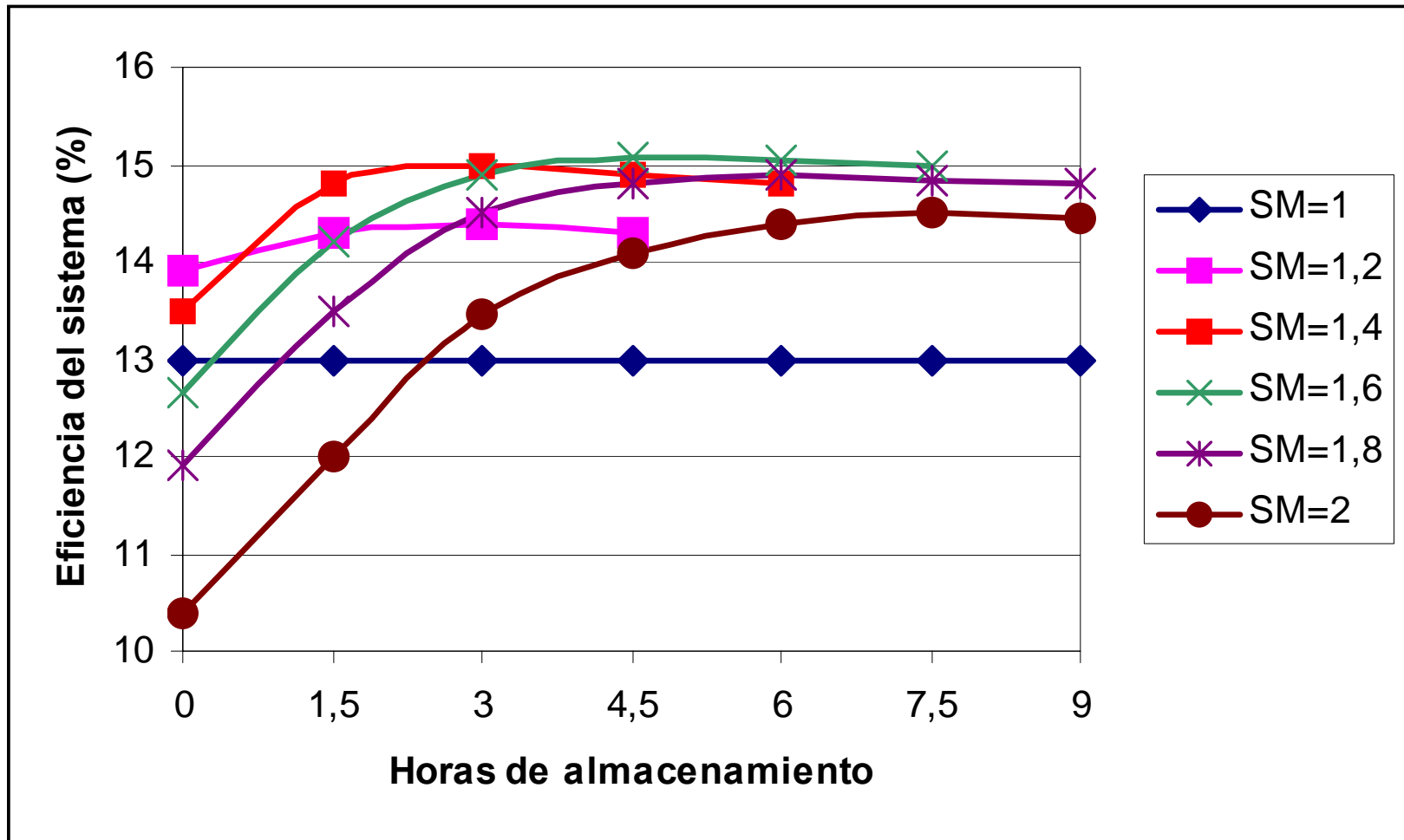
Almacenamiento y múltiplo solar (MS)

- El **Múltiplo Solar** es **potencia térmica obtenible en la planta**, en su punto de diseño, y la **potencia térmica necesaria**, en esas condiciones, para hacer funcionar **el ciclo a la potencia nominal**.
- El **sobredimensionamiento del campo** y del sistema de captación han de ser **proporcionales al tamaño térmico** (y volumétrico) del **almacenamiento**
- Se puede expresar que el **coste de inversión**, es proporcional al valor de MS en exceso de la unidad. Así pues, para un tipo de planta termosolar, y de sistema de almacenamiento, será proporcional al valor **(MS - 1)** con tendencia algo por encima de la lineal, con un **mayor coste de instalación por unidad de superficie de campo**..
- En general el **coste dominante** será el **asociado al campo** y sistema de captación. Al aumentar el tamaño del sistema de almacenamiento, el coste específico de éstos tiende a bajar

Optimización del SM y Almacenamiento

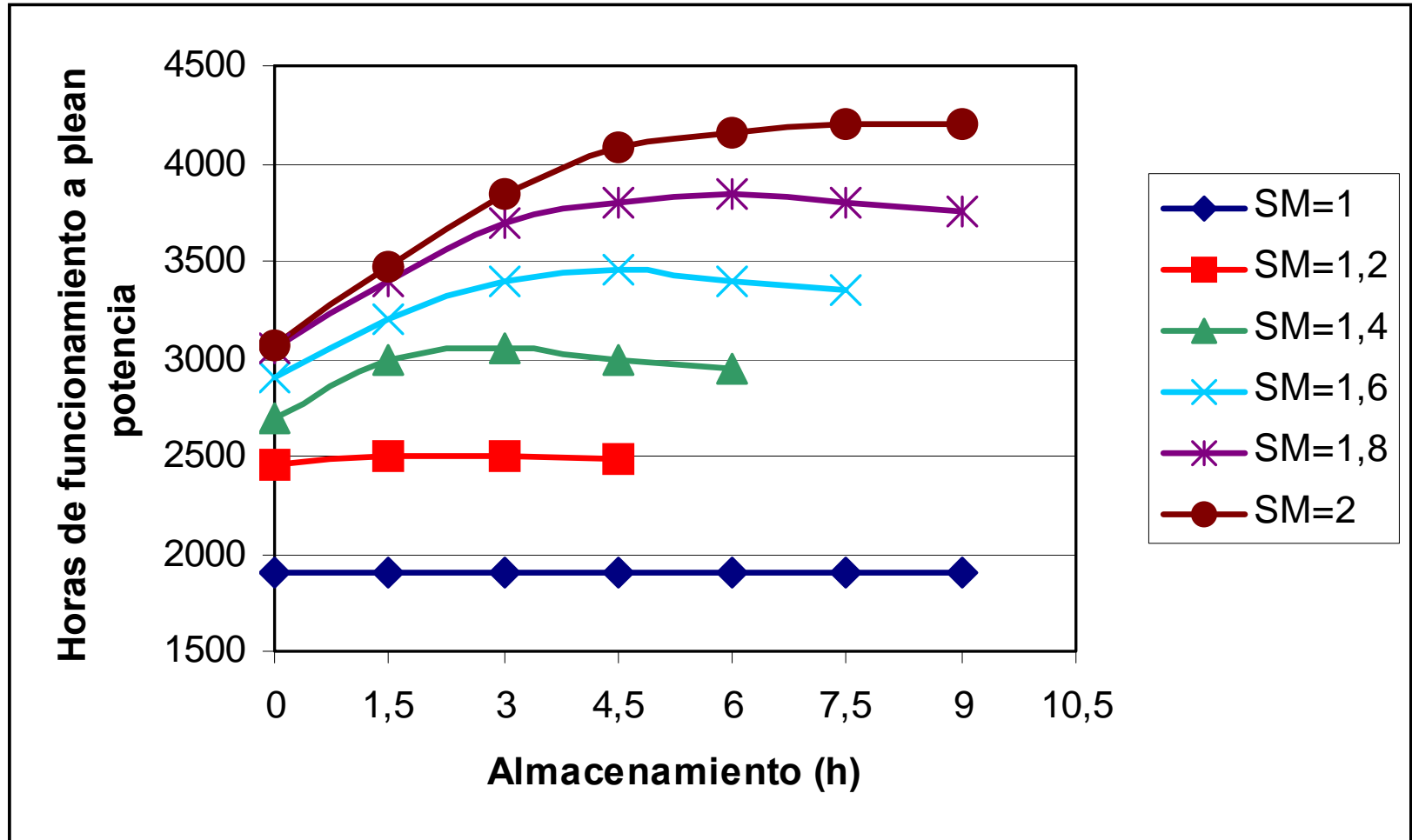
- La eficiencia del ciclo de la planta dependen del múltiplo solar y de la capacidad de almacenamiento.
- El incremento de las horas de almacenamiento produce una mejora en el rendimiento del ciclo porque reduce el tiempo de funcionamiento a carga parcial, aunque se incrementan las pérdidas en el almacenamiento, expresadas con γ_c y γ_d .
- Existe una combinación óptima de múltiplo solar y capacidad de almacenamiento
- El número de horas de funcionamiento a plena potencia puede pasar de unas 800 h sin almacenamiento y con $SM=1$, hasta unas 3600 h con 4,5 h de almacenamiento y $SM=2$, lo que implica garantía de potencia parcial.

Eficiencia en función de SM y almacenamiento



Fuente: C. J. Winter, R.L. Sizmann, L.L. Vant-Hull."Solar Power Plants. Fundamentals, Technology, Systems, Economics". Springer-Verlag

Operación en función de SM y almacenamiento



Fuente: C. J. Winter, R.L. Sizmann, L.L. Vant-Hull."Solar Power Plants. Fundamentals, Technology, Systems, Economics". Springer-Verlag

Medios de almacenamiento aplicados

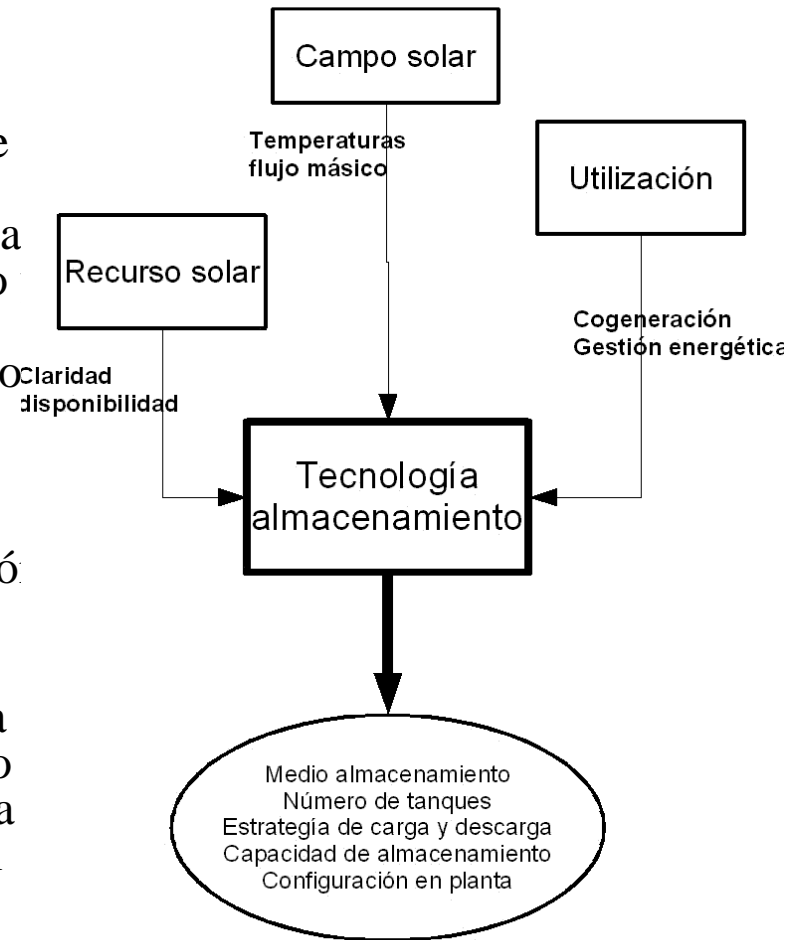
■ Los diferentes modos en los que se realiza el almacenamiento térmico en una planta termosolar se clasifican según una serie de características relevantes:

- **Calor sensible:** Atienden a la capacidad térmica por unidad de masa, lo que teniendo en cuenta la densidad, da lugar a una capacidad de almacenamiento en kWh/m³, lo que facilita su estimación de costes en función del material.
- **Calor latente:** La energía térmica se carga y descarga a través del cambio de fase de un material, lo que proporciona alta densidad de capacidad de almacenamiento, operando a temperaturas prácticamente constantes. Atención a los problemas de intercambio térmico en los cambios de fase.
- **Energía química:** Almacenamiento en forma de energía química, generalmente en hidrocarburos.

■ Almacenamiento simple y dual: En el simple, el fluido caloportador (HTF) es también el medio de almacenamiento (sales fundidas, o aceite). En los almacenamientos duales, el HTF y el medio de almacenamiento es distinto, generalmente debido a menores costes de este último.

Selección técnica de diseño de almacenamiento.

- **Temperaturas de operación** del campo solar.
- **Caudal másico de fluido calorífero.** El caudal viene dado por la potencia que debe ser capaz de absorber el medio de almacenamiento y puede condicionar el tipo de tecnología en función de la naturaleza líquida o gaseosa del fluido calorífero la pérdida de carga, y condicionamientos de carga/descarga y rendimiento de almacenamiento que puede conllevar.
- **Disponibilidad de recurso solar.** En función del área geográfica y la relación entre radiación directa y difusa, o el número de horas de radiación directa disponible se ha de dimensionar el almacenamiento y el múltiplo solar asociado.
- **Utilización.** El uso que se vaya a dar a la energía térmica que se obtenga puede condicionar el tipo de almacenamiento, incluso pudiendo dar lugar a varios niveles térmicos de almacenamiento en el caso de tener que aprovechar el calor residual mediante cogeneración.

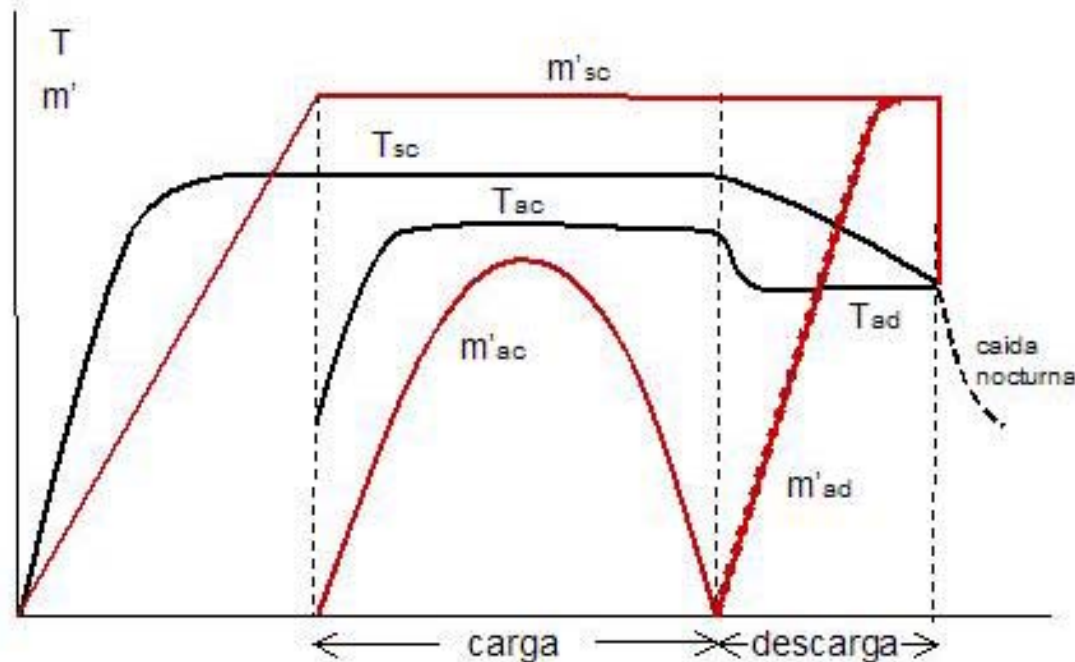


Proyectos de almacenamiento

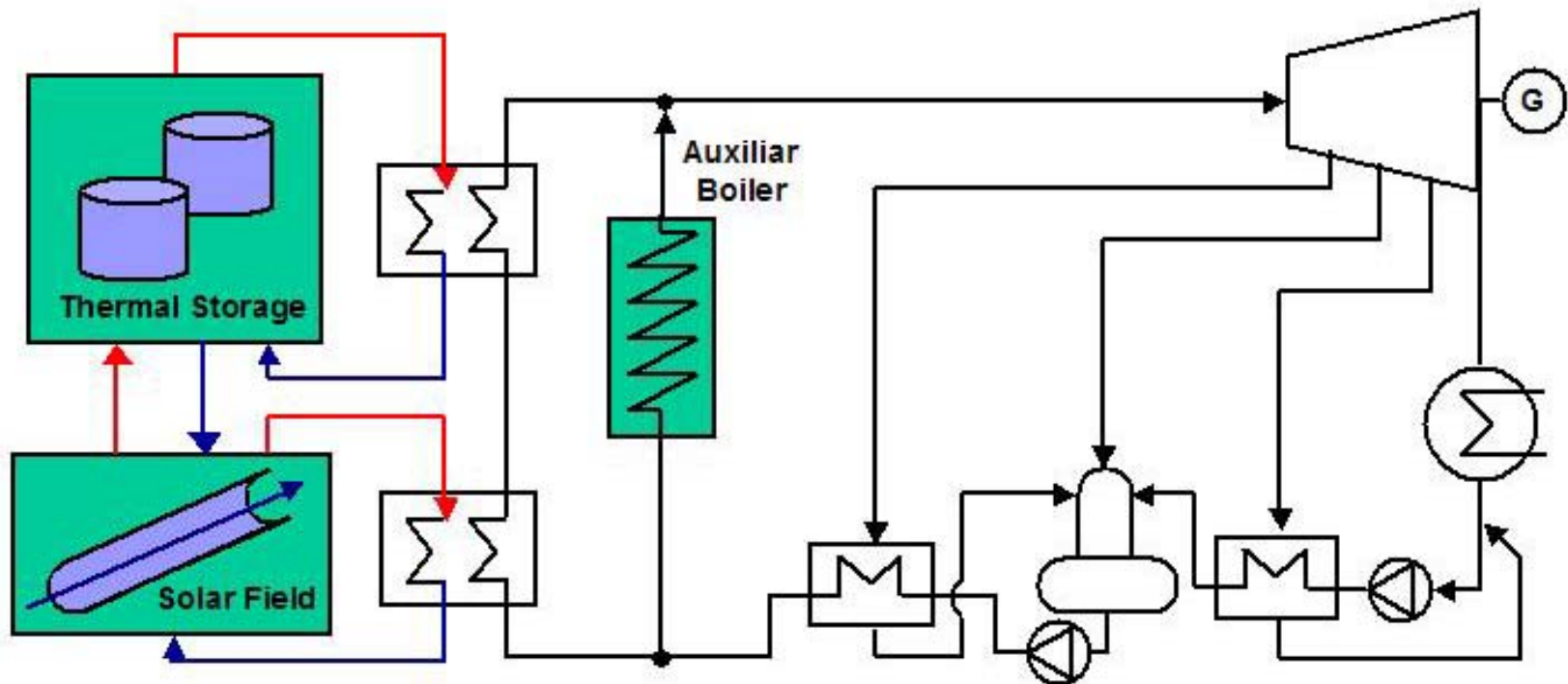
Proyecto	Campo solar	Medio	Fluido calorífero	Temperaturas (°C)		Tipo	Volumen (m3)	Capacidad (MWth)
				Fría	Caliente			
Irrigation camp Coolidge, AZ, USA	CP	Aceite	Aceite	200	228	Tanque termoclino	114	3
IEA-SSPS Almería	CP	Aceite	Aceite	225	295	Tanque termoclino	200	5
SEGS I Daggett, CA, USA	CP	Aceite	Aceite	240	307	Tanques caliente y frío	4160 4540	120
IEA-SPSS Almería	CP	Aceite Hierro	Aceite	225	295	Tanque dual	100	4
Solar One Barstow, CA, USA	TC	Aceite/ Arena/ Roca	Vapor	224	304	Tanque dual	3460	182
CESA-1 Almería	TC	Sales	Vapor	220	340	Tanque frío y caliente	200 200	12
THEMIS Targassonne, Francia	TC	Sales	Sales	250	450	Tanque frío y caliente	310 310	40
Solar Two Barstow, CA USA	TC	Sales	Sales	275	565	Tanque frío y caliente	875 875	110
Andasol-1 Granada	CP	Sales	Aceite	292	386	Tanque frío y caliente	60000 60000	1010

Acoplamiento operativo

- Hay un efecto sobre la temperatura a la que se abastece el bloque de potencia tras el almacenamiento por las pérdidas de temperatura en los intercambiadores durante carga y descarga.
- El apoyo de hibridación se podría utilizar para solventar esta pérdida de temperatura.

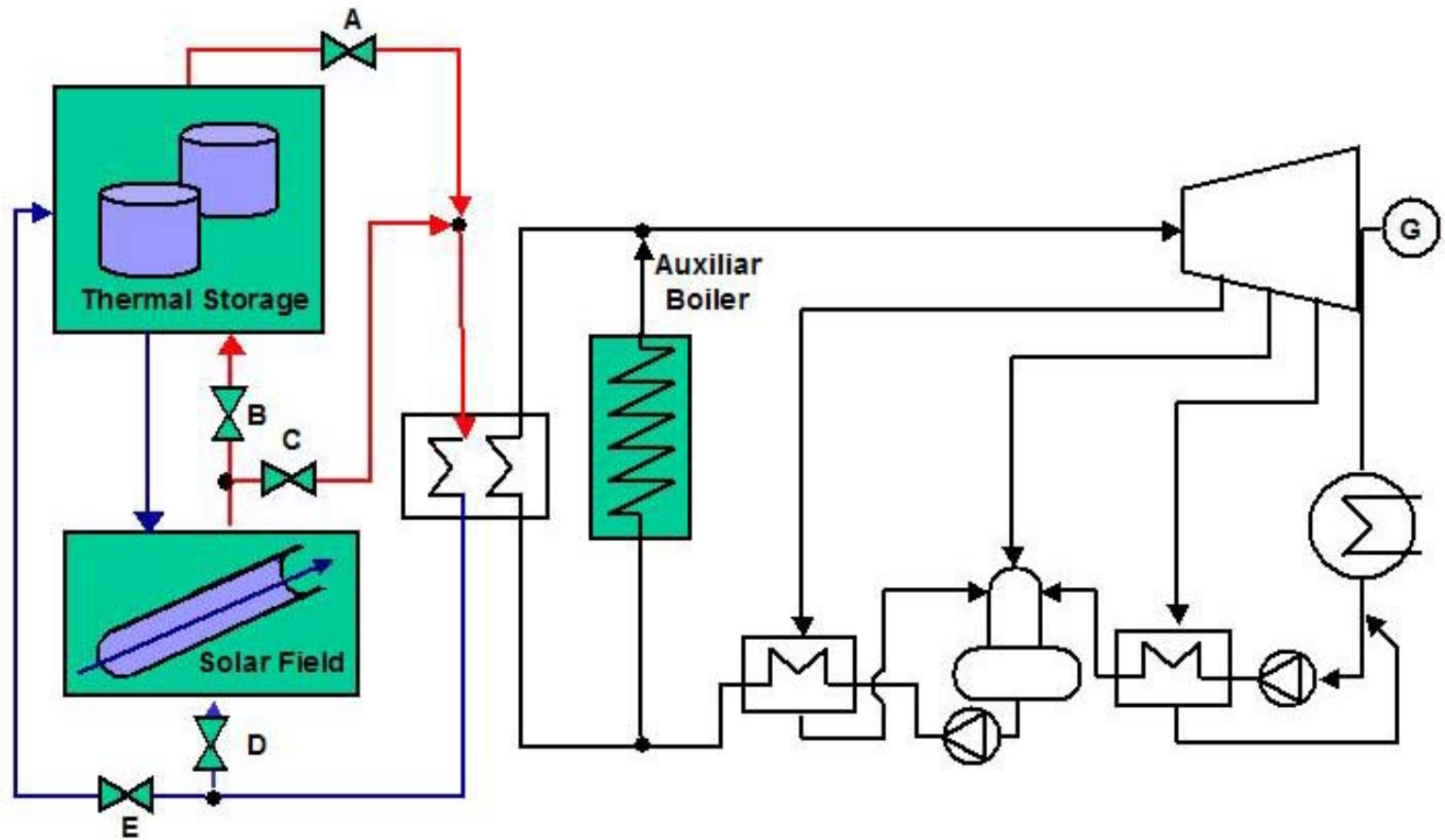


Modo de apoyo en transitorio



Almacenamiento con apoyo de hibridación directamente en vapor al ciclo del BOP y apoyo del almacenamiento para sobrecalentar vapor (transitorios)

Modo de apoyo en prorroga



Almacenamiento con apoyo de hibridación directamente en vapor al ciclo del BOP y modo de prórroga del almacenamiento para sustituir plenamente al campo solar

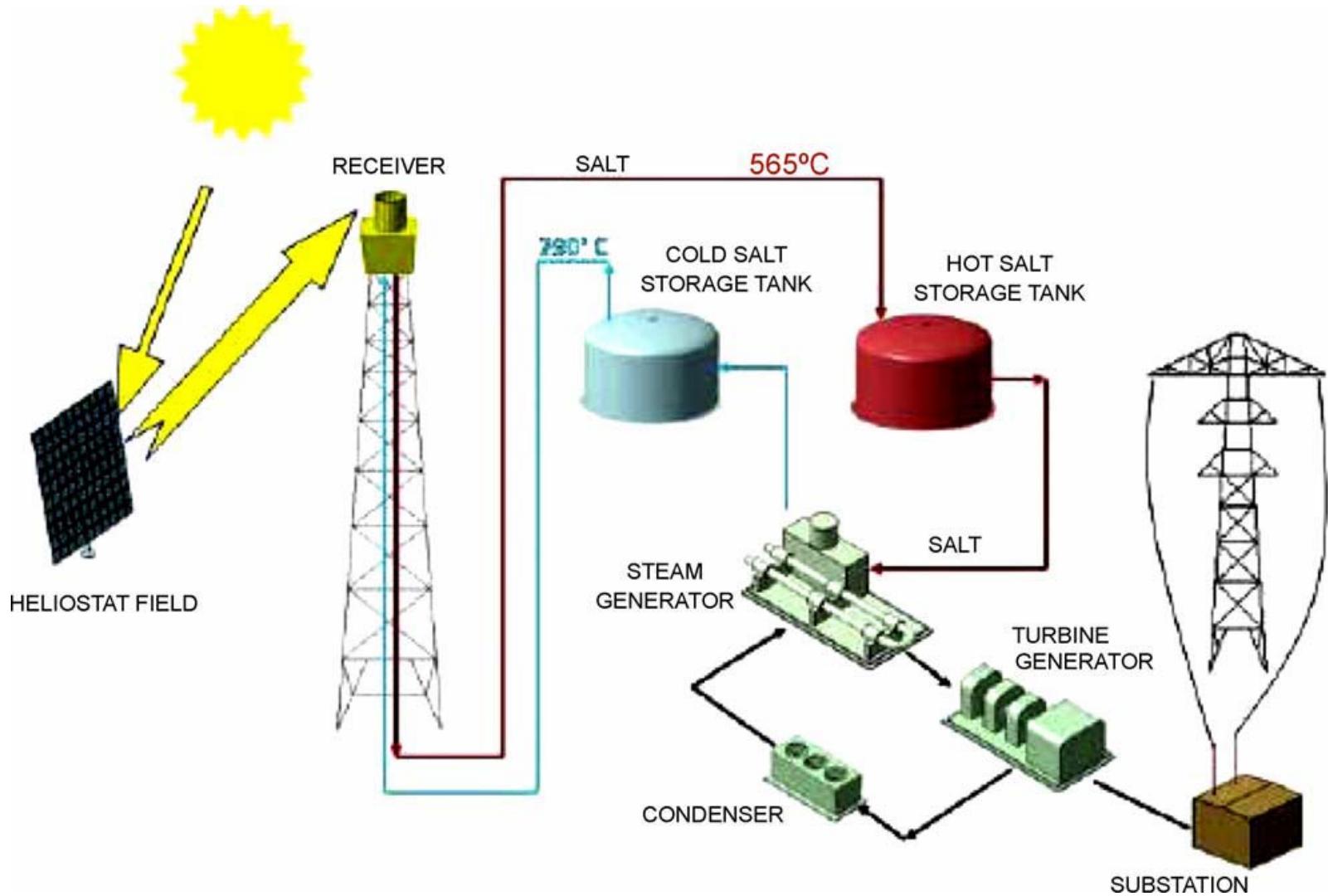
Tecnologías térmicas

- Almacenamiento sin cambio de fase o en forma de calor sensible:
 - Almacenamiento en un tanque.
 - Almacenamiento en dos tanques
 - Almacenamiento en sistema multitanque.
 - Almacenamiento en medio sólido
- Almacenamiento con cambio de fase o en forma de calor latente
- Almacenamiento termoquímico

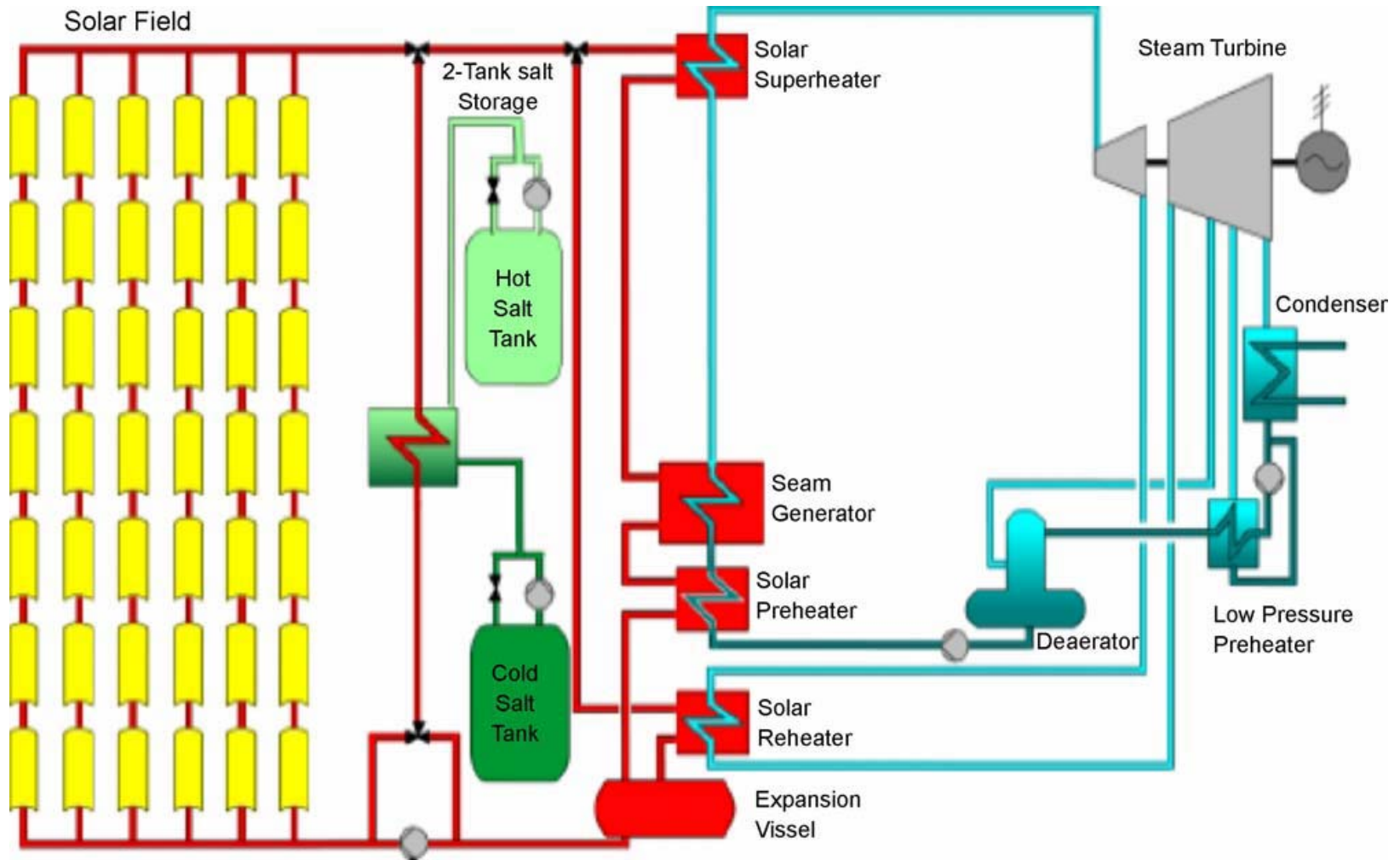
Materiales

Medio	Temperatura		Densidad Kg/m ³	Capacidad térmica volumétrica kWh/m ³	Coste €/kg	Coste €/kWh
	Fría °C	Caliente °C				
Sólidos						
Arena-roca-aceite	200	300	1700	60	0,15	4,2
Hormigón armado	200	400	2200	100	0,05	1,0
NaCl	200	500	2160	150	0,15	1,5
Hierro colado	200	400	7200	160	1,00	32,0
Acero	200	700	7800	450	5,00	60,0
Sílice	200	700	1820	150	1,00	7,0
Magnesio	200	1200	3000	600	2,00	6,0
Líquidos						
Aceite mineral	200	300	770	55	0,30	4,2
Aceite sintético	250	350	900	57	3,00	43,0
Aceite de silicona	300	400	900	52	5,00	80,0
Sales de nitritos	250	450	1825	152	1,00	12,0
Sales de nitratos	265	565	1870	250	0,70	5,2
Sales de carbonatos	450	850	2100	430	2,40	11,0
Sodio líquido	270	530	850	80	2,00	21,0
Cambio de fase						
NaNO3	308		2257	125	0,20	3,6
KNO3	333		2110	156	0,30	4,1
KOH	380		2044	85	1,00	24,0
Sales-Cerámica (NaCO3-BaCO3/MgO)	500-850		2600	300	2,00	17,0
NaCl	802		2160	280	0,15	1,2
Na2CO3	854		2533	194	0,20	2,6
K2CO3	897		2290	150	0,60	9,1

Doble tanque - Solar Tres



Doble tanque

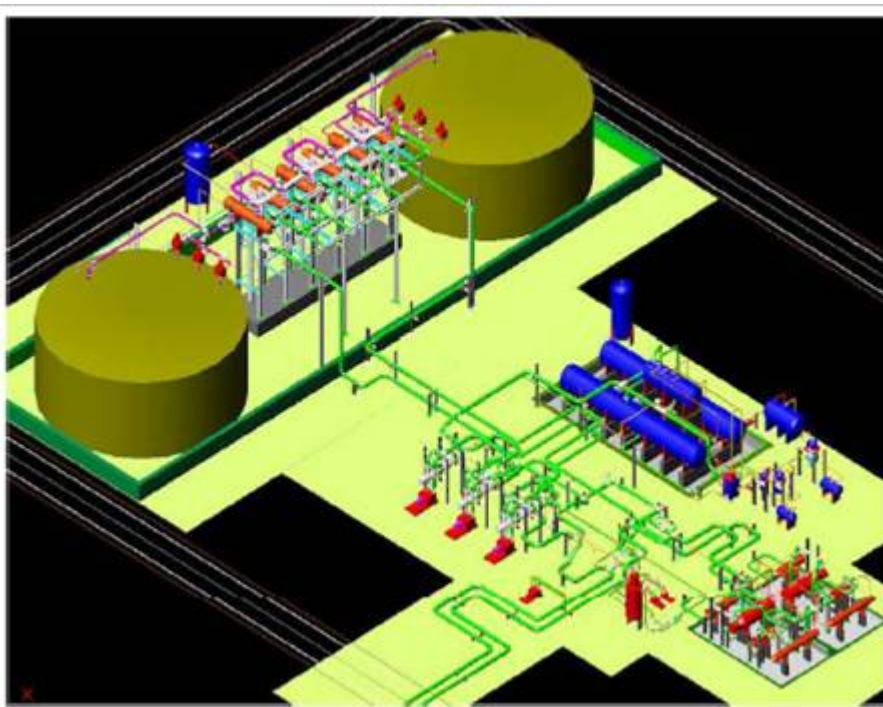


Fuente: Herrmann U, Geyer M, Kearney D. Overview on thermal storage systems. Workshop on Thermal Storage for Trough Power Plants. FLABEG Solar International GmbH; 2006

Doble tanque - Solar two

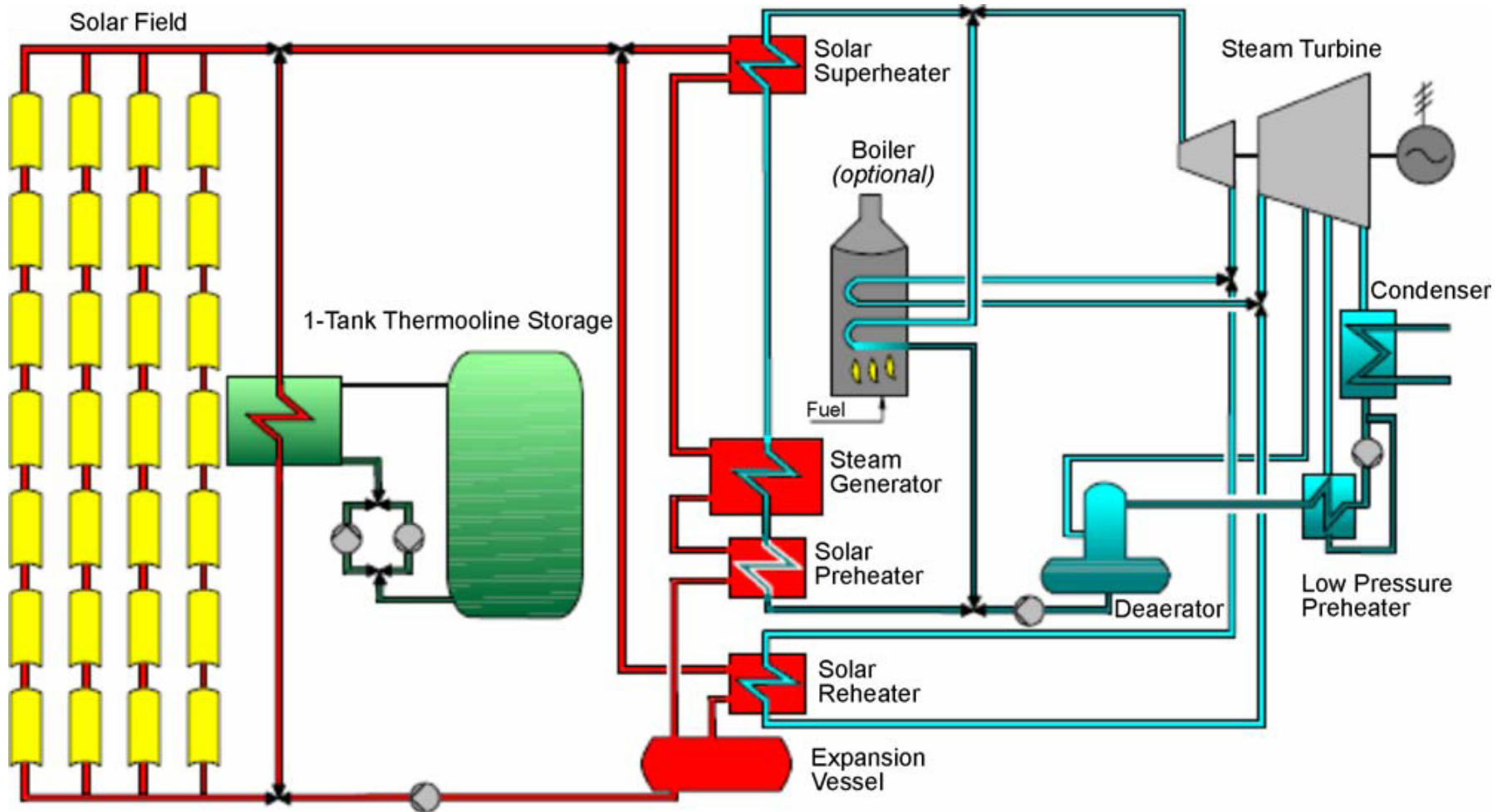


Andasol 1 (Solar Millenium)



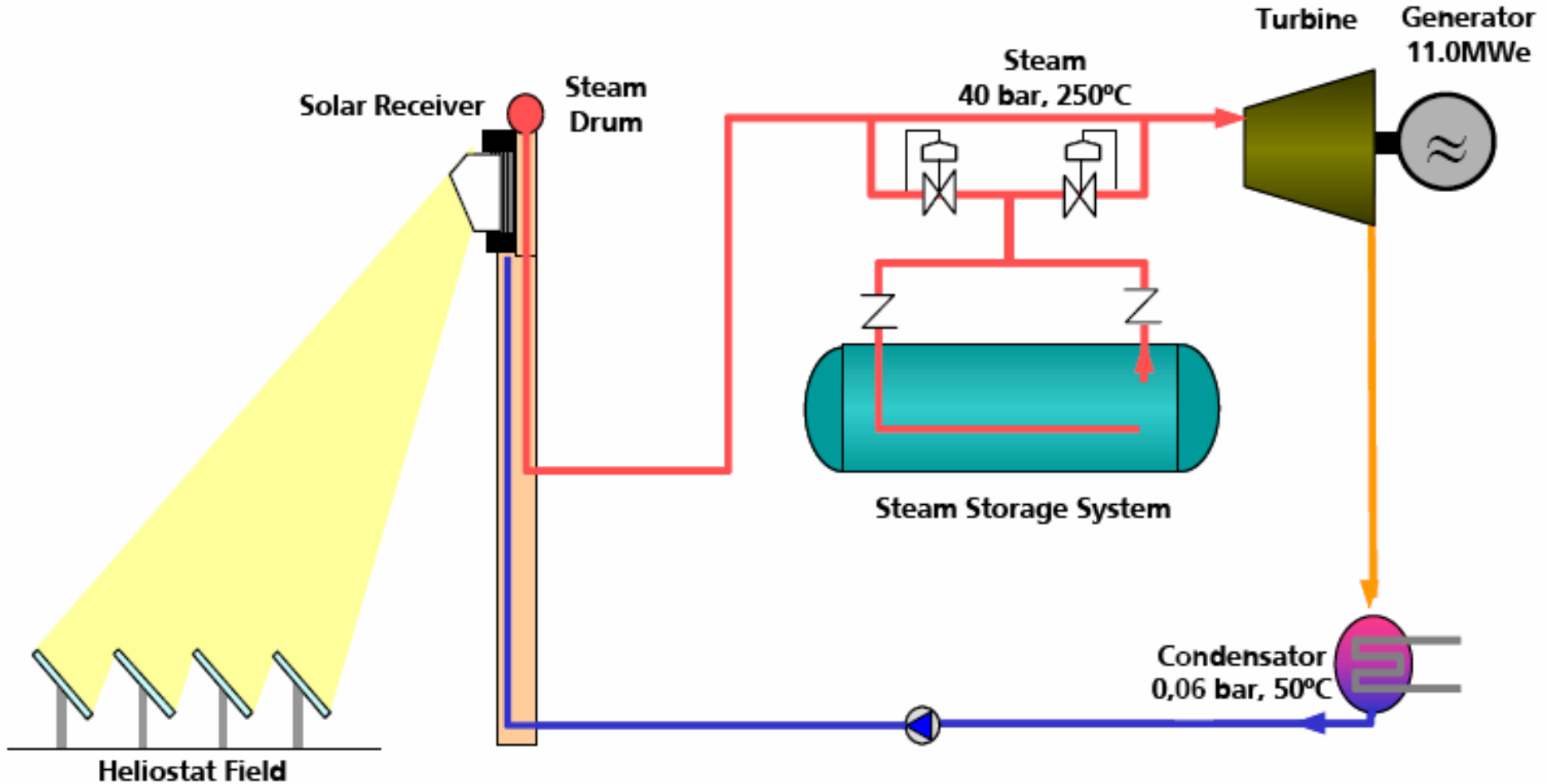
7,5 horas de almacenamiento
1100 MWh
30000 ton de sales

Tanque simple termoclino



Fuente: Herrmann U, Geyer M, Kearney D. Overview on thermal storage systems. Workshop on Thermal Storage for Trough Power Plants. FLABEG Solar International GmbH; 2006

Modo en transitorio vapor - PS10

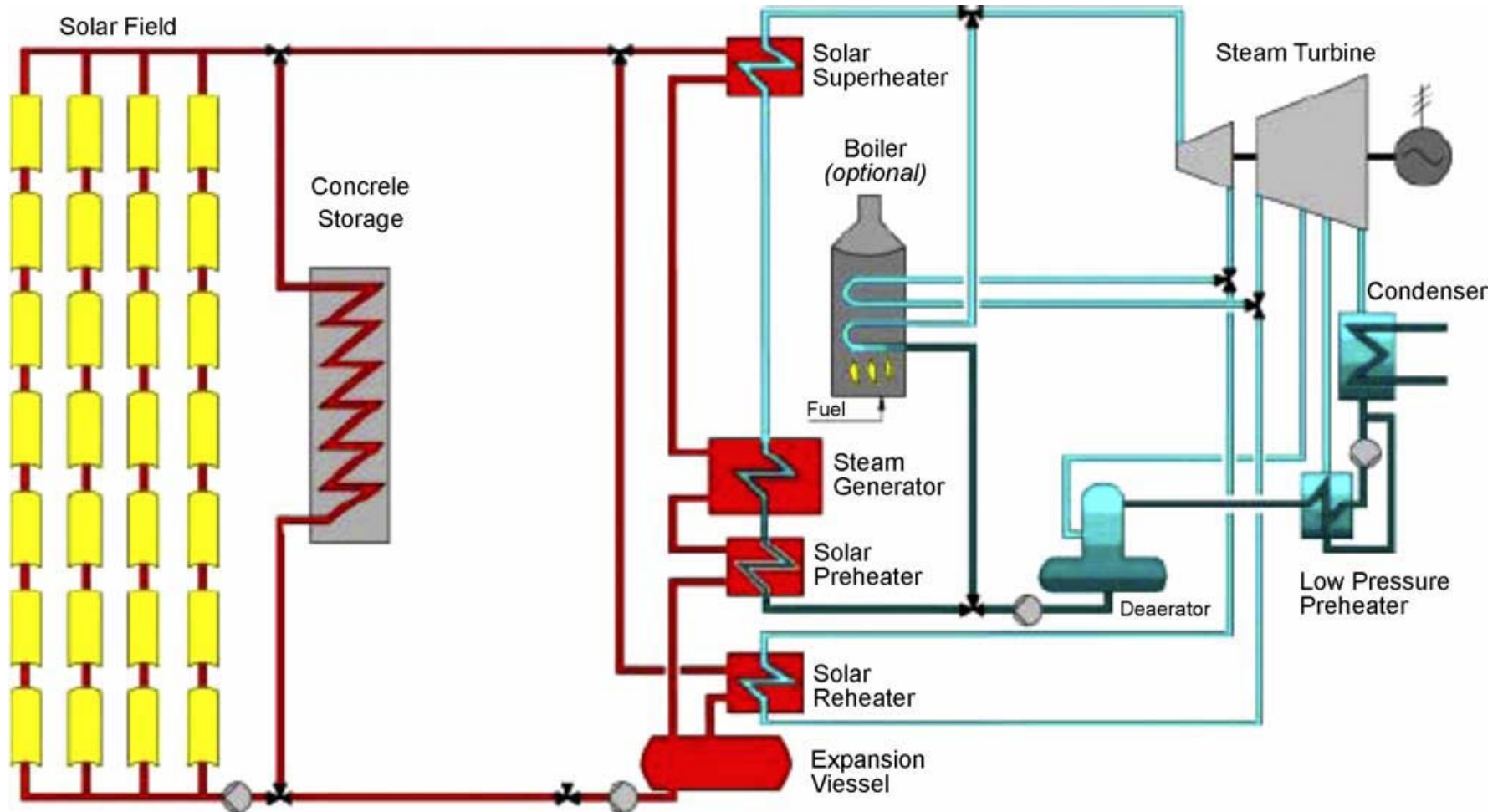


Modo en transitorio vapor - PS10



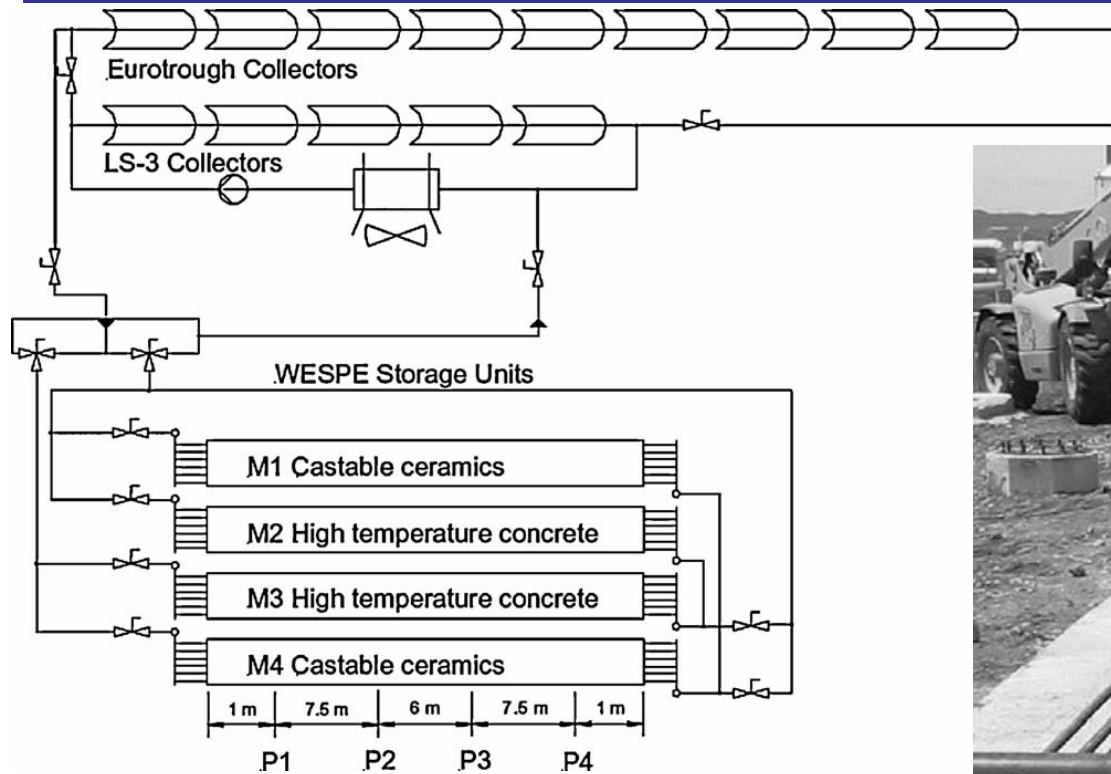
Storage tanks at the PS10 facility ABENGOA

Medio sólido



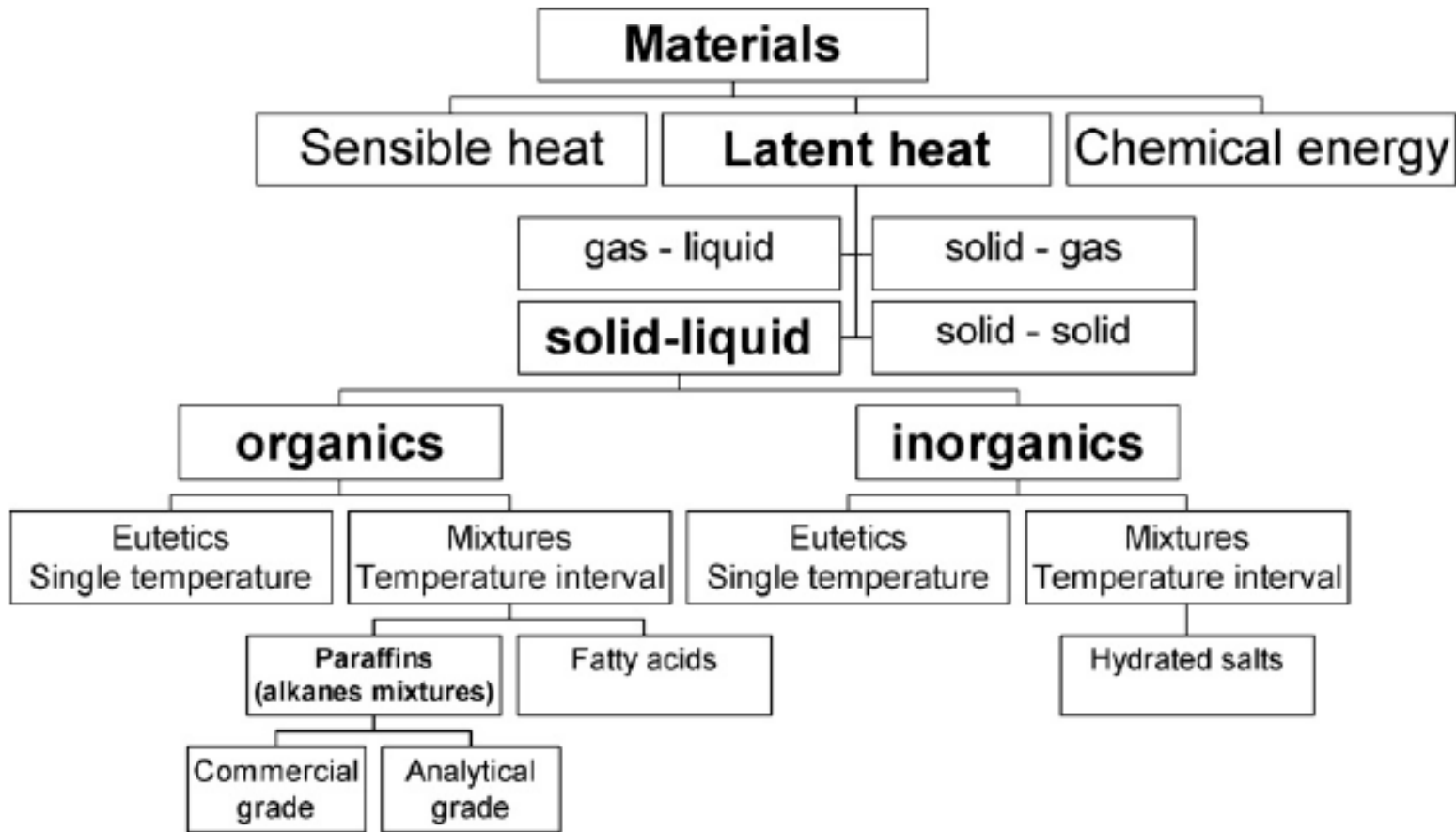
Fuente: Herrmann U, Geyer M, Kearney D. Overview on thermal storage systems. Workshop on Thermal Storage for Trough Power Plants. FLABEG Solar International GmbH; 2006

Medio sólido



Laing D, Steinmann WD, Tamme R, Richter C. Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. *Solar Energy* 2006;80:1283–9.

Cambio de fase

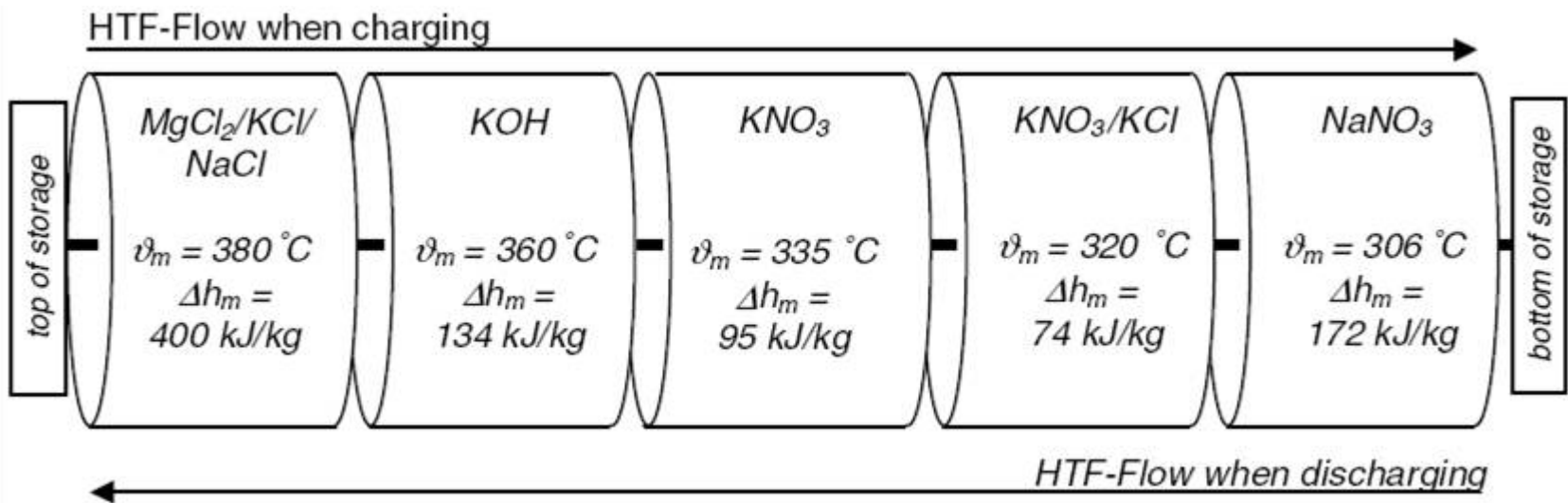


Materiales almacenamiento cambio de fase

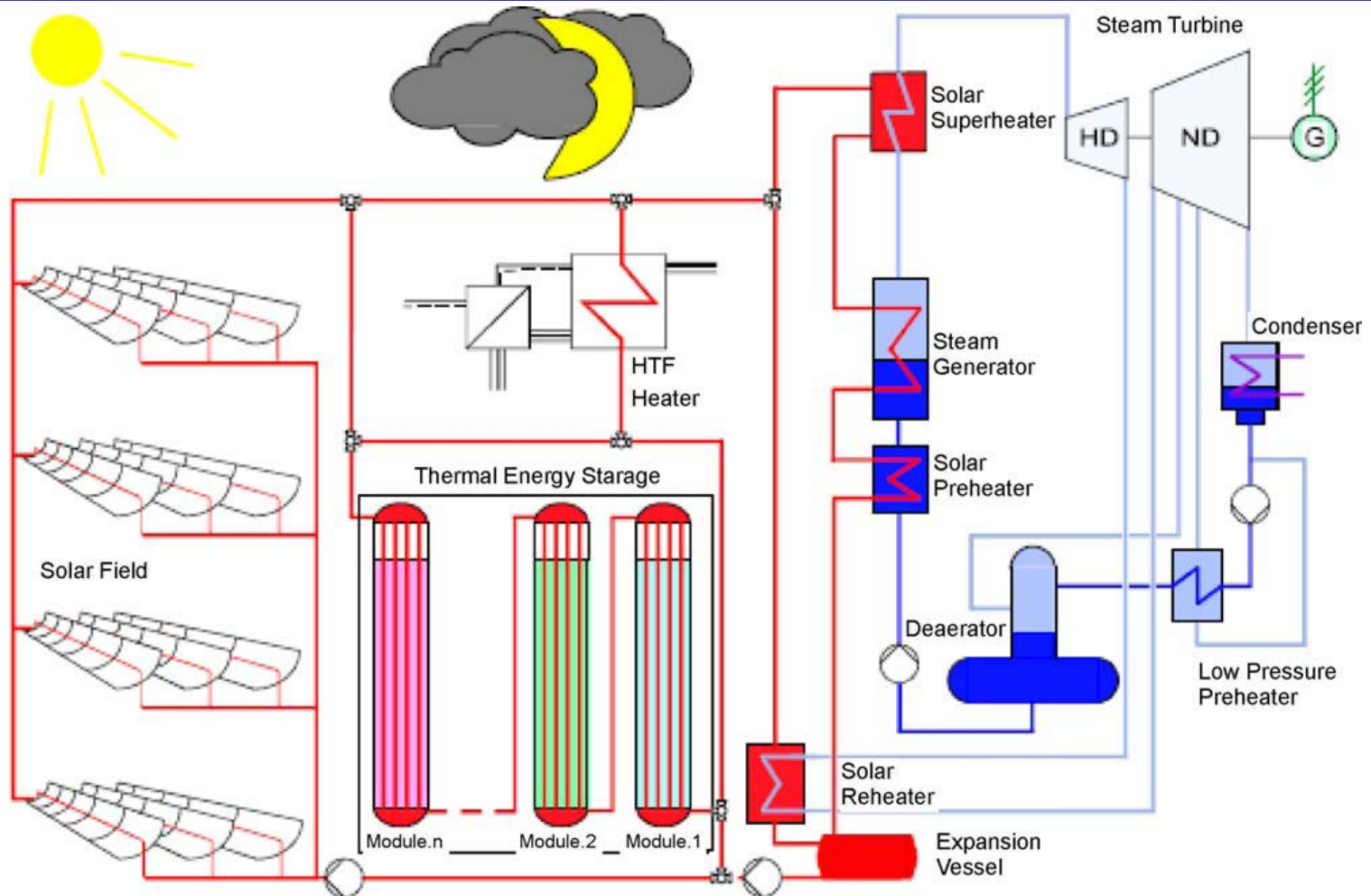
- Un valor alto del calor de cambio de estado y su calor específico.
- Una temperatura de cambio de fase que puede ajustarse a muchas aplicaciones.
- Una presión de vapor baja (< 1 bar) a las temperaturas de operación.
- Su estabilidad química y un bajo índice de corrosión.
- Una conductividad térmica alta.
- Un proceso de reproducción cíclica del proceso de cambio de fase sin degradación.
- Debe ser abundante y barato.
- Tener una variación pequeña de volumen durante el cambio de fase.
- No ha de ser inflamable.

Cambio de fase

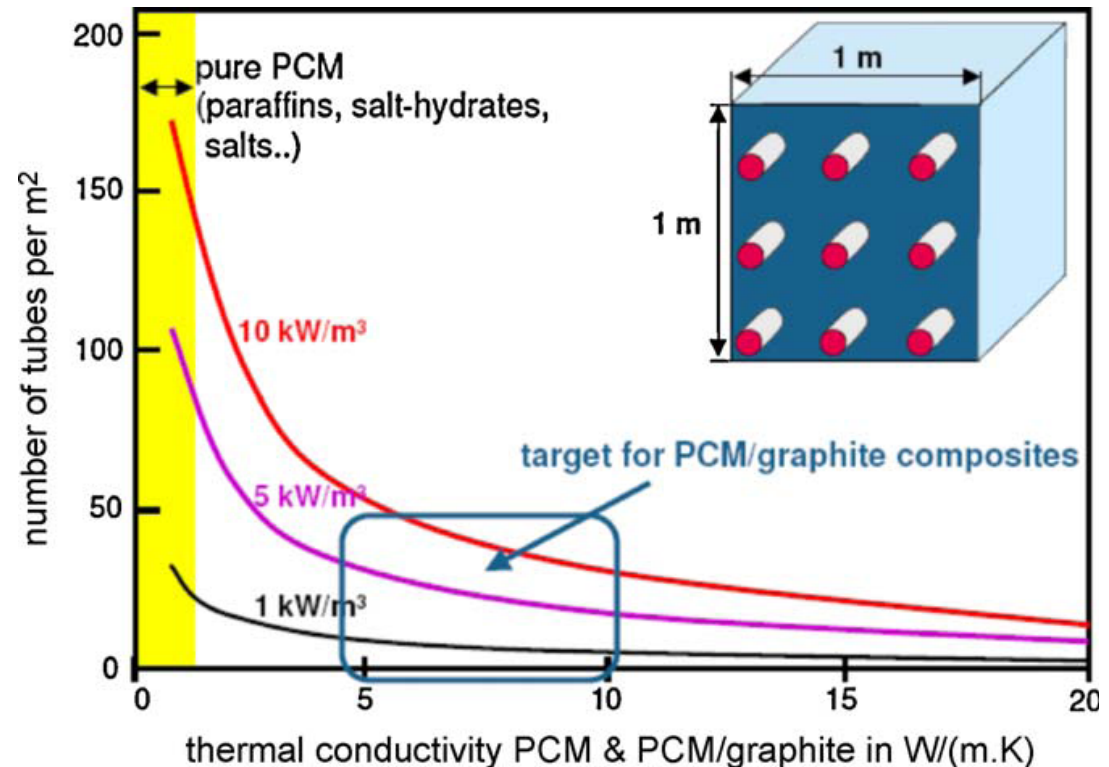
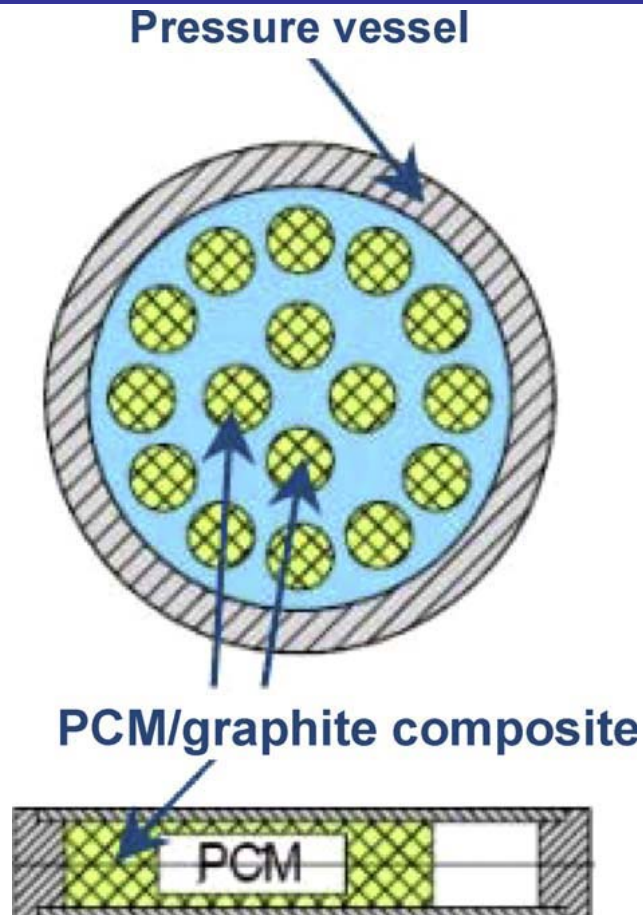
- Propuestas de esquemas en cascada con varios materiales en modo cambio de fase para centrales termosolares.



Almacenamiento con cambio de fase

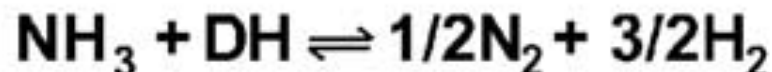
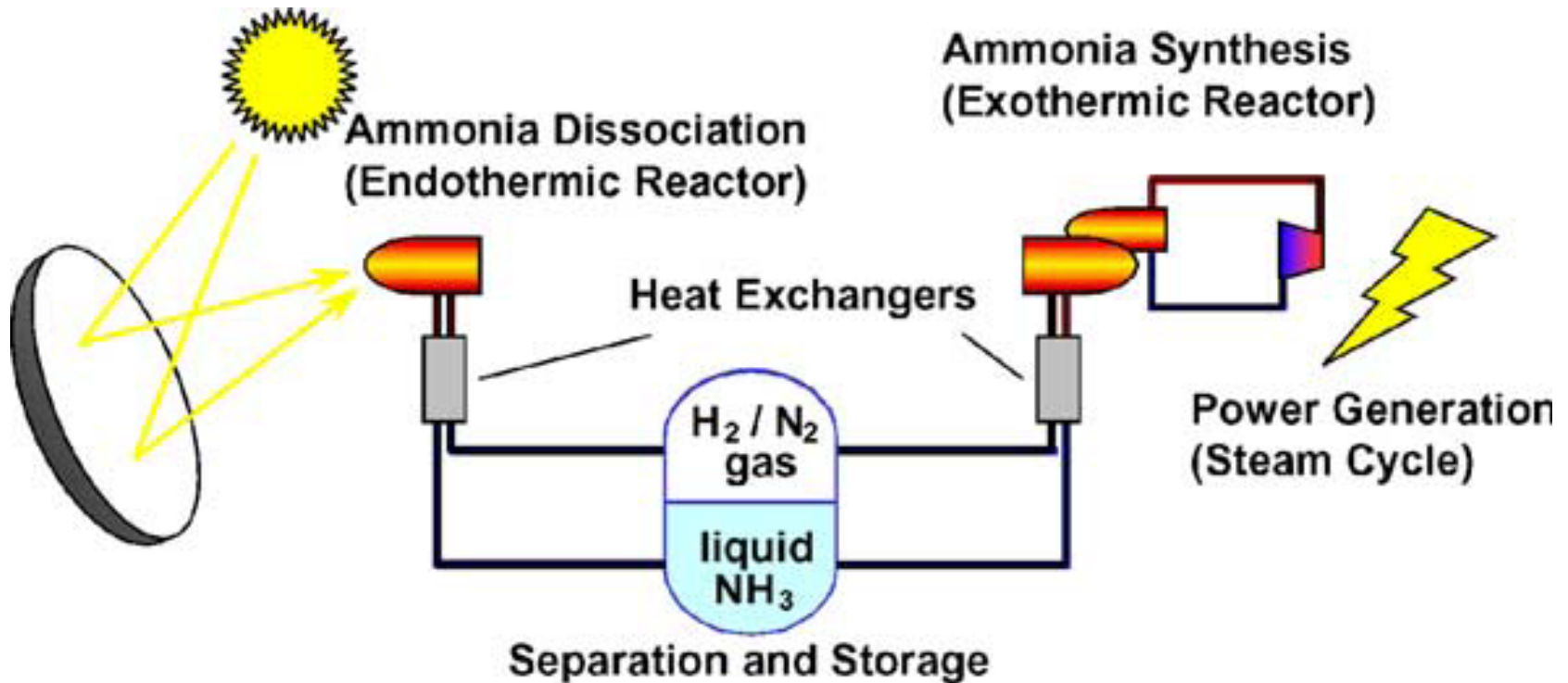


Compuestos Cer/C para $> K$



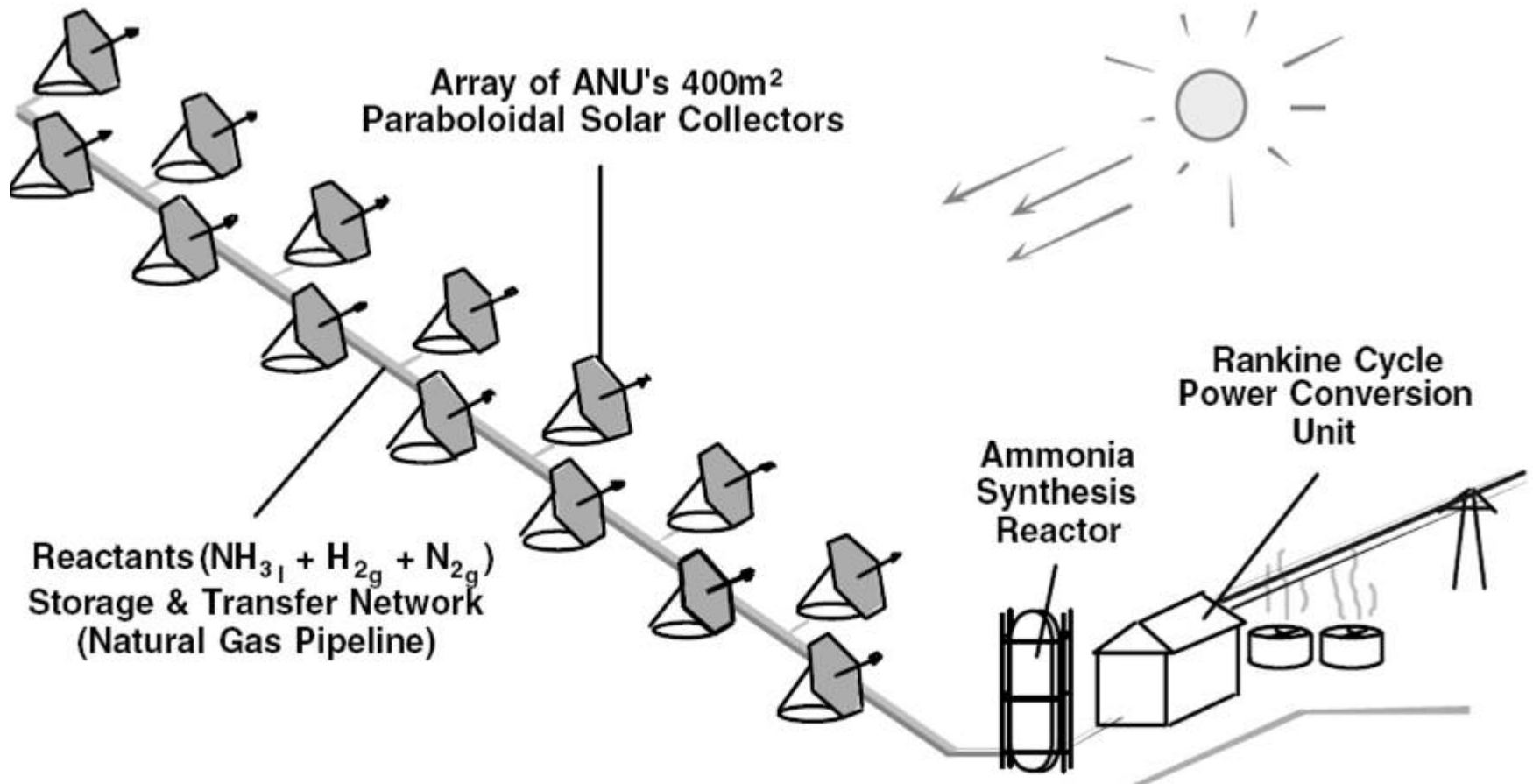
Fuente: Tamme R, Laing D, Steinmann WD. Advanced thermal energy storage technology for parabolic trough. J Solar Energy Eng-Trans ASME 2004;126:794–800.

Almacenamiento termoquímico - Amoniaco

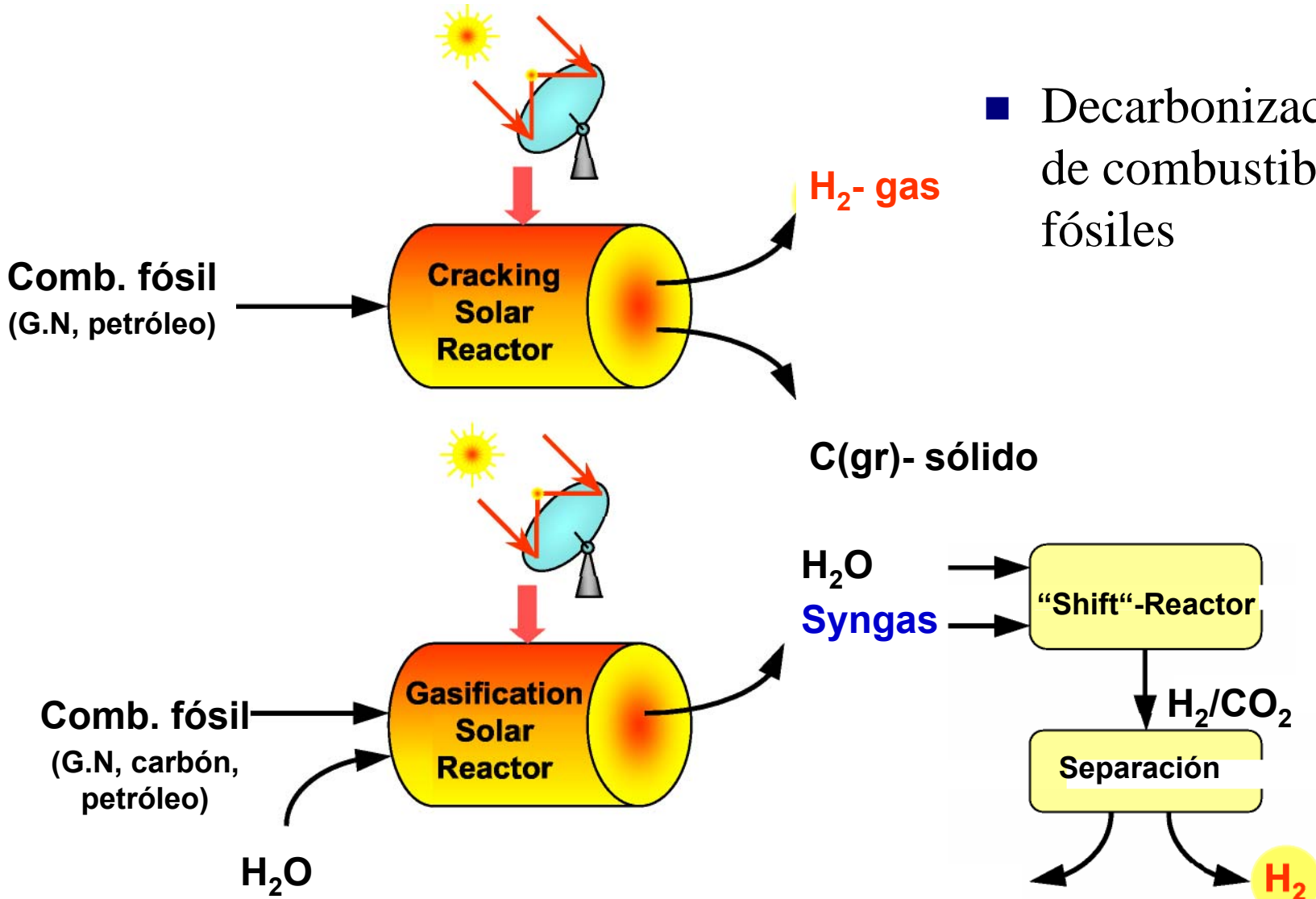


Fuente: Lovegrove K, Luzzi A, Soldiani I, Kreetz H. Developing ammonia based thermochemical energy storage for dish power plants. Solar Energy 2004;76:331–7.

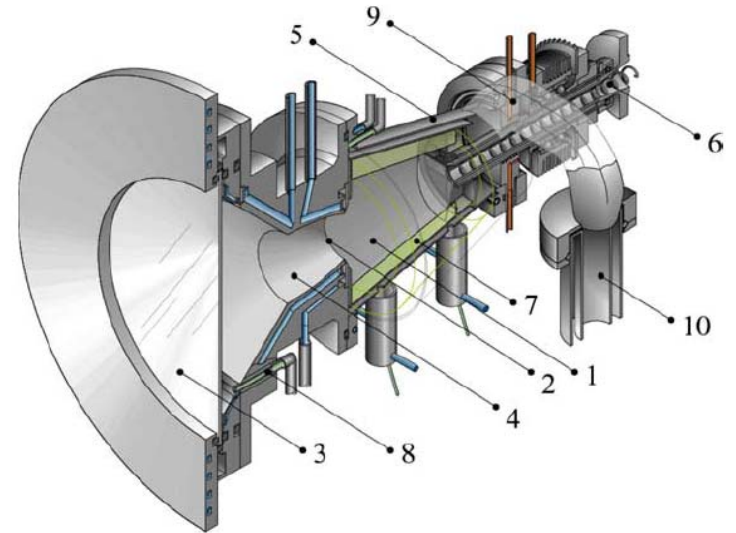
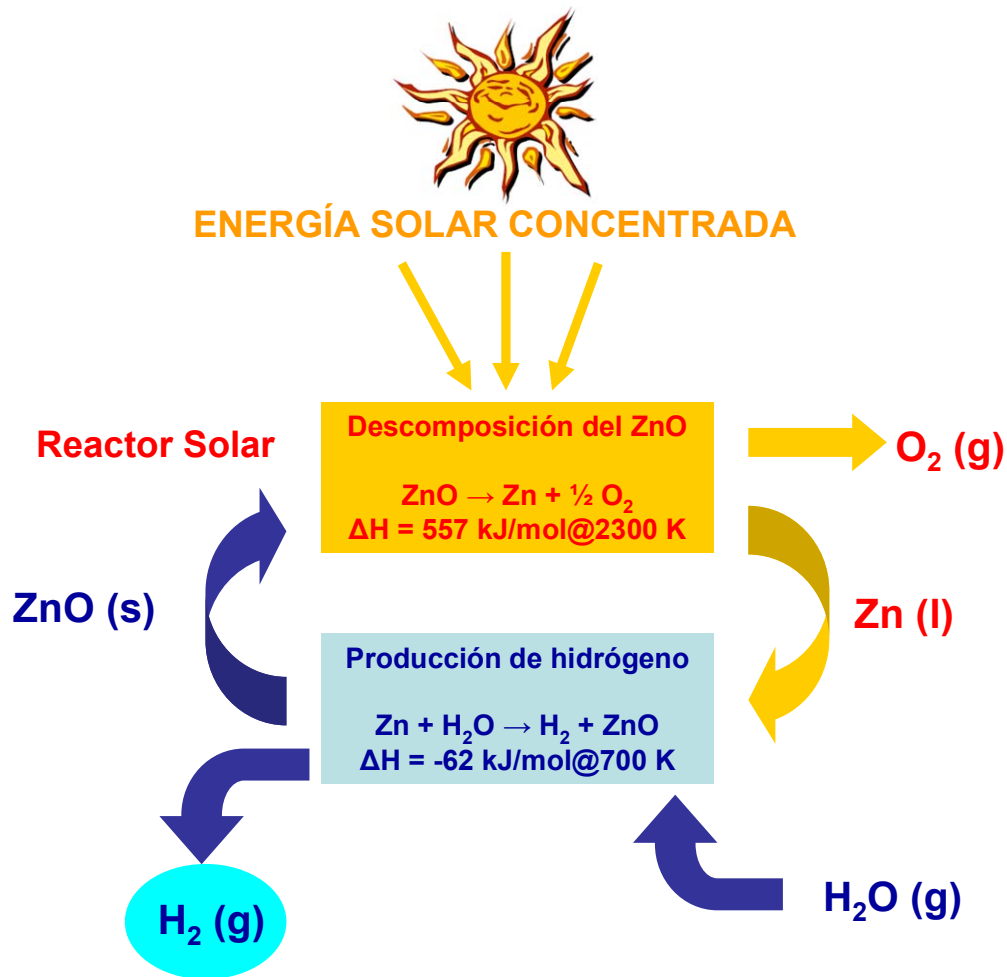
Almacenamiento termoquímico - Amoníaco



Almacenamiento termoquímico - Hidrógeno



Almacenamiento termoquímico - Hidrógeno



1. Receptor rotativo
2. Apertura
3. Ventana de cuarzo
4. CPC (Compounded Parabolic Concentrator)
5. Carcasa estática
6. Alimentador de ZnO
7. Capa de ZnO
8. Entrada de gas inerte auxiliar
9. Salida de productos
10. Enfriador.

Optimización exérgica en el almacenamiento



MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Oficina Española
de Patentes y Marcas

AGENTE: CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel
C/ GOYA, 11
28001 MADRID

MADRID, a 30 de septiembre de 2009

ASUNTO: Concesión con examen previo de la Solicitud de Patente P200801916.

Conforme al artículo 39 de la Ley 11/1986 de Patentes, se le notifica que una vez realizado el Examen Previo de su solicitud de patente y:


- No habiendo objeciones por parte de esta Oficina, ni oposiciones de terceros,
- Subsanaadas las objeciones señaladas por la Oficina,
- Alegadas adecuadamente y/o subsanaadas las oposiciones de terceros,

ha sido acordada la Concesión de la patente solicitada.

Está previsto que dicha concesión sea publicada en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial (BOPI) de fecha 5/10/2009, que podrá consultarse en la web de la OEPM.

Contra el presente acto, que no pone fin a la vía administrativa, cabe interponer recurso de alzada ante la Dirección General de la OEPM, en el plazo de **1 mes** a contar desde la fecha de publicación de la mención de la resolución en el BOPI.

EL Director del Departamento de Patentes e I.T.;
P.D. Firma: El Jefe de Servicio de Examen de Patentes(Res. 05/09/2007).

El Director  Dpto. de
P.D. Firma: El Jefe de Servicio de Examen de Patentes(Res. 5/09/2007)

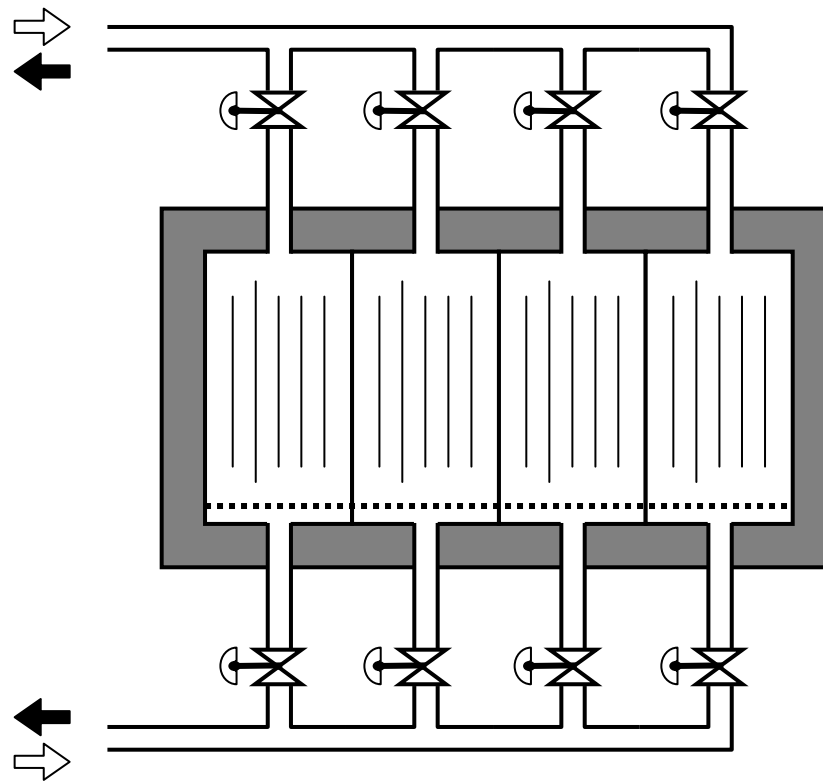
RECIBI:

05 OCT 2009

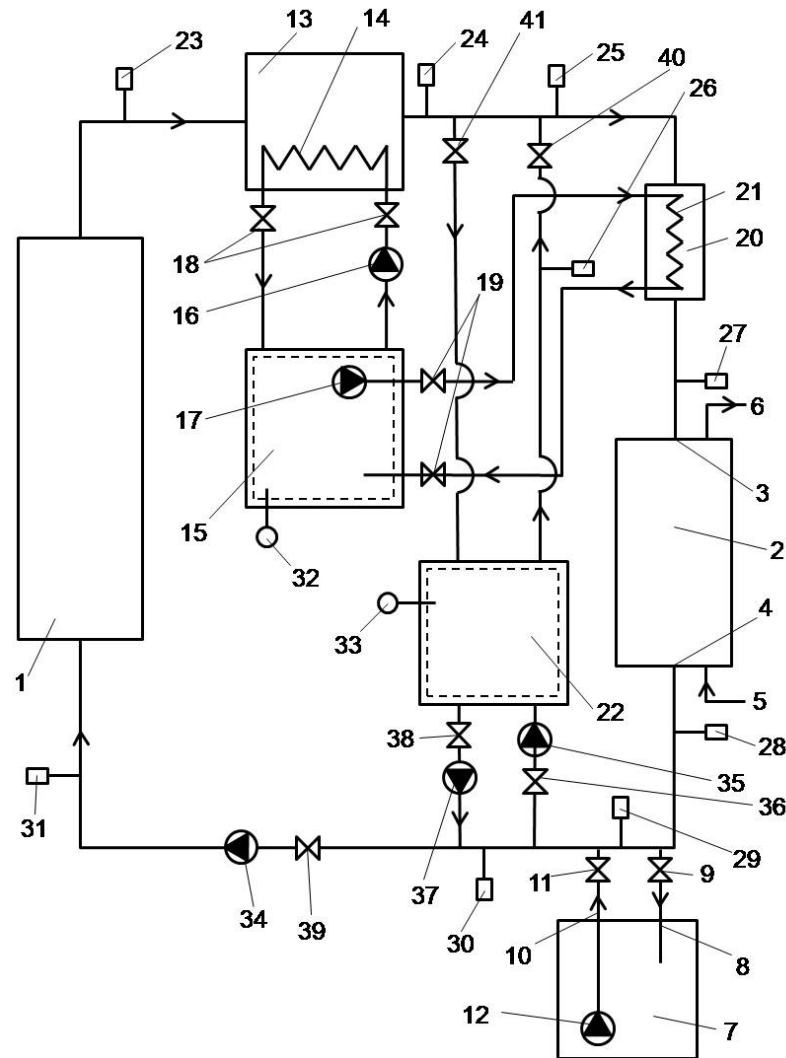
Fecha:

NOTA: SE ADJUNTA NOTA INFORMATIVA SOBRE REQUISITOS A CUMPLIMENTAR PARA LA EFECTIVIDAD DE LA CONCESIÓN

Procedimiento de carga/descarga



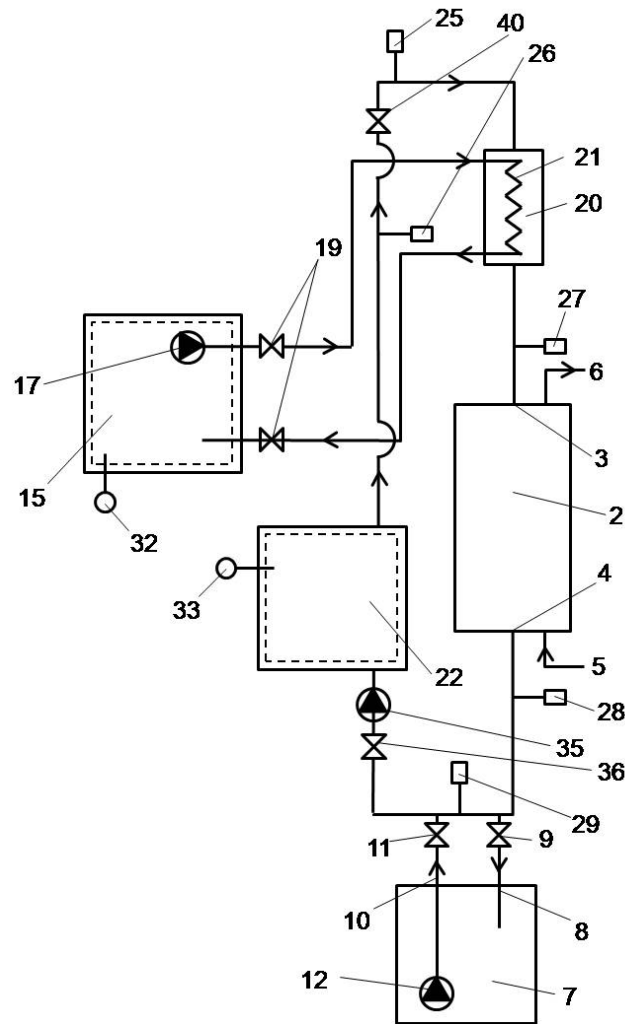
Gestión de exergía CS/almacenamientos



Resumen de la solicitud a OEPM

- Central helio-térmica con gestión exérgica del calor para funcionar en condiciones nominales un amplio plazo de horas diarias, estructurada en sectores con funciones de calentamiento diferenciadas, y en la que cada sector tiene su propio fluido calorífero, pero todos los sectores tienen consecutivamente el mismo fluido de trabajo del ciclo termodinámico, constando cada sector de una batería de captadores solares(1) , un intercambiador principal (2) de contacto térmico con el fluido de trabajo, **un sistema de almacenamiento térmico indirecto (15), y otro directo (22)**, y de las bombas, válvulas e instrumentación precisas para configurar cada sector según tres circuitos diferentes, lo que permite almacenar la energía térmica cuando la irradiación solar captada está por encima del valor nominal, y utilizar este calor para hacer funcionar el ciclo termodinámico también en condiciones nominales cuando el valor de la irradiación decae por debajo del nominal.

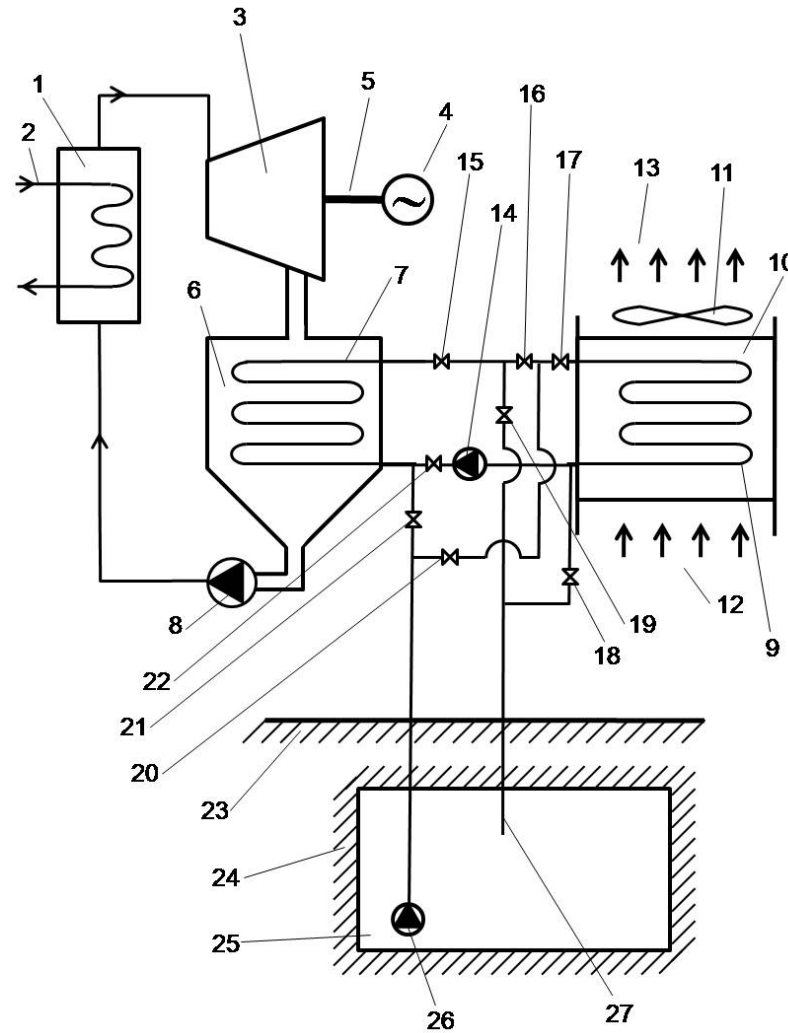
Modo de funcionamiento sin sol



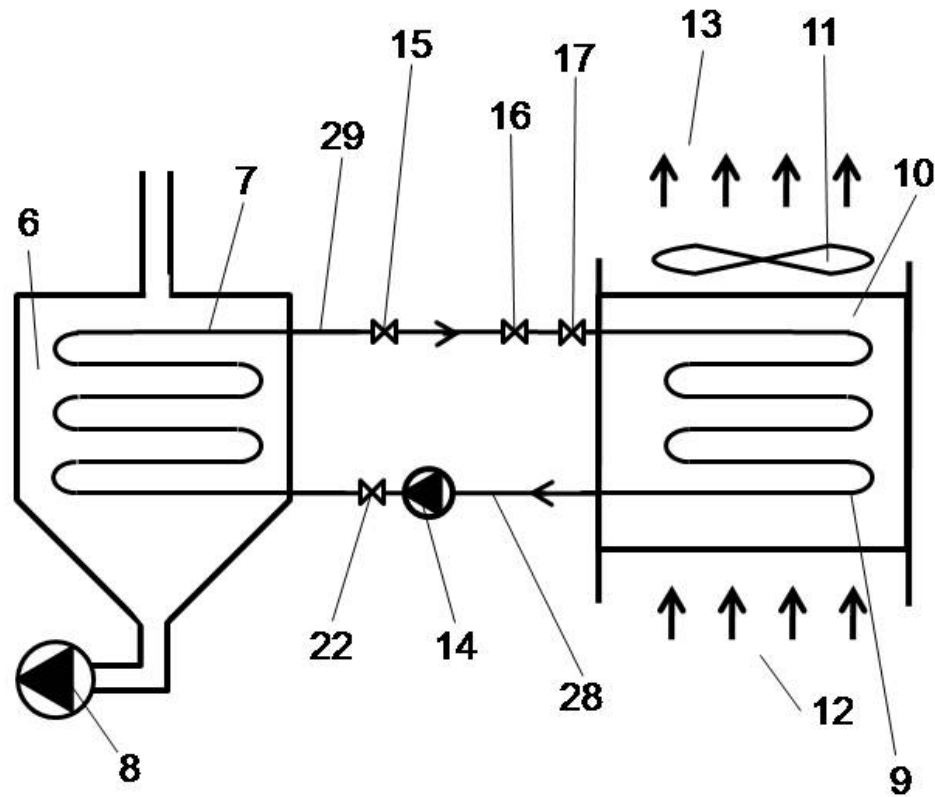
Almacenamiento negativo. Dry cooling

- Sistema de refrigeración de centrales térmicas que consta de un circuito cerrado de líquido que se refrigera en un aero-refrigerador, por cuyo exterior es impulsado el aire atmosférico, contando además en el circuito cerrado con un depósito de gran tamaño, o aljibe del mencionado líquido, que puede enviar dicho líquido a ser enfriado en el aero-refrigerador cuando el aire exterior tiene temperatura inferior a la temperatura del líquido del aljibe, y la central térmica no está funcionando; o puede enviar el líquido al foco frío del ciclo de potencia de la central térmica, cuando ésta está funcionando y la temperatura del líquido del aljibe es inferior a la temperatura que puede alcanzar el líquido en su enfriamiento a través del aero-refrigerador, según la temperatura del aire atmosférico

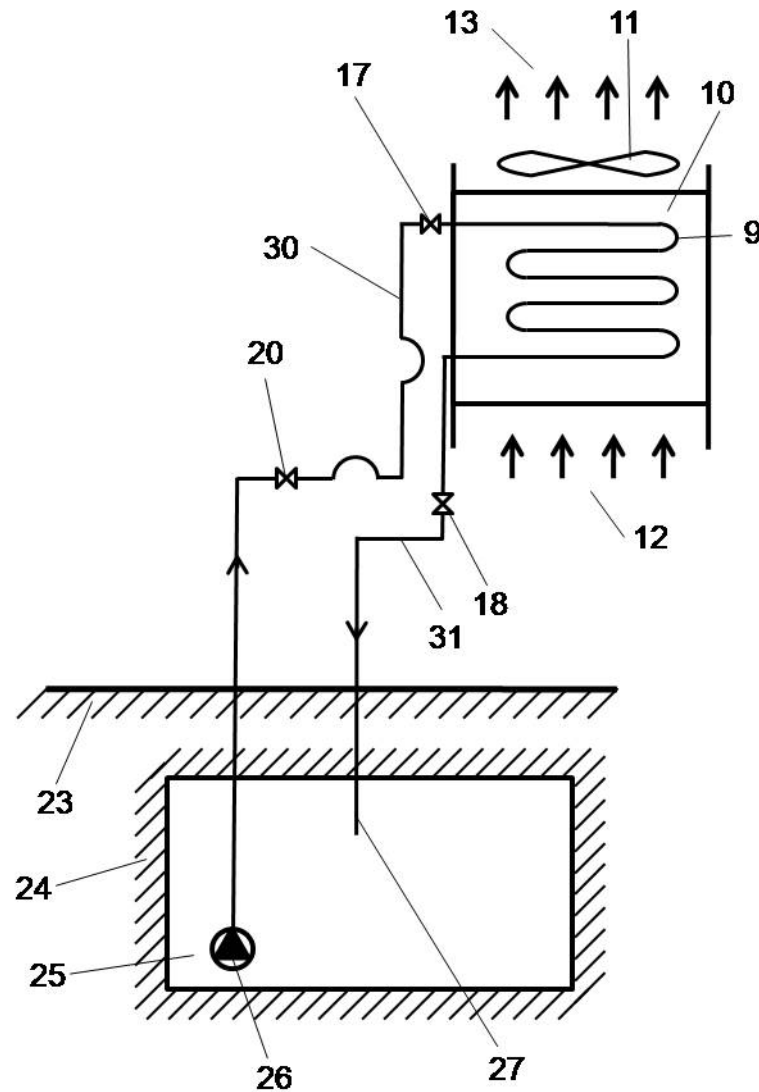
Almacenamiento negativo. Dry cooling



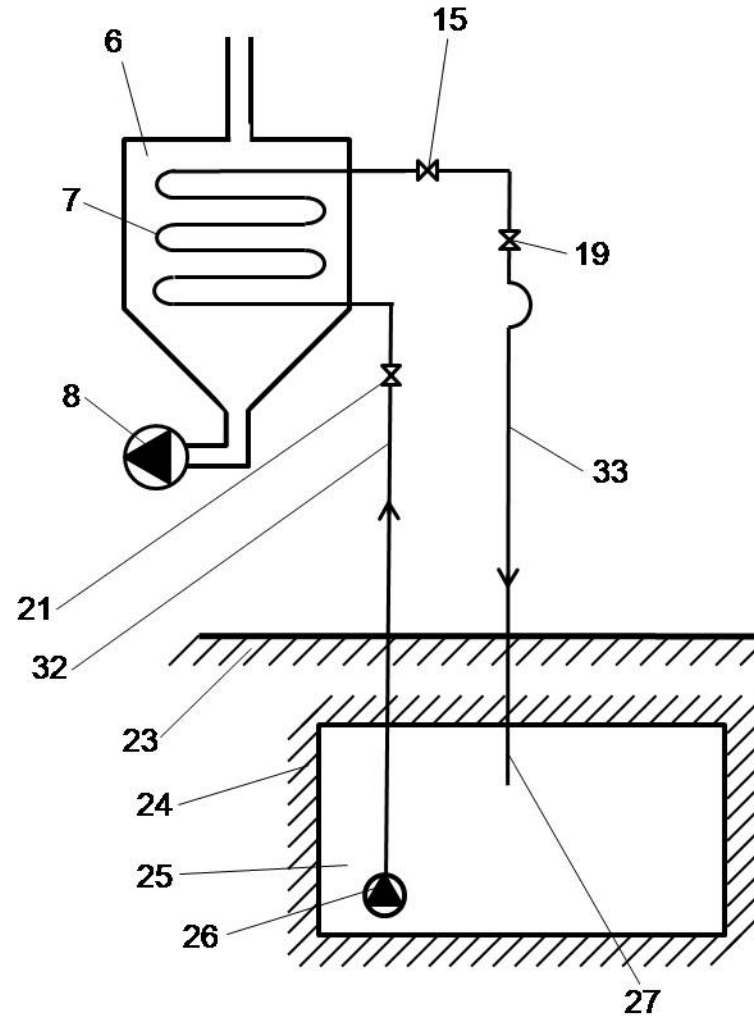
Almacenamiento negativo. Dry cooling



Almacenamiento negativo. Dry cooling



Almacenamiento negativo. Dry cooling



Conclusiones

- **La Solar Termo-eléctrica tiene en el Almacenamiento Térmico un aliado natural de gran potencialidad**
 - Incrementa notoriamente la garantía de suministro
 - Encarece la instalación, por exigir instalaciones específicas, más un Campo Solar mayor.
- **Debe cuidarse la gestión exergética del calor captado**
 - Minimizar pérdidas de T
 - Aplicar el calor a los momentos de alta demanda
- **Proporciona gran flexibilidad:**
 - Maximizar retorno económico
 - Refrigerar sin consumo de agua y buen rendimiento