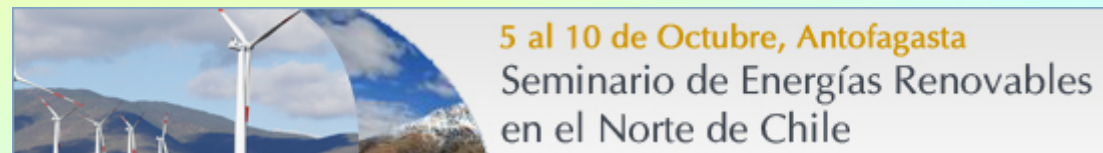


CSP: INTEGRACIÓN ENTRE SISTEMAS SOLARES DE CAPTACIÓN Y SISTEMAS DE GENERACIÓN



Ciemat

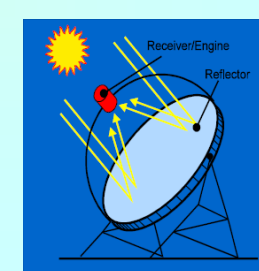
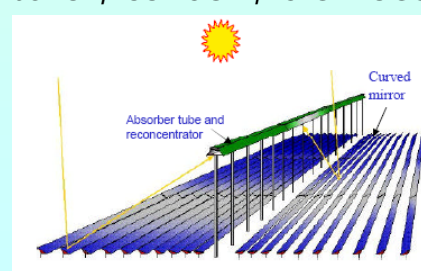
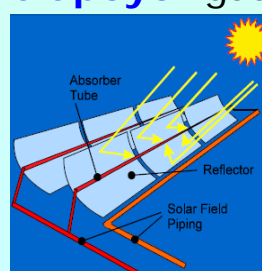
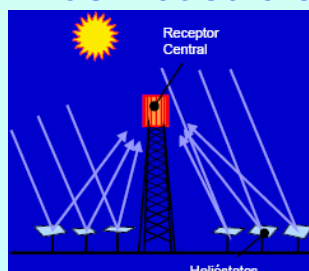


Luis E. Díez
Ingeniero Industrial

SERLED
CONSULTORES

OPCIONES TECNOLÓGICAS CSP

- La **generación solar termoeléctrica (CSP)**, mediante sistemas de captación que concentran la radiación solar para alcanzar altas temperaturas y sistemas de conversión de la energía térmica en electricidad, **dispone de múltiples opciones tecnológicas, integrables en esquemas de plantamuy diversos:**
 - **Sistemas de captación:** torre, cilindroparábolas, lineal Fresnel, discos
 - **Sistemas de conversión:** Rankine, Brayton, CC, Stirling
 - **Sistemas de almacenamiento:** líquido doble tanque, sólido, termoclina, cambio de fase
 - **Sistemas de hibridación:** apoyo combustible, apoyo solar
 - **Fluidos de absorción:** líquidos orgánicos, sales y metales fundidos, agua, aire atmosférico, gases presurizados
 - **Fluidos del ciclo:** agua, orgánicos, aire, gases
 - **Materiales de almacenamiento:** líquidos orgánicos, sales y metales fundidos, agua presurizada, cemento, cerámicas, rocas
 - **Combustibles de apoyo:** gas natural, carbón, biomasa



PRIMERAS PLANTAS COMERCIALES

- Estas múltiples posibilidades determinaron en el **pasado** el planeamiento y el desarrollo de **proyectos piloto de plantas CSP muy variados**, muchos ellos de torre central (Solar One, Cesa-1, CRS, Themis, Eurelios, etc.) y otros con cilindroparábolas y discos.
 - Finalmente, la **primera generación de plantas comerciales (SEGS)** se basó exclusivamente en el empleo de **colectores cilindroparabólicos** refrigerados por **fluidos orgánicos**, asociados a ciclos Rankine de **vapor de agua**, con apoyo de **gas natural** y **sin almacenamiento térmico** significativo (salvo la SEGS I).
 - Las **buenas propiedades como transmisores de calor** en fase líquida a presiones limitadas de los fluidos orgánicos permitieron diseños de **campos de captación de gran tamaño**, con buenas características operativas.



Credit: Public Domain, from DESERTEC-UK (www.trec-uk.org.uk)

PLANTAS COMERCIALES ACTUALES

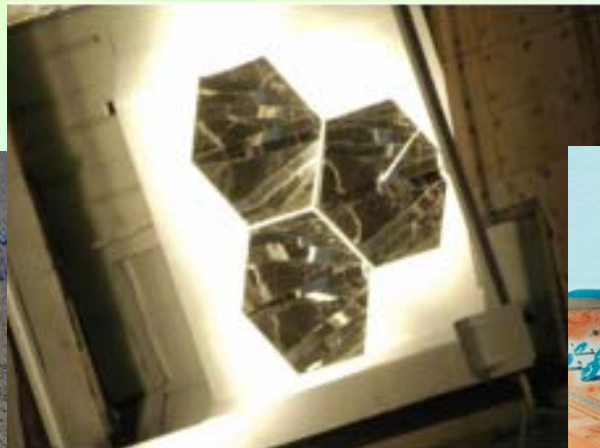
- Sin embargo, las múltiples opciones tecnológicas que ofrece la CSP se están aprovechando en la actual **segunda generación de plantas comerciales**, en la que se pueden encontrar, contando sólo con plantas operativas o en construcción de más de 5 MWe, otros **diseños ya bastante variados**:
 - **CP fluido orgánico + Rankine agua + apoyo GN+ almacenamiento sales** (varias plantas de 50 MW en España)
 - **Torre vapor saturado + Rankine agua + apoyo GN** (PS10 y PS20)
 - **Torre vapor sobrecalentado + Rankine agua** (SunTower 5 MW)
 - **Torre sales + Rankine agua + apoyo GN + almacenamiento sales** (Gemasolar 17 MW)
 - **Linear Fresnel vapor agua + Rankine agua** (Kimberlina 5 MWe)
 - **Gas Natural + Ciclo Combinado + apoyo solar CP fluido orgánico** (varias plantas ISCC 20 a 75 MW)
 - **Gas Natural + Ciclo Combinado + apoyo solar CP sales + almacen. sales** (Archimede 5 MW)



OTROS PROYECTOS

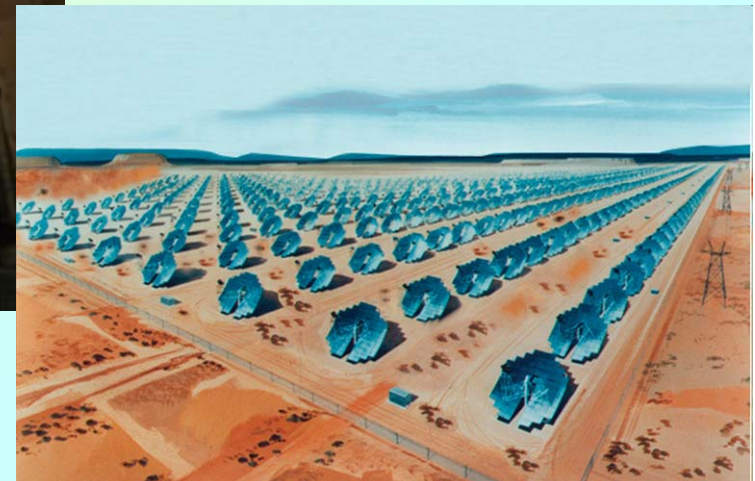
- Adicionalmente, se han construido **plantas piloto** y se encuentran en **promoción plantas comerciales** con otros **esquemas diferentes**, siempre tratando de lograr una combinación óptima de las múltiples soluciones tecnológicas disponibles, con objeto de **maximizar la rentabilidad de las plantas CSP**, teniendo en cuenta el **marco legal y económico** en cada emplazamiento y los cada vez más exigentes **requisitos ambientales**.

Credit: Ciemat



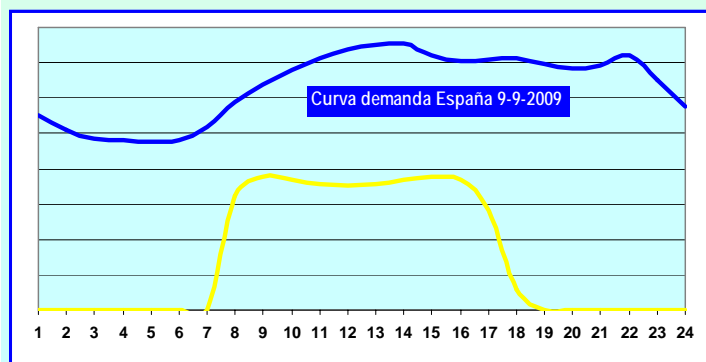
Credit: European Commission (Ref. 1)

Credit: Sandia Laboratories
<http://www.sandia.gov/news-center/news-releases/2004/renew-energy-batt/Stirling.html>



CICLOS TÉRMICOS

- Los **ciclos térmicos** empleados para generación de electricidad (Rankine, Brayton, Stirling) trabajan con **presiones y temperaturas elevadas**, que los hacen **poco adecuados** para operar con **regímenes muy variables**, tal como ocurre al seguir fielmente a la **radiación solar**, especialmente en emplazamientos con frecuente nubosidad parcial:
 - **Pérdidas de producción** por inercia térmica
 - **Reducción de vida** por tensiones térmicas
 - **Pérdidas de rendimiento** por carga parcial y parámetros reducidos
 - **Problemas de corrosión** por desprendimiento de capas protectoras
 - **Problemas diversos** por presencia de partículas



- Por otra parte, una **generación eléctrica siguiendo** totalmente la **variabilidad de la radiación solar**, similar a la de la fotovoltaica, **no es gestionable** y no cubre en absoluto la típica punta de consumo del anochecer.

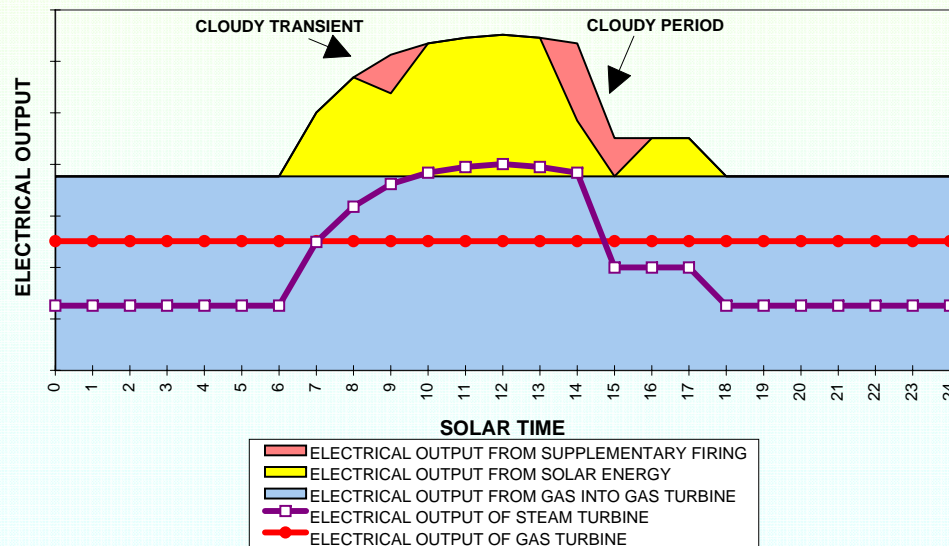
Esencial en CSP:
HIBRIDACIÓN Y/O ALMACENAMIENTO TÉRMICO

HIBRIDACIÓN CON APOYO DE COMBUSTIBLES

- La **hibridación con gas natural**, con un **mínimo almacenamiento térmico**, de líquido orgánico o agua a presión, es el esquema **más habitual** en las **plantas CSP** que ya operan en el mundo (ejemplos SEGS II a VIII, PS10 y PS20, Puertollano)
 - **Gran sencillez tecnológica**
 - **Bajos costes de inversión**
 - **Mejora de la operabilidad y gestionabilidad**
 - **Mejora de la rentabilidad** (según regulación)
- Estas **plantas CSP híbridas** están optimizadas para la generación eléctrica a partir de energía solar, con un **apoyo limitado de gas natural**, quemado en calderas, y un **bajo rendimiento de conversión del gas a electricidad**, muy inferior al alcanzado en una central de ciclo combinado.
- Por el **bajo rendimiento** de conversión del **gas natural**, del orden del 30%, su **participación anual está restringida** por las regulaciones, lo que **limita bastante el impacto de la hibridación** en la estabilidad operativa de estas plantas y en la gestionabilidad de su producción.

HIBRIDACIÓN CON APOYO SOLAR

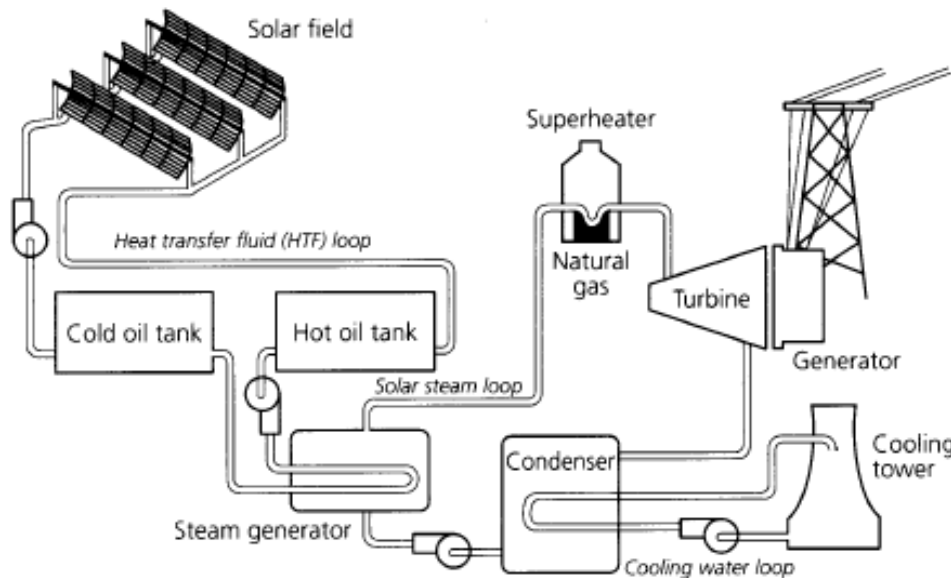
- En cambio, en varias de las **nuevas plantas CSP híbridas** sin almacenamiento significativo actualmente en proyecto en varios países del mundo (**plantas ISCC**) **el esquema se invierte**, siendo plantas de gran potencia optimizadas para la generación eléctrica a partir de gas natural, en ciclo combinado, con un **apoyo limitado de energía solar** al ciclo de vapor.



- En este tipo de plantas la **estabilidad operativa** de la planta es **muy alta** y su **gestionabilidad también**, además de minimizarse el coste de la generación solar.
- Sin embargo, la **participación solar es baja**, entre el **5% y el 10% en media anual**.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO

- El **almacenamiento térmico** como **método básico para estabilizar la operación** de una planta CSP y **gestionar su producción** de electricidad, sin contar con la hibridación, sólo se ha empleado en la primera planta CSP comercial, la **SEGS I** de 13,8 MWe.

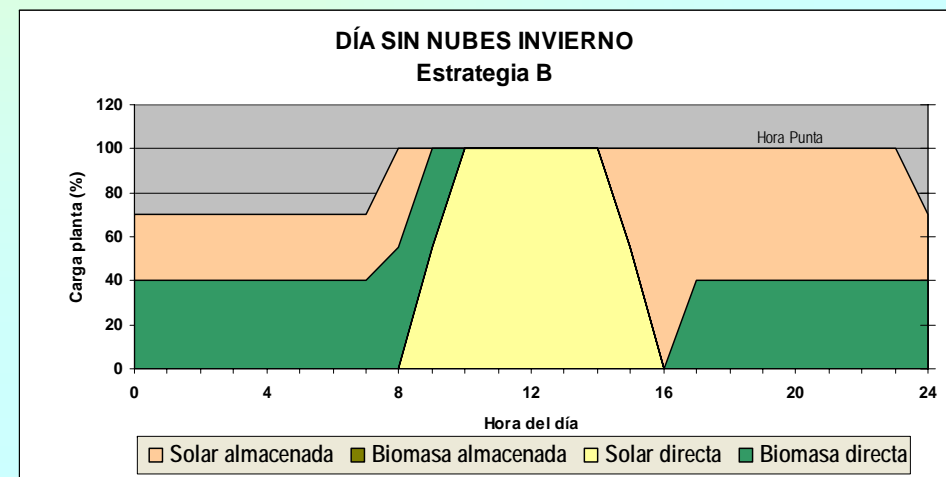
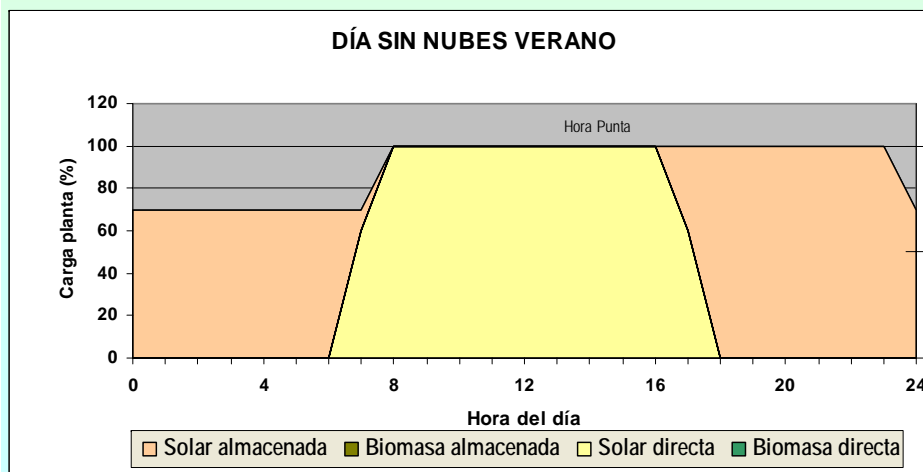


- Esta planta no renunciaba al apoyo permitido de **gas natural**, pero lo empleaba para **sobrecalentar el vapor**, por lo que su estabilidad operativa y gestionabilidad dependía de un **almacenamiento de aceite térmico de 3 horas** de capacidad.

HIBRIDACIÓN + ALMACENAMIENTO TÉRMICO

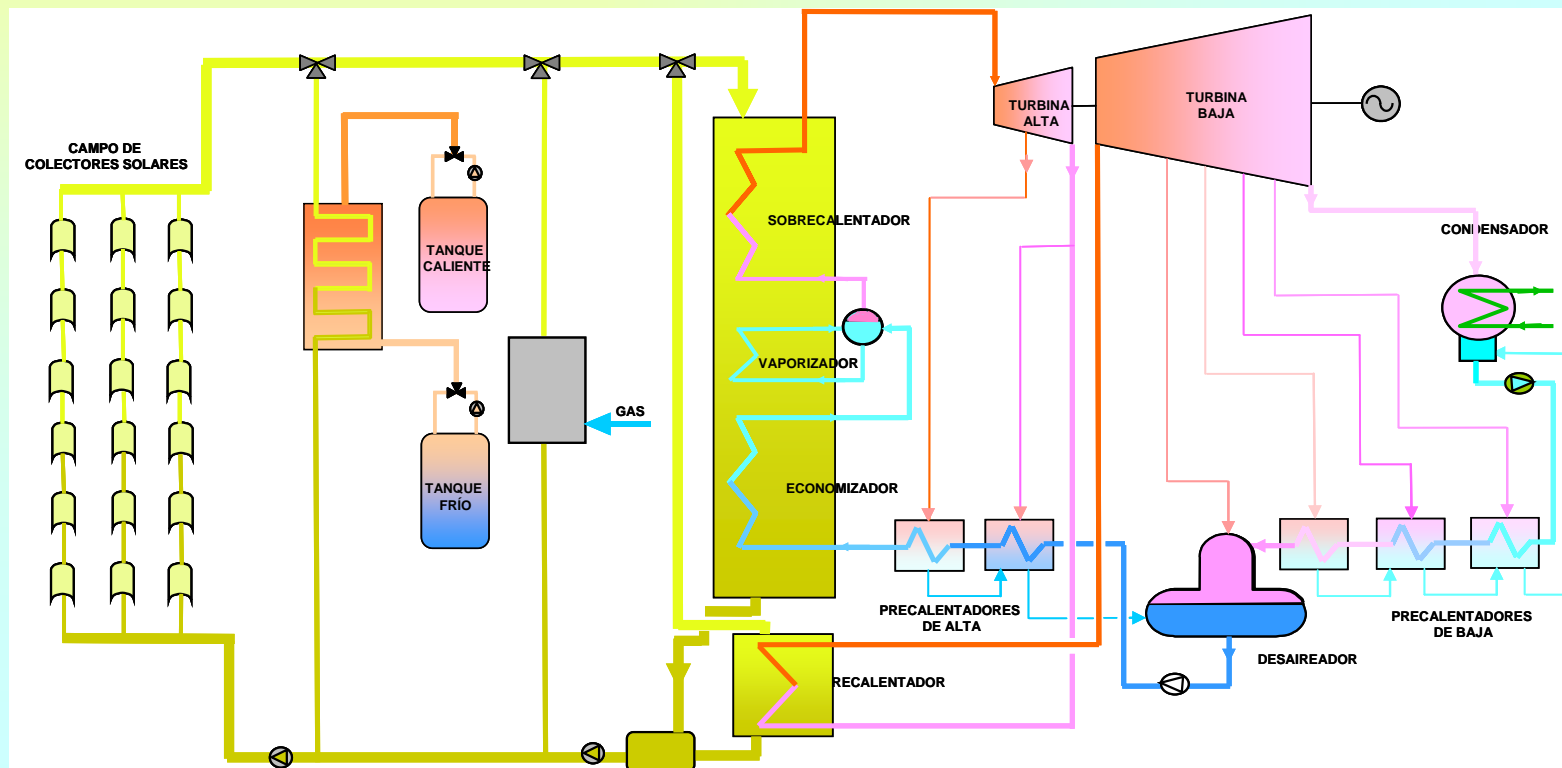
- El **almacenamiento térmico** ofrece sin embargo una **capacidad limitada** de estabilización de la operación y de gestión de la generación eléctrica, **por la disponibilidad de radiación solar y de energía almacenada**, lo que impide garantizar la potencia de diseño de la planta durante las horas punta en días nublados y en días de baja irradiación media.
- Por ello, en general se prefiere **combinarlo con la hibridación**, ya que ambos sistemas **se complementan perfectamente** y llevan la **estabilización** de la operación y la **gestionabilidad** de la producción de las plantas CSP a **niveles óptimos**.

Credit: Serled Consultores



HIBRIDACIÓN + ALMACENAMIENTO TÉRMICO

- Además de otras en construcción, ya existe una **planta en operación** en el mundo que integra **hibridación y almacenamiento** térmico de varias horas de capacidad: **Andasol-1**, de **50 MWe**, con un **15%** de participación anual de gas natural y **7,5 horas** de almacenamiento de sales fundidas.



Credit: Serled Consultores

INTEGRACIÓN ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE SALES

- Sin embargo, la **integración de almacenamiento** térmico en las plantas CSP **no es aún sistemática** porque en la actualidad sólo se considera **técnicamente probado, de bajo riesgo y con coste asequible** para almacenar energía a gran escala el almacenamiento de calor sensible en **sales fundidas** mediante un diseño de doble tanque, como el empleado en Andasol-1, que desafortunadamente **se integra de forma poco óptima en ese tipo de plantas y no es aplicable** en plantas CSP que emplean **agua** como fluido de absorción.

Courtesy of DOE/NREL,
Credit - Reilly, Hugh -
Sandia National Laboratories



Courtesy of DOE/NREL, Credit - Southern California Edison

- El almacenamiento térmico de sales fundidas mediante doble tanque fue **demostrado** en 1996-1999 en la planta **Solar Two**

INTEGRACIÓN ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE SALES

- La integración de un **almacenamiento de sales** en plantas CSP con **colectores cilindroparabólicos refrigerados por líquidos orgánicos**, como se ha hecho en Andasol-1 y se está implementando en otras plantas similares en construcción en España, es **rentable** en este caso, favorecida por la limitación de potencia legal de 50 MWe, a pesar de que el **acoplamiento** entre el líquido orgánico y las sales está **lejos de ser óptimo**:
 - **Temp. máxima líquido orgánico 390 °C << 600 °C límite sales**
 - **Delta T sales bajo ~ 100 °C: baja energía específica sales**
 - **Riesgos en caso de fugas en cambiadores líquido orgánico-sales**
- Con **sistemas de captación que emplean agua** como fluido de absorción, generando vapor de agua saturado o sobrecalentado, (mediante torres y fresnel hasta el momento), el **almacenamiento de sales es inviable**, por las grandes diferencias entre los calores específicos y niveles térmicos de empleo de ambas sustancias. Por ello, se están tratando de desarrollar sistemas de almacenamiento de **cambio de fase**, más apropiados para su acoplamiento con sistemas de vapor de agua.

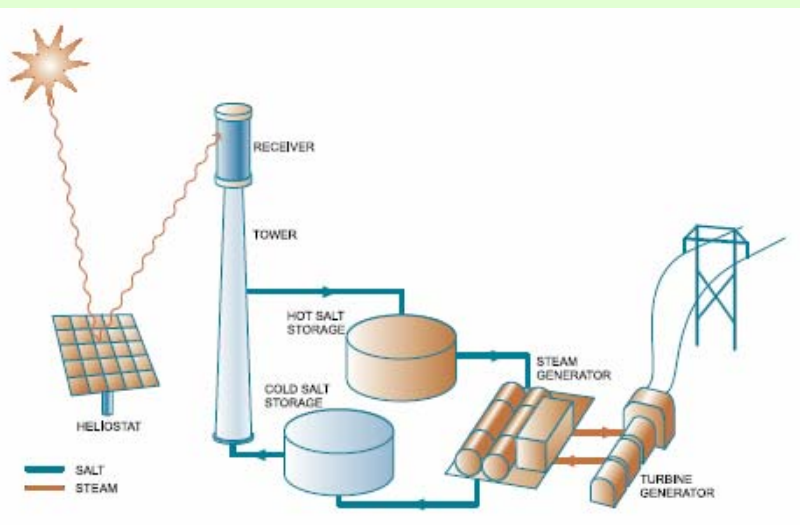
INTEGRACIÓN ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE SALES

- Los avances en el **desarrollo** de otros conceptos de **almacenamiento térmico** (**cemento y cambio de fase** fundamentalmente) podrían favorecer la integración del almacenamiento en plantas CSP con sistemas de absorción mediante líquidos orgánicos y agua.
- Sin embargo, el almacenamiento mediante **sales fundidas** también puede progresar hacia **soluciones de inferior coste**, tipo **termoclina**, con **un solo tanque** y sustitución de gran parte de la sal por **materiales sólidos baratos**.
- Ello determina el gran interés existente en desarrollar y emplear **sistemas de captación que se integren de forma óptima** con un almacenamiento térmico de **sales fundidas**, que cuando trabaja en su rango óptimo de temperaturas (entre **~300 °C y ~550 °C**) ofrece excelentes valores de **energía específica** almacenada y puede acoplarse con ciclos Rankine de **vapor de agua de alto rendimiento**.

SALES FUNDIDAS COMO FLUIDO DE ABSORCIÓN

- Para absorber la **energía solar a niveles térmicos óptimos** para su **almacenamiento** mediante **sales fundidas**, la alternativa más viable que se ha encontrado hasta ahora es el empleo de las propias **sales como fluido de absorción** en el captador.
- Dos de las plantas reseñadas que se encuentran en **construcción** (**Gemasolar** de 17 MW y **Archimede** de 5 MW) ya recurren al empleo directo de las sales como fluido de absorción de energía.

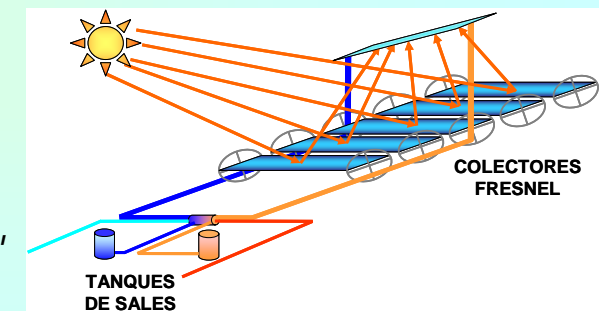
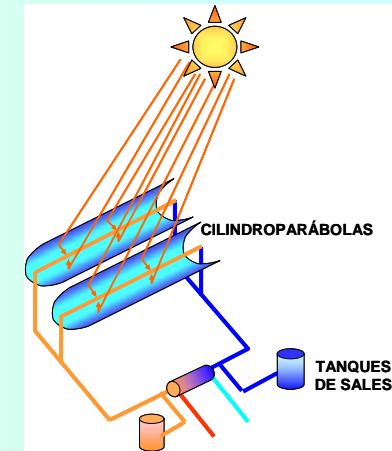
- La planta **Gemasolar**, basada en la planta piloto Solar Two, dispone de un receptor de sales en un diseño de **torre central y heliostatos**.
- Las sales alcanzarán los **565 °C** y ello permitirá maximizar su energía específica de almacenamiento y alcanzar un valor óptimo de **15 horas** de almacenamiento y **6000 horas anuales** de operación equivalente a plena carga, además de un **elevado rendimiento del ciclo** térmico Rankine de vapor de agua que integra.



Credit: SUN-LAB (Ref 3)

SALES FUNDIDAS COMO FLUIDO DE ABSORCIÓN

- En la planta **Archimede** de Sicilia se prevé calentar las **sales a 550 °C** en los tubos absorbedores de unos colectores lineales **cilindroparabólicos**, para, con **8 horas** de almacenamiento, generar **vapor sobrecalentado a 530 °C** que incremente la potencia de un **CC de gas natural**.
- El empleo de sales fundidas como fluido de absorción también se está tratando de desarrollar en sistemas de captación con **concentración lineal Fresnel**, con el objetivo de alcanzar asimismo **550 °C** de salida de las sales para, a través del correspondiente almacenamiento en tanques, alimentar un ciclo Rankine de vapor de agua. Para alcanzar este nivel térmico con un suficiente rendimiento se precisan **diseños mejorados** de colectores Fresnel.



Credit Figuras: Serled Consultores

SALES FUNDIDAS COMO FLUIDO DE ABSORCIÓN

- Todas estas plantas que emplean directamente **sales fundidas como fluido de absorción** de la energía solar se enfrentan al **reto tecnológico** de trabajar con un fluido de **alto punto de fusión** (240 °C para la sal más típica y económica) en un elemento, el **receptor o tubo absorbedor**, que no puede incorporar aislamiento ni traceado eléctrico externo.
- Ello requiere, en el caso del **receptor central**, el **vaciado nocturno** del circuito y un precalentamiento mediante radiación solar antes del llenado diario.
- En el caso de campos de **cilindroparábolas**, de inviable vaciado nocturno si son de gran tamaño, se plantea mantener las **sales circulando por la noche**, con las correspondientes pérdidas térmicas, e incorporar sistemas de calentamiento por efecto Joule para llenados y procesos de fusión.
- En **todos los casos**, la presencia de **elementos sin aislamiento** hace bastante factible la ocurrencia de **congelaciones eventuales**, que deben ser fundidas con procedimientos lentos y cuidadosos.

COLECTORES REFRIGERADOS POR GAS

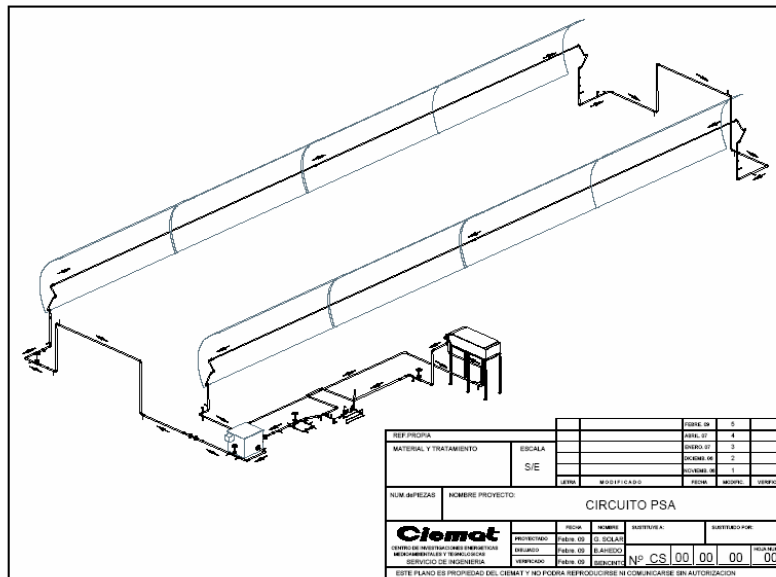
- Esta **problemática** que plantea el empleo de **sales fundidas como fluido de absorción**, especialmente delicada en el caso de los campos de colectores lineales, ha conducido a concebir y desarrollar un **nuevo concepto de planta CSP**, en el que se emplea el **almacenamiento térmico de sales fundidas** a niveles térmicos próximos al óptimo (**~550 °C**), pero evitando su empleo como **fluido de absorción**, gracias al empleo para esta función de un **gas a presión**.
 - Partiendo de una propuesta original del Profesor **Carlo Rubbia**, el **CIEMAT*** ha desarrollado y solicitado una patente de invención para este nuevo concepto de planta CSP con **colectores lineales refrigerados por gas a presión**, que ya se ha probado con CO₂ a 400 °C, con muy positivos resultados, en un lazo compuesto por 2 colectores cilindroparabólicos de 50 metros, situado en la **Plataforma Solar de Almería (PSA)**, en el sur de España.



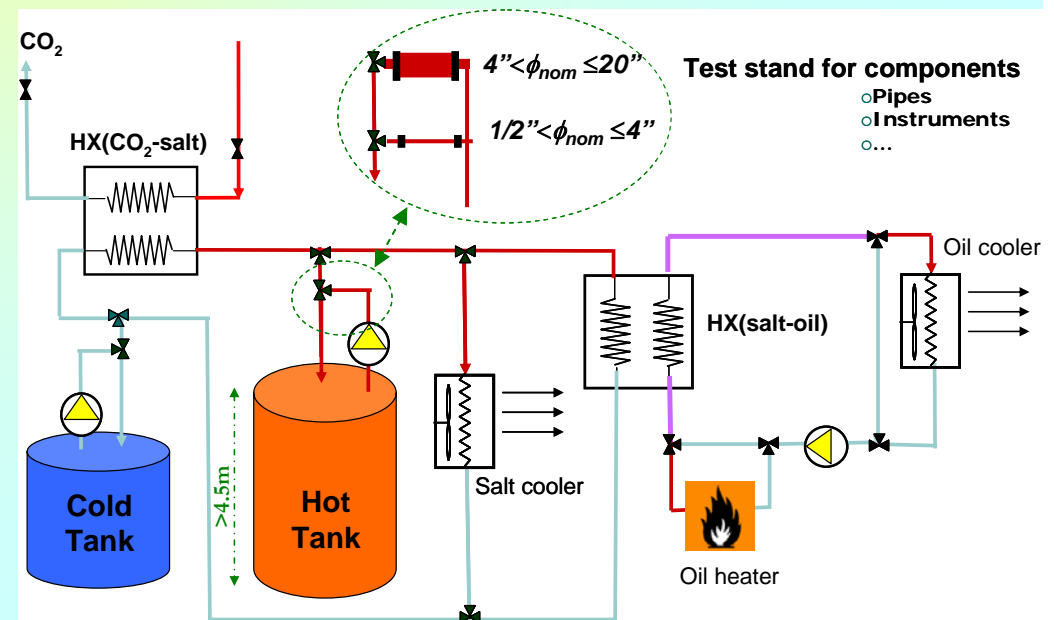
Credit: Ciemat

COLECTORES REFRIGERADOS POR GAS

- En la actualidad se está **reformando** el lazo de pruebas de la PSA para operar a **525 °C** de temperatura de salida y se está **integrando un sistema de almacenamiento de sales**, para probar la operatividad del conjunto sistema de captación - almacenamiento.



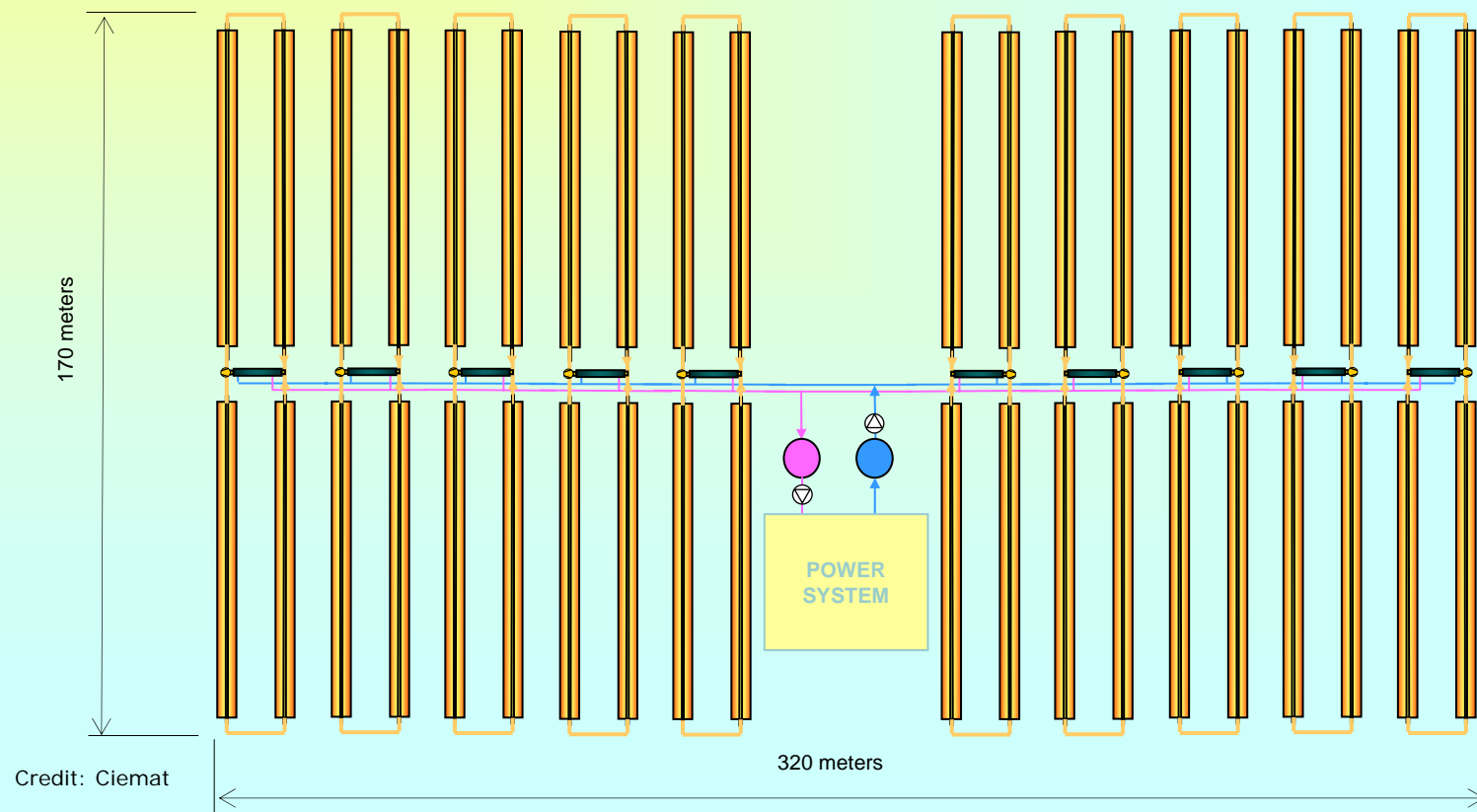
Credit: Ciemat



Credit: Ciemat

COLECTORES REFRIGERADOS POR GAS

- La siguiente fase prevista en el desarrollo es la construcción en las **Islas Canarias** de una **planta piloto** de generación de electricidad de **1,5 MWe** basada en este concepto, cuyo proyecto se iniciará en el **2010**.



COLECTORES REFRIGERADOS POR GAS

- Este nuevo concepto de colectores lineales refrigerados por gas puede dar origen a una **avanzada generación de plantas CSP** con varias **características clave**:
 - **Fluidos no contaminantes ni combustibles**: gases inertes, sales, agua
 - **Sencillez, baja inercia y flexibilidad** operativa del módulo de captación de gas, ideal para operación desatendida.
 - **Alta temperatura de captación**, minimizando el volumen y coste del almacenamiento térmico de sales fundidas.
 - **Alto nivel térmico superior del ciclo** de conversión, potenciando su rendimiento y facilitando el empleo de refrigeración seca.
 - **Adaptación** al empleo combinado de **hibridación** con combustibles **y almacenamiento** térmico de gran capacidad, ofreciendo **estabilidad operativa y gestionabilidad**.
 - **Diseño modular** del captador solar de gas, adaptable tanto a **plantas muy pequeñas**, con posibilidad de operación desatendida, como a **plantas de gran potencia**.

REFERENCIAS

Referencias:

1. EUROPEAN COMMISSION. SOLGATE solar hybrid gas turbine electric power system. Final Publishable Report. 2005.
2. NREL. Survey of Thermal Storage for Parabolic Trough Power Plants. REL/SR-550-27925. September 2000.
3. Sun-Lab. Solar Two Demonstrates Clean Power for the Future. SAND2000-613. March 2000

FIN

¡GRACIAS!