



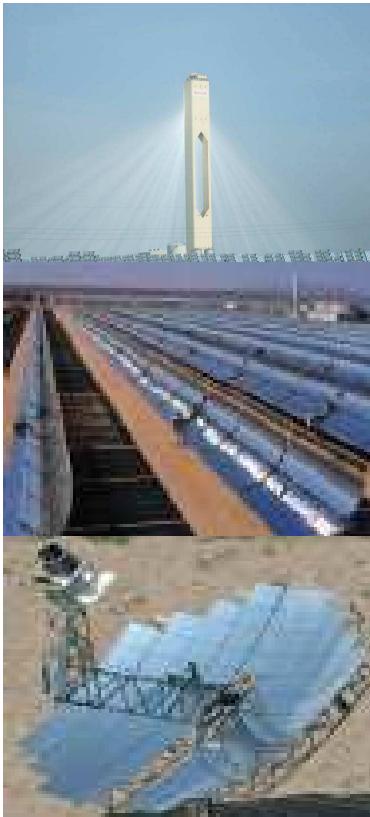
# Tecnología Solar Termoeléctrica



## Para Producción de Electricidad Solar la Conversión Solar Termoeléctrica es una de las opciones

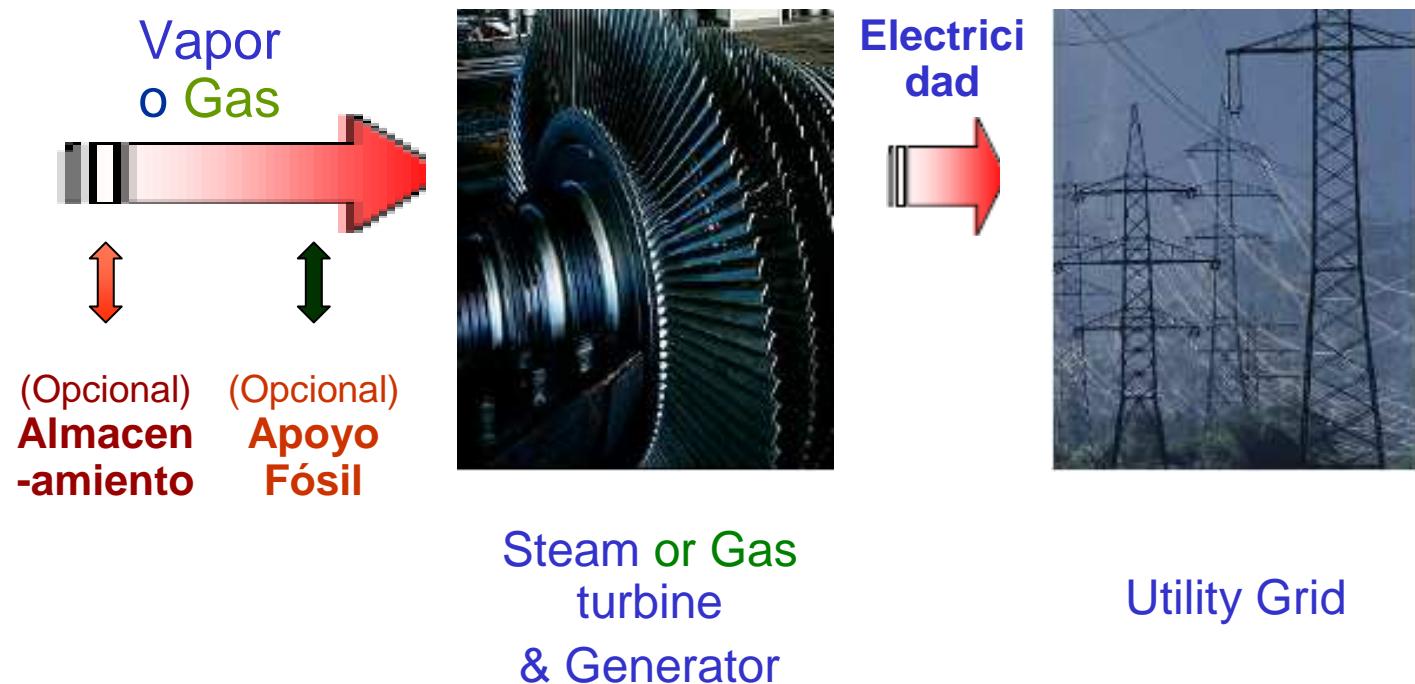


## Principio de Funcionamiento de la Solar Termoeléctrica



Concentrating solar  
collectors

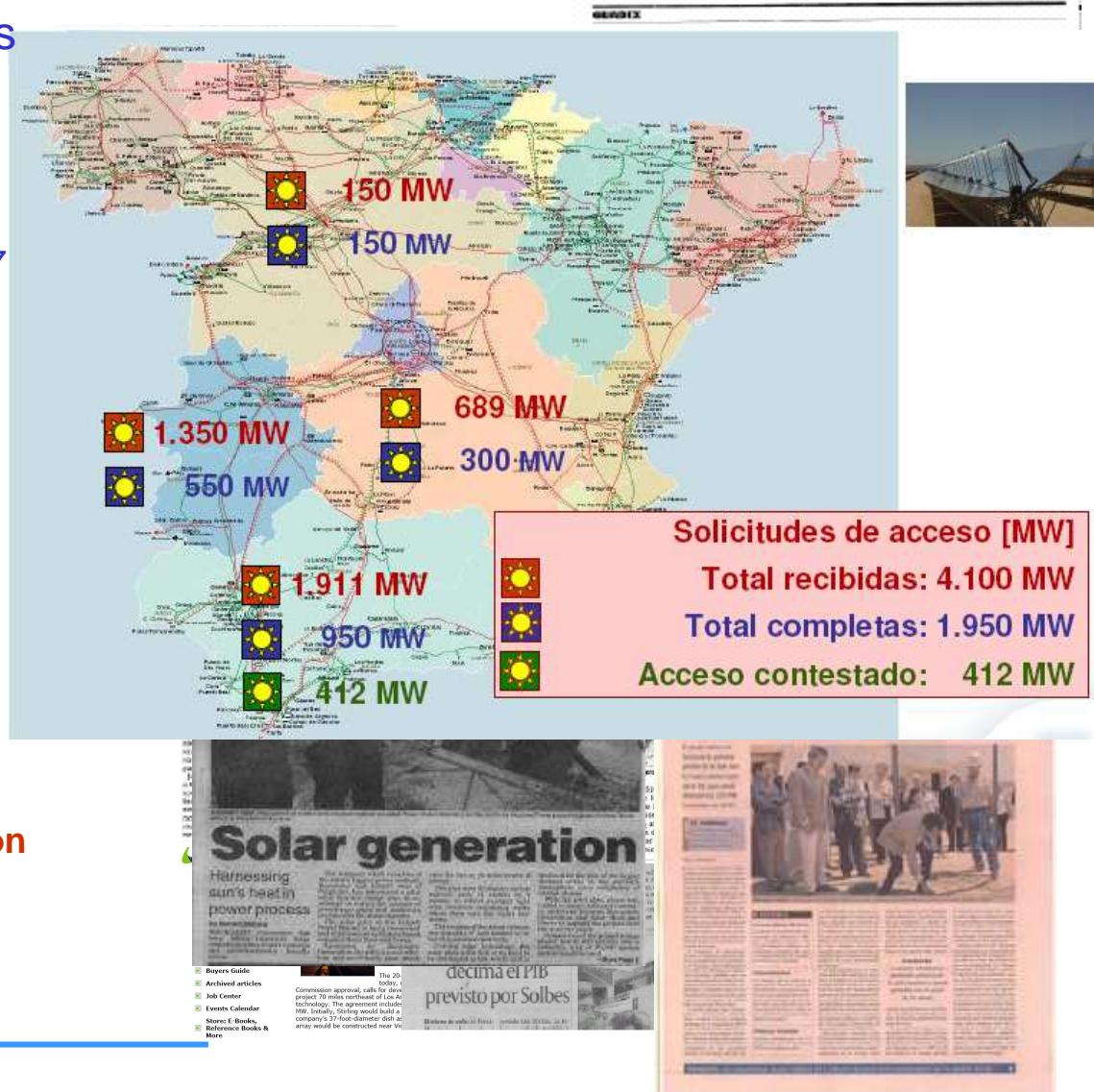
Se utiliza Energía solar concentrada para elevar la temperatura de un fluido calo portador (opcionalmente en combinación con uso de Gas Natural y/o Almacenamiento térmico) para accionar turbinas de vapor, de gas o motores de pistón y generar electricidad o una combinación de calor y electricidad.



## 2008: Primeros pasos del despliegue comercial en Solar Termoeléctrica: en España

- En España se dan condiciones especialmente favorables por varias razones:

- El actual marco de **apoyo institucional** (RD 436/ 2004 -> ~0.23 €/kWh,.. RD 661/2007 ~0.27 €/kWh,.. + incentivos europeos, nacionales, regionales, etc.)
- **Importante experiencia** en proyectos de I+D y demostración (Plataforma Solar de Almería)
- Quizá el mayor **recurso solar** a nivel Europeo
- La existencia de un **sector industrial interesado** en estos desarrollos (ABENGOA, ACS, SENER, IBERDROLA, ...ACCIONA,...)
- **2007: Inauguración de PS10 (11 MWe) y comienza la construcción de 7 nuevas plantas**
- ... **Factible construcción de los 500 MWe** que recoge el Plan de Energías Renovables (2005-2010)



# En el Resurgir de desarrollo comercial. Nivel Internacional

Por diversas **motivaciones**:

➤ **Lecciones aprendidas:**

- **A finales de los 80:** la crisis del petróleo, el apoyo institucional en California y un sector industrial interesado condujo a la construcción (en solo 7 años) de 9 plantas ESTE, con una potencia total de **364 MWe**.
- **Ahora:** el Precio del petróleo se aproxima a niveles de los 80; La Concienciación por la sostenibilidad está mas arraigada en la sociedad, los Gobiernos y la Industria (acuerdo de Kioto + Nuevo Mercado de emisiones –por CO<sub>2</sub> evitado-, etc..).

➤ **Concreción de iniciativas:**

- Globales: como la GMI (Iniciativa de Mercado Global) con objetivos de alcanzar **5000 MWe (de STPP) para 2014** o la de Greenpeace-Solarpaces: **5% de la electricidad mundial con ESTE, para 2040**, con estas tecnologías, etc.
- Nacionales, regionales y Privadas: como EE.UU (CA, TX, NV), Área Mediterránea, Oriente Medio, Sudáfrica, Australia, China, Etc.



# En el Resurgir de desarrollo comercial. Nivel Internacional

Por diversas **motivaciones**:

➤ **Lecciones aprendidas:**

- **A finales de los 80:** la crisis del petróleo, el apoyo institucional en California y un sector industrial interesado condujo a la construcción (en solo 7 años) de 9 plantas ESTE, con una potencia total de **364 MWe**.
- **Ahora:** el Precio del petróleo se aproxima a niveles de los 80; La Concienciación por la sostenibilidad está mas arraigada en la sociedad, los Gobiernos y la Industria (acuerdo de Kioto + Nuevo Mercado de emisiones –por CO2 evitado-, etc..).

➤ **Concreción de iniciativas:**

- **Globales:** como la GMI (Iniciativa de Mercado Global) con objetivos de alcanzar **5000 MWe (de STPP) para 2014** o la de Greenpeace-Solarpaces: **5% de la electricidad mundial con ESTE, para 2040**, con estas tecnologías, etc.
- **Nacionales, regionales y Privadas:** como EE.UU (CA, TX, NV), Área Mediterránea, Oriente Medio, Sudáfrica, Australia, China, Etc.

## Programa Federal (EE.UU.) de incentivos (ITC):

Incentive Pricing	Program Length	Eligible Technologies*	Program Restrictions
30% tax credit on expenditures for solar energy properties installed by 1 January 2008	1 January 2006 through the end of 2008	Solar CSP, Solar PV	For equipment installed on or after 1 January 2008, the tax credit for solar energy property is scheduled to revert back to 10%  The original use of the equipment must begin with the taxpayer or it must be constructed by the taxpayer

Note: \*Reflects most current legislation  
Source: Emerging Energy Research

## Next Stage of CSP Build-out

### Portugal

- €0.27/kWh for CSP plants smaller than 10 MW and €0.16/kWh to €0.20/kWh for plants >10 MW

### Italy

- The national agency for New Technologies, Energy and the Environment (ENEA) has developed a plan to develop solar and solar thermal energy
- Capital investment incentives can be applied for at a local level

### Greece

- A €0.25/kWh feed-in tariff on the main land; On the islands, a €0.27/kWh tariff is available

### North Africa

- Algeria, the only non-OECD country with a renewable goal, has called for 10% renewable generation by 2010, which will include CSP as an option

### Israel

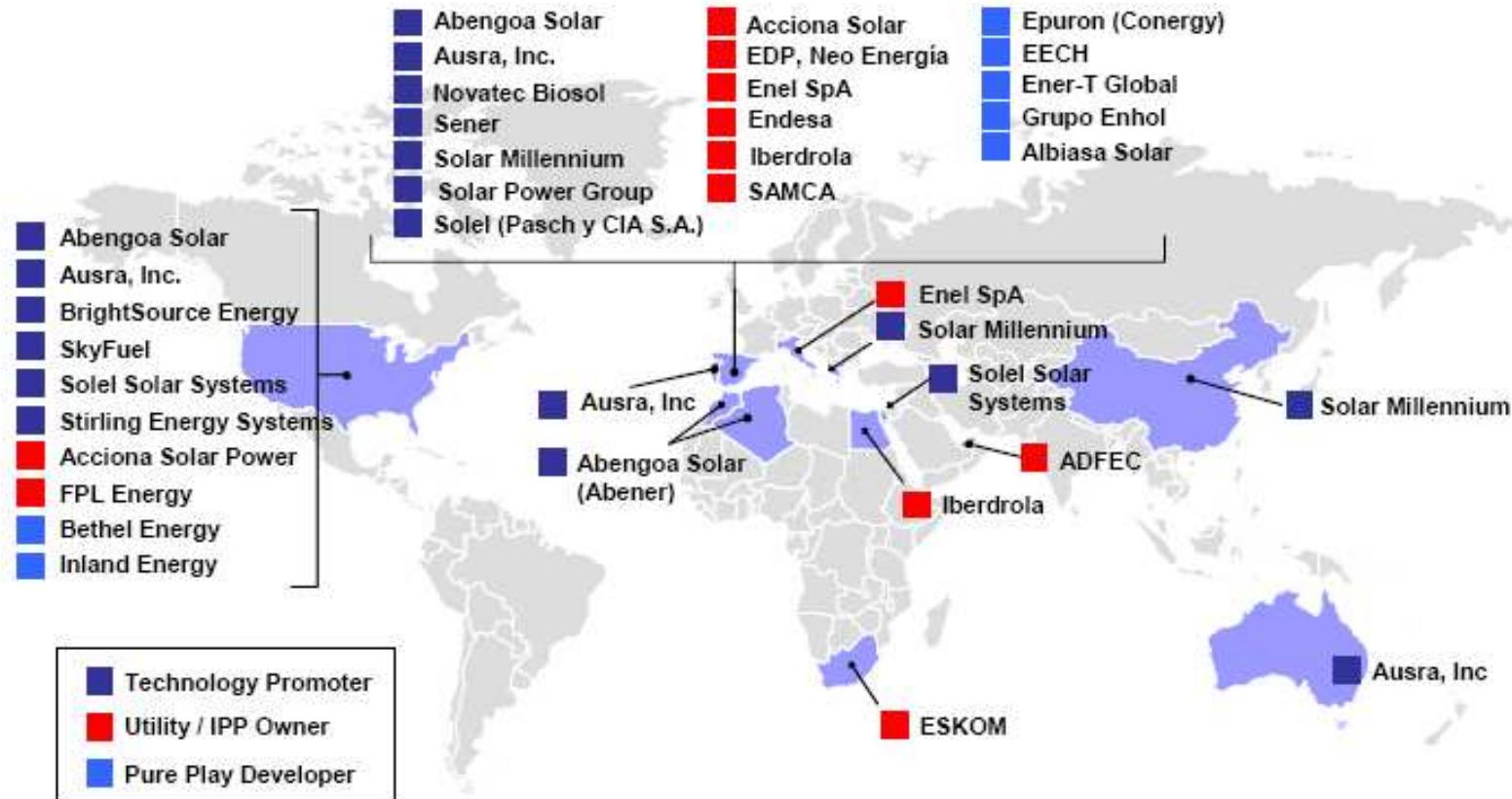
- A 20-year \$16.3/kWh feed-in tariff for solar CSP projects larger than 20 MW; For plants smaller than 20 MW, the tariff is \$20/kWh. Fossil fuel backup is limited to 30% of total generation

## Next Stage of CSP Build-out



Source: Emerging Energy Research

## A nivel Mundial: hasta 8GWe en diferentes fases de promoción con España y Estados Unidos en vanguardia



Note: ADFEC = Abu Dhabi Future Energy Company  
 Source: Emerging Energy Research

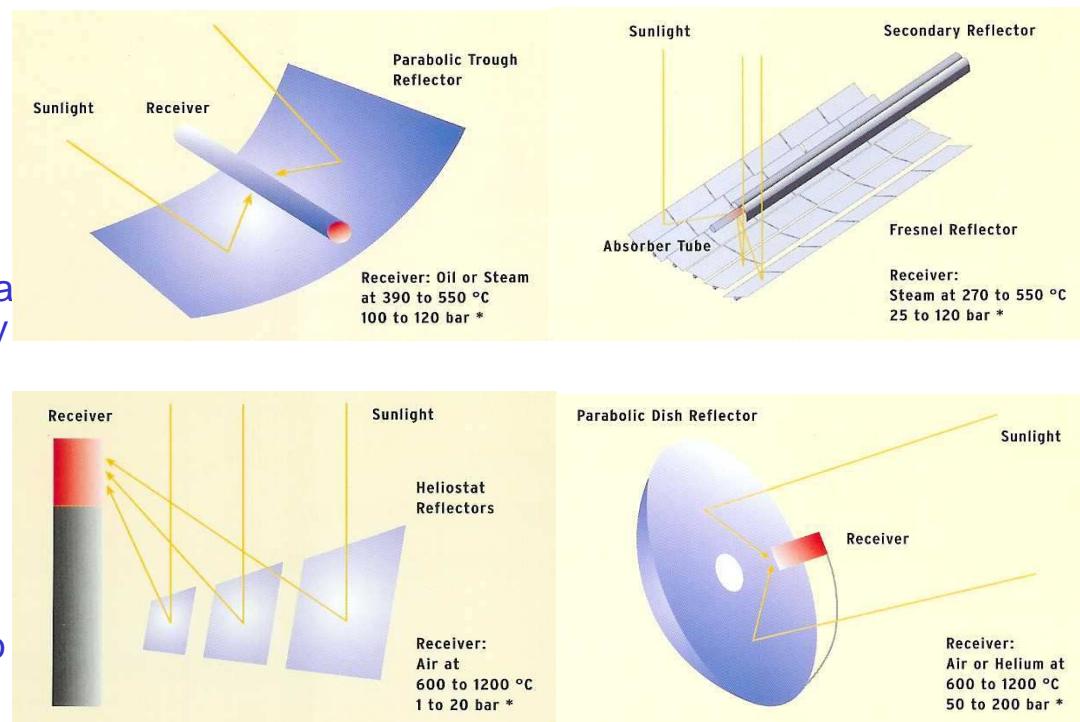


# Una revisión rápida de las TCS

# Tipologías de SCS

Tecnologías de Concentración solar se distinguen usualmente por la forma del concentrador y el receptor. Las mas usadas:

- Concentradores cilindro-parabólicos (**receptor lineal**) en el foco del concentrador. Concentrador de **simetría 1D** con forma de parábola desplazada sobre el eje del receptor y superficie continua o segmentada – Fresnel-).
- Concentradores con receptor central (en Torre) (**Receptor fijo** sobre una torre, casi-puntual localizado en zona focal y concentrador segmentado proyectado sobre el terreno, **simetría 2D**)
- Discos parabólicos (**Receptor móvil, casi-puntual**, localizado en zona focal y concentrador continuo o facetado, **simetría 2D**).



## Concentración solar térmica

- Receptor en **foco lineal**.  
**Seguimiento en 1 eje**; limitado a ~500°C. Flujos de 20-80 kW/m<sup>2</sup>.
- Ciclos de Vapor Rankine convencionales
- **Eficiencia** (anual) conversión solar-electricidad ~10-15% (media anual)
- Factor de capacidad ~ 20-50%
- **354 MWe operando** en California desde 1989 ...+ 1MWe en Arizona (2006) + **64 MWe en Nevada (2007)** + ...50 MWe Andasol 1 (2008) + (50 Andasol 2, Solnova, Extresol, ...)



## Estado de la tecnología CCP

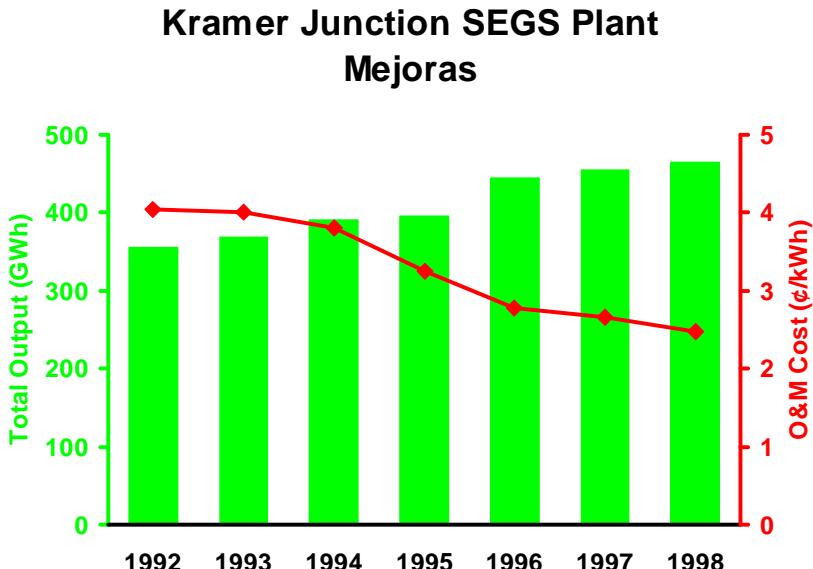
- Las plantas SEGS continúan mejorando la disponibilidad y prestaciones
- Los costes de O&M han disminuido un 30% en los 10 años de experiencia en desarrollo
  - Estos resultados son aplicables a otras plantas ESTE



KJC



DISS/PSA



En busca de reducción de coste final de la electricidad se están desarrollando conceptos prometedores como la Generación Directa de Vapor (GDV), ...

# Retos Tecnológicos en relación con las Plantas de CCP

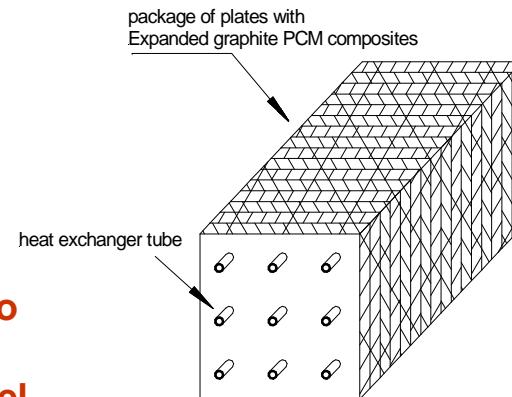
Aun siendo la Tecnología CS mas adoptada en las primeras plantas se adolece de competencia en el suministro de componentes clave: **Tubo Receptor, espejos curvados, controles locales,.... .**

Los **retos tecnológicos** generales que existen en la actualidad y cuya solución abriría las puertas a una implantación comercial masiva son (**E.Zarza**):

**1. Demostrar la viabilidad comercial de grandes plantas con *Generación Directa de Vapor***

**2. Desarrollar un sistema de almacenamiento** de energía térmica con cambio de fase, adecuado para plantas con *Generación Directa de Vapor* y con un coste específico < 20€/kWh

**3. Aumentar la temperatura de trabajo en el campo solar ( $T>400^{\circ}\text{C}$ ) para obtener mayores rendimientos en el bloque de potencia**

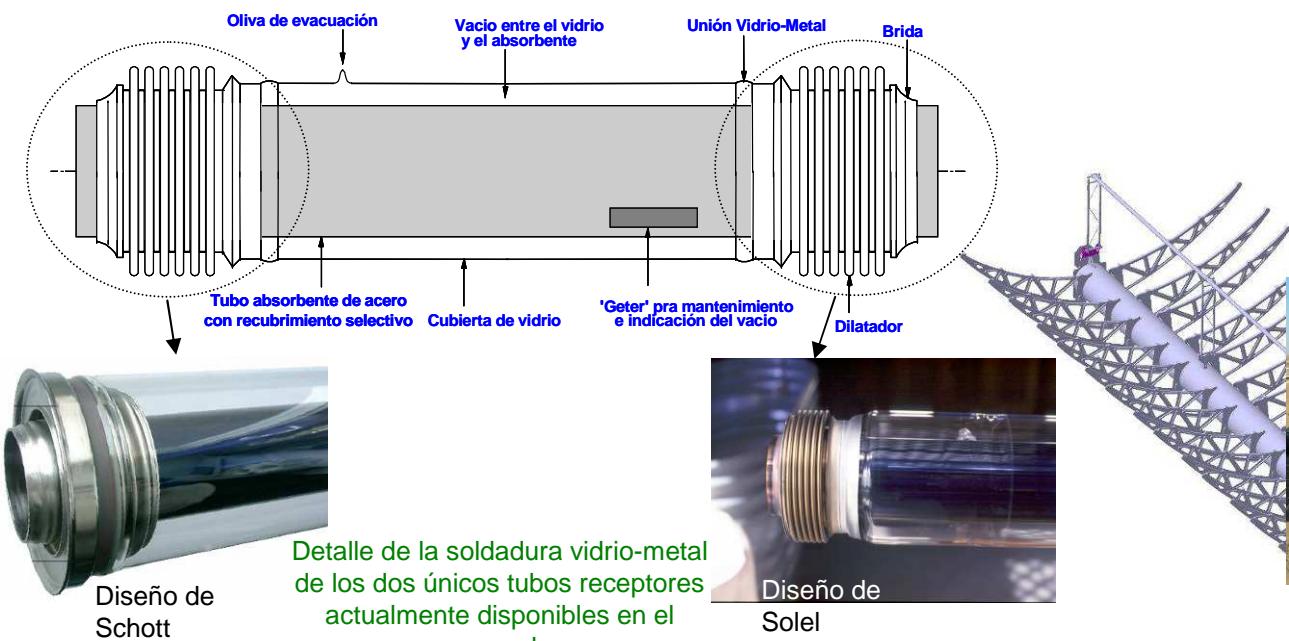


Planta experimental DISS de la PSA, usada para investigar la *Generación Directa de Vapor*

# Retos Tecnológicos en relación con las Plantas de CCP

4. Desarrollo de **diseños estructurales más económicos** para este tipo de colectores, basados en la sustitución del acero por materiales innovadores y/o **procedimientos de fabricación y montaje** que admitan un alto nivel de **automatización**, porque los diseños actuales resultan caros de fabricar y montar en campo.

5. Desarrollo de **nuevos tubos receptores de alta eficiencia** y sin soldadura vidrio/metal, ya que esta soldadura es el talón de Aquiles de este componente



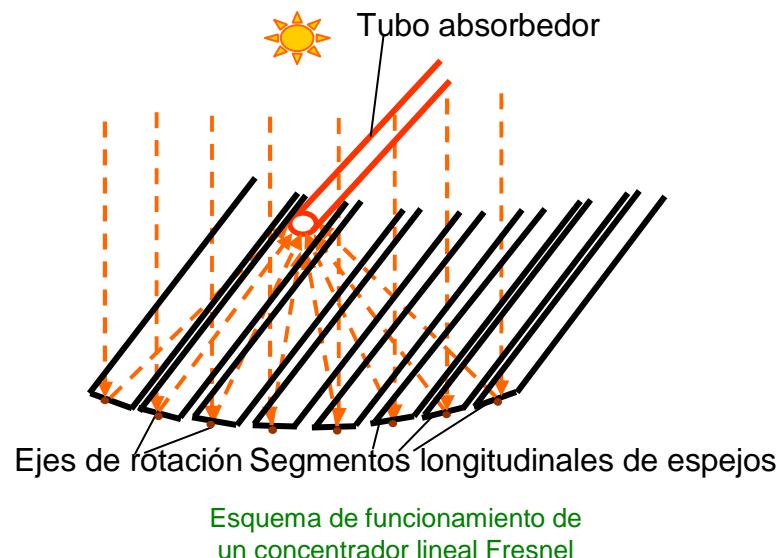
Prototipo de concentrador cilindro parabólico fabricado con composite



Nueva estructura diseñada por la empresa SENER para colectores cilindro parabólicos de gran tamaño

# Retos Tecnológicos en relación con las Plantas de CCP

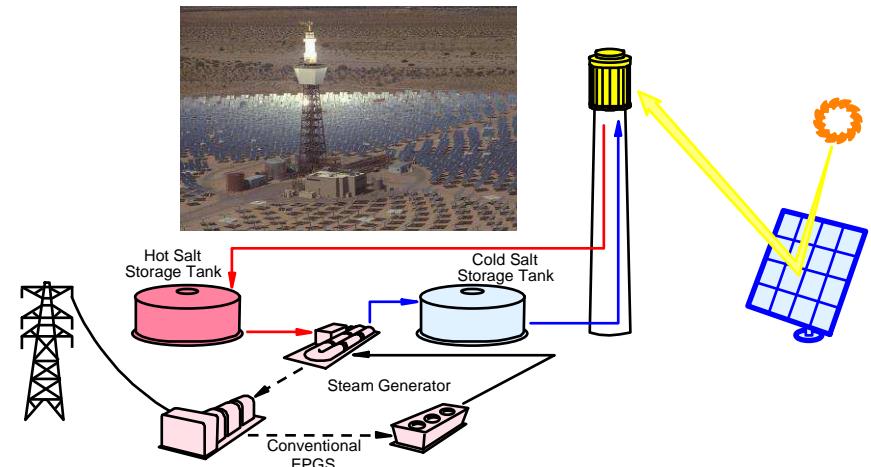
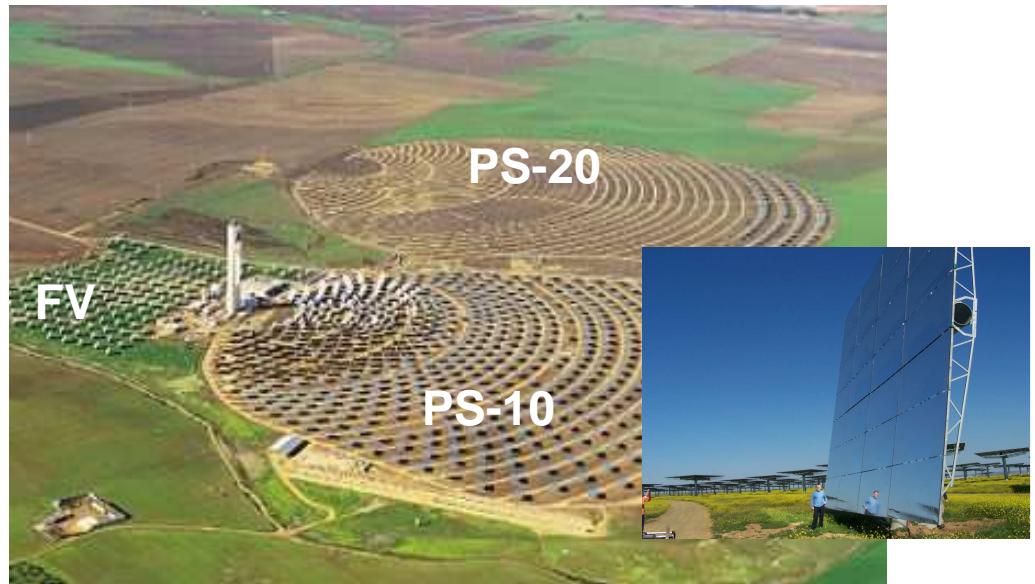
6. Evaluar experimentalmente el concepto de **Concentrador Lineal Fresnel**, porque presenta unas interesantes características teóricas (**bajo coste y menor requerimiento de suelo**) que de verificarse experimentalmente le convertirían en una opción muy atractiva comercialmente.



Prototipo de concentrador lineal Fresnel montado en Australia

# Sistemas de Receptor Central, SRC

- Seguimiento en 2 ejes,  
Temperaturas 250°C- 1100 °C.  
Flujos de 300-1000 kW/m<sup>2</sup>
- Primera planta comercial (a nivel mundial) se inauguró en Marzo. 2007 (Solucar-PS10)
- Ciclos Rankine, Brayton, Combinados
- Precedentes (demostración) Solar One y Solar Two de 10 MW y CESA-1 (1 MW)
- Eficiencias (anuales) conversión solar-electricidad: 12-16%
- Factores de capacidad hasta ~65%
- Proyectos en marcha:
  - **67 MW en España**
  - **400 MWe en EE.UU. ¿?**
  - **100 MWe en Sudáfrica ¿?**



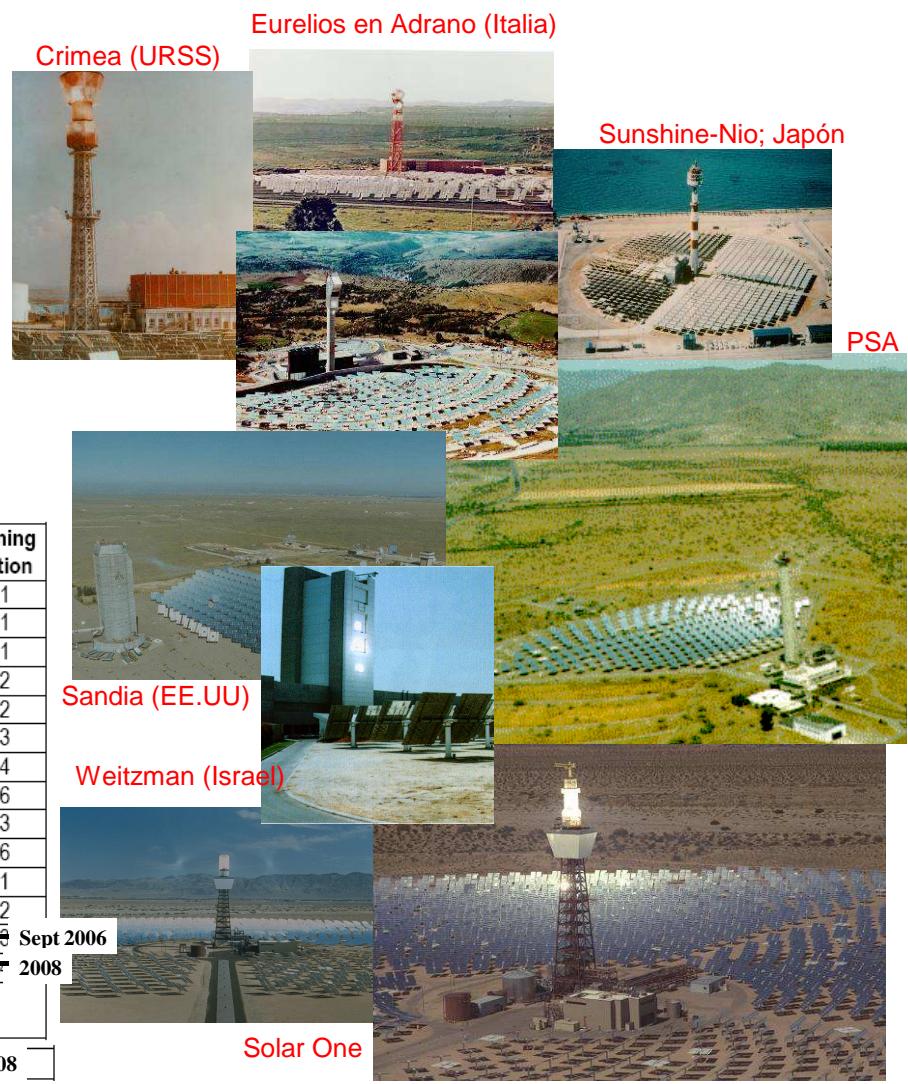
# SRC, Experiencia: Plantas de Demostración (~0.3 a 10 MWe)

- Tras las plantas de demostración, se considera probado el potencial y fiabilidad de los SRC.
- Las referencias siguen siendo Solar One-Solar Two y los dos sistemas de la PSA (CRS y CESA-1), con tres opciones tecnológicas preferentes: agua-vapor, Sales fundidas y Aire.
- Curva de aprendizaje reactivada** con PS10, PS20,...

Project	Country	Power (MW e)	Heat Transfer Fluid	Storage media	Beginning operation
SSPS	Spain	0.5	Liquid Sodium	Sodium	1981
EURELIOS	Italy	1	Steam	Nitrate Salt/Water	1981
SUNSHINE	Japan	1	Steam	Nitrate Salt/Water	1981
Solar One	U.S.A.	10	Steam	Oil/Rock	1982
CESA-1	Spain	1	Steam	Nitrate Salt	1982
MSEE/Cat B	U.S.A.	1	Nitrate Salt	Nitrate Salt	1983
THEMIS	France	2.5	Hitech Salt	Hitech Salt	1984
SPP-5	Russia	5	Steam	Water/Steam	1986
TSA	Spain	1	Air	Ceramic	1993
Solar Two	U.S.A.	10	Nitrate Salt	Nitrate Salt	1996
Consolar	Israel	0.5**	Pressurized Air	Fossil Hybrid	2001
Solgate*	Spain	0.3	Pressurized air	Fossil Hybrid	2002
PS10*	Spain	10	Steam	Ceramic	Sept 2006
Solar Tres*	Spain	15	Nitrate Salt	Nitrate Salt	2008

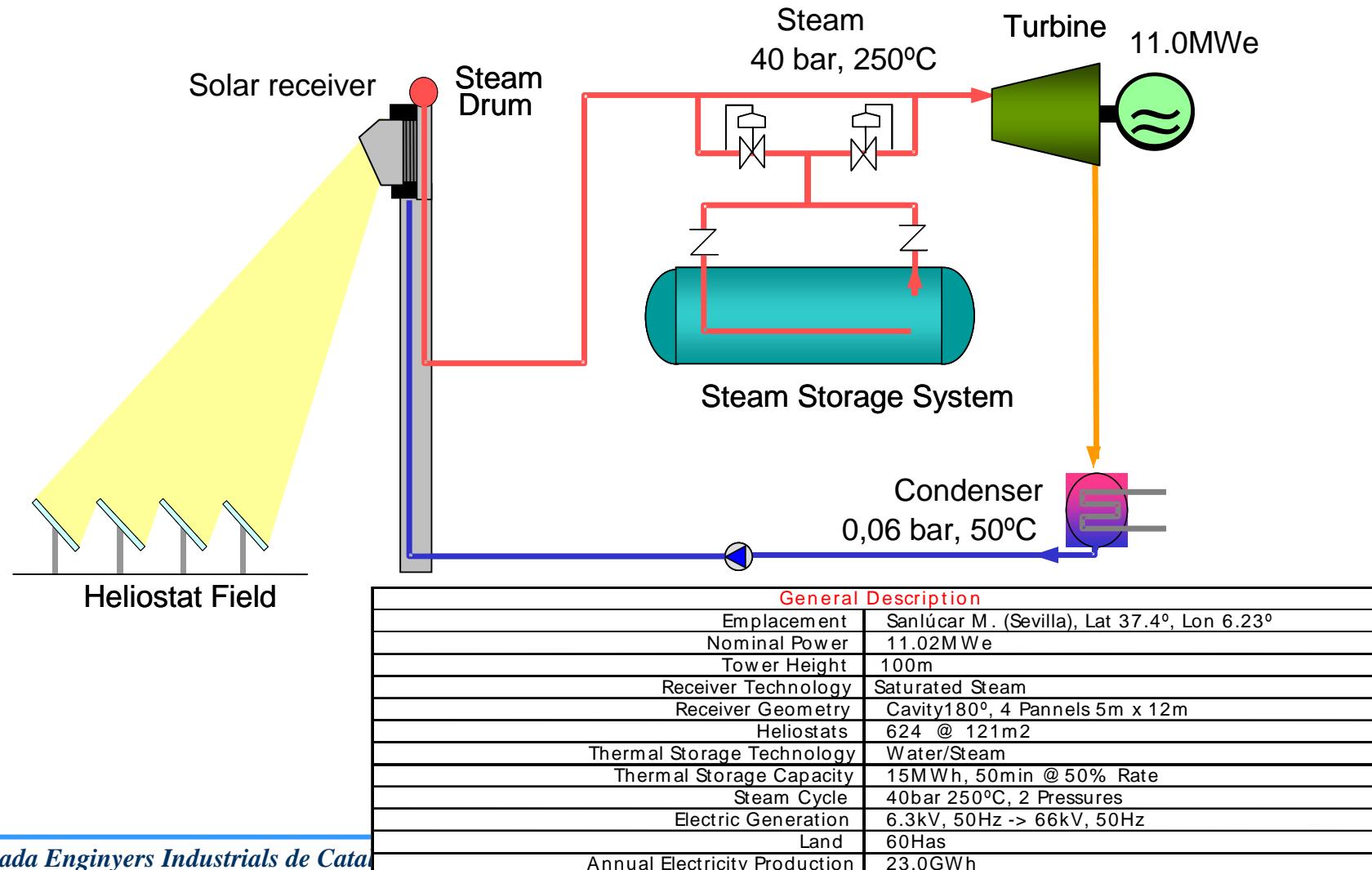
\* Projects under development.  
\*\* Thermal

PS-20*	Spain	20	Steam	Ceramic	2008
--------	-------	----	-------	---------	------

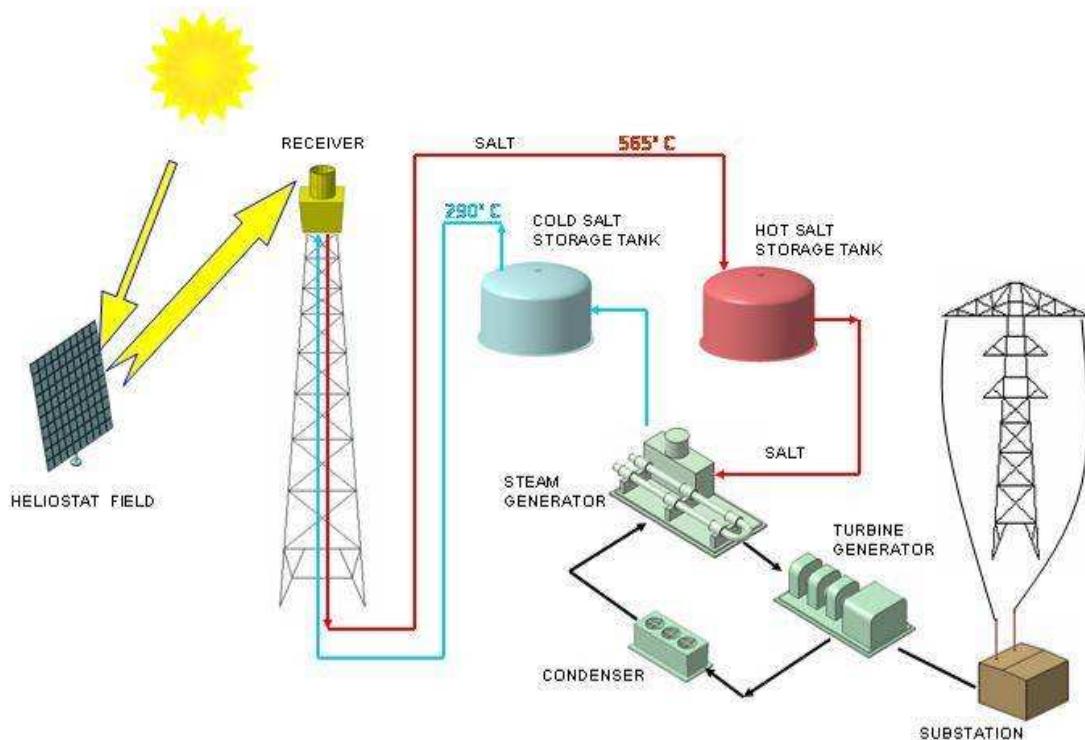


## SRC: Primeras plantas comerciales

**SOLUCAR**  **PS10**  
Sanlucar Solar Project



# SRC: Primeras plantas comerciales



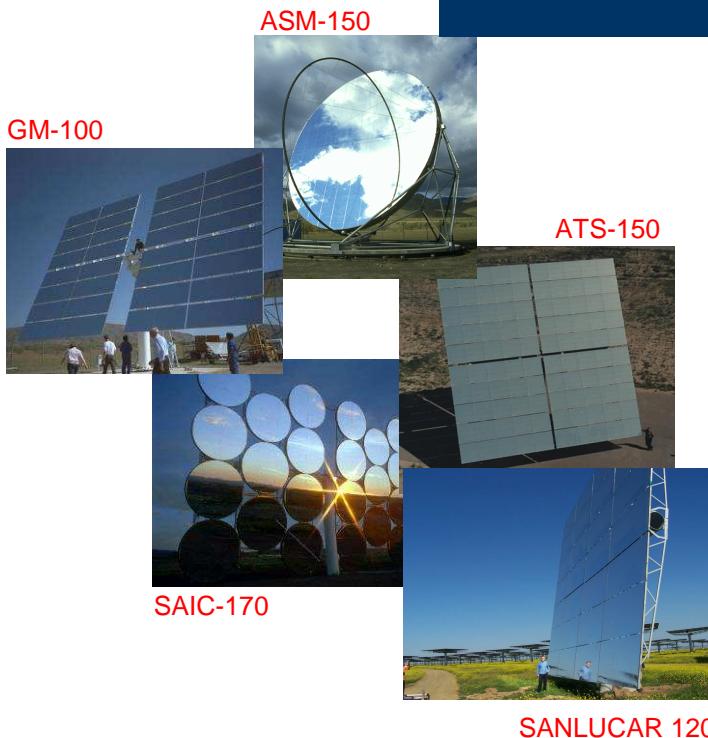
Datos Técnicos	
Superficie Reflectante del Campo de Helióstatos	264825 m <sup>2</sup>
Número de heliostatos	2750
Superficie Total del Campo de Helióstatos	142.31 Ha
Potencia Térmica del Receptor	120 MWt
Altura de la Torre	120 m
Capacidad de Almacenamiento Térmico	15 horas
Potencia de la Turbina	17 MWe
Potencia de la Caldera de GN	16 MWt

Operación	
Radiación solar normal directa anual sobre Helióstatos	2062 kWh/m <sup>2</sup>
Energía anual vendida	105566 MWhe
Producción a partir de GN	15%
Factor de Capacidad	71%

Proyecto parcialmente subvencionado por la CE (Contrato No. NNE5/2001/369), a través de un consorcio formado por SENER, CIEMAT, ALSTOM-SIEMENS, SAINT GOBAIN y GHERSA.



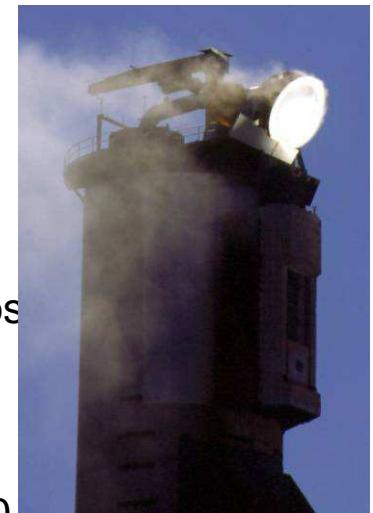
# SRC. Estado de la Tecnología



- **Helióstato:** Ha mostrado un comportamiento excelente, con tendencia a desarrollos de mayor tamaño y costes específicos menores.
  - Referencia actual:
    - Helóstatos de 120 m<sup>2</sup>
    - Oferta comercial de ~200 €/m<sup>2</sup> (instalado)
  - Aún hay potencial de reducción de costes



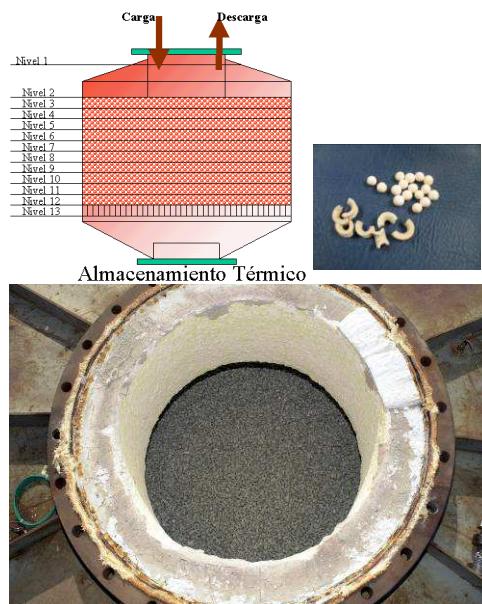
Solar Two



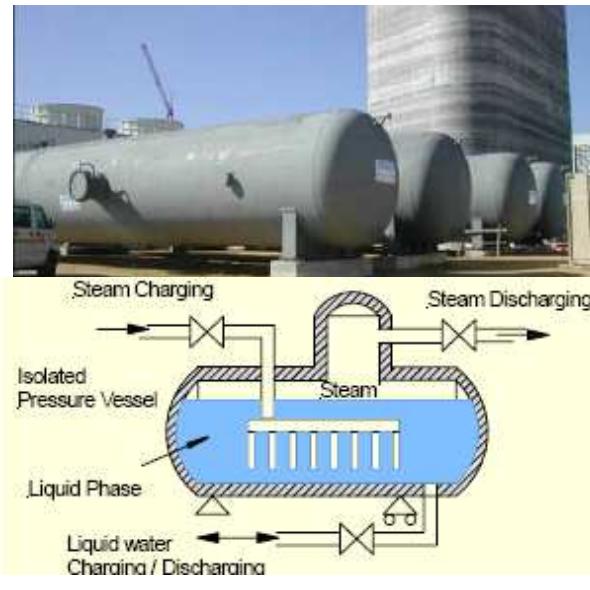
TSA

- **Receptor:** Muchas tipologías y tamaños (entre 1s KW y 10s MWs) desarrollados. Muchos desarrollos han probado la facilidad de operación y altos rendimientos (~75-85%).
  - **Pendiente demostrar la durabilidad (¿30 años?)**
  - Los **sistemas avanzados** potencian los diseños con fluidos que trabajen a temperaturas altas: vapor sobrecalentado/supercrítico (500-650 °C). Aire (700-900 °C), operables con mayores flujos solares y esquemas **hibridos**.

## SRC : Estado de la Tecnología



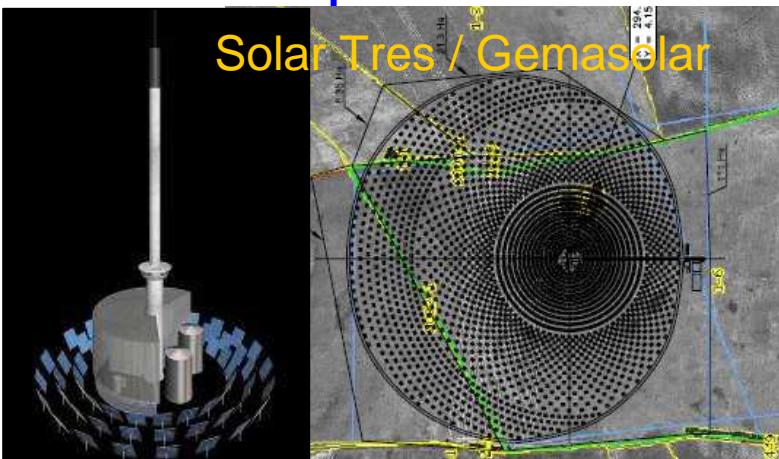
- **Almacenamiento térmico** bien **resuelto** cuando se utilizan **sales fundidas** como fluido calo portador y relativamente resuelto para **aire atmosférico**
- Para sistemas que utilizan **agua-vapor** o **aire presurizado** la solución de almacenamiento requiere **I+D+D**.
- La **reducción de costes (< ~20 €/kWh)** en los primeros desarrollos de plantas es también un reto.



TSA

## SRC: El futuro ... está aquí

- La **tecnología de aire** permitirá mayores temperaturas ( $\Rightarrow$  menores superficies de receptor y/o mayores eficiencias globales)
- La **Tecnología de sales fundidas** (tipo Solar Two) está implementándose en **Solar TRES/Gemasolar**, con mayor tamaño (17MWe y  $\sim$ 14 horas de almacenamiento térmico)
- La **tecnología de vapor** saturado, con bajo riesgo tecnológico se inaugura con **PS-10**, PS20,..Almaden 20, Probablemente **evolucionará a vapor sobre calentado**.



Jornada Enginyers Industrials de Catalunya  
19 de Noviembre de 2008, Barcelona. (Solar Termoeléctrica-F. Téllez)



PS10; ...(PS-20), AZNALCOLLAR-20

PS20 – Construcción. Junio 2007

PS10

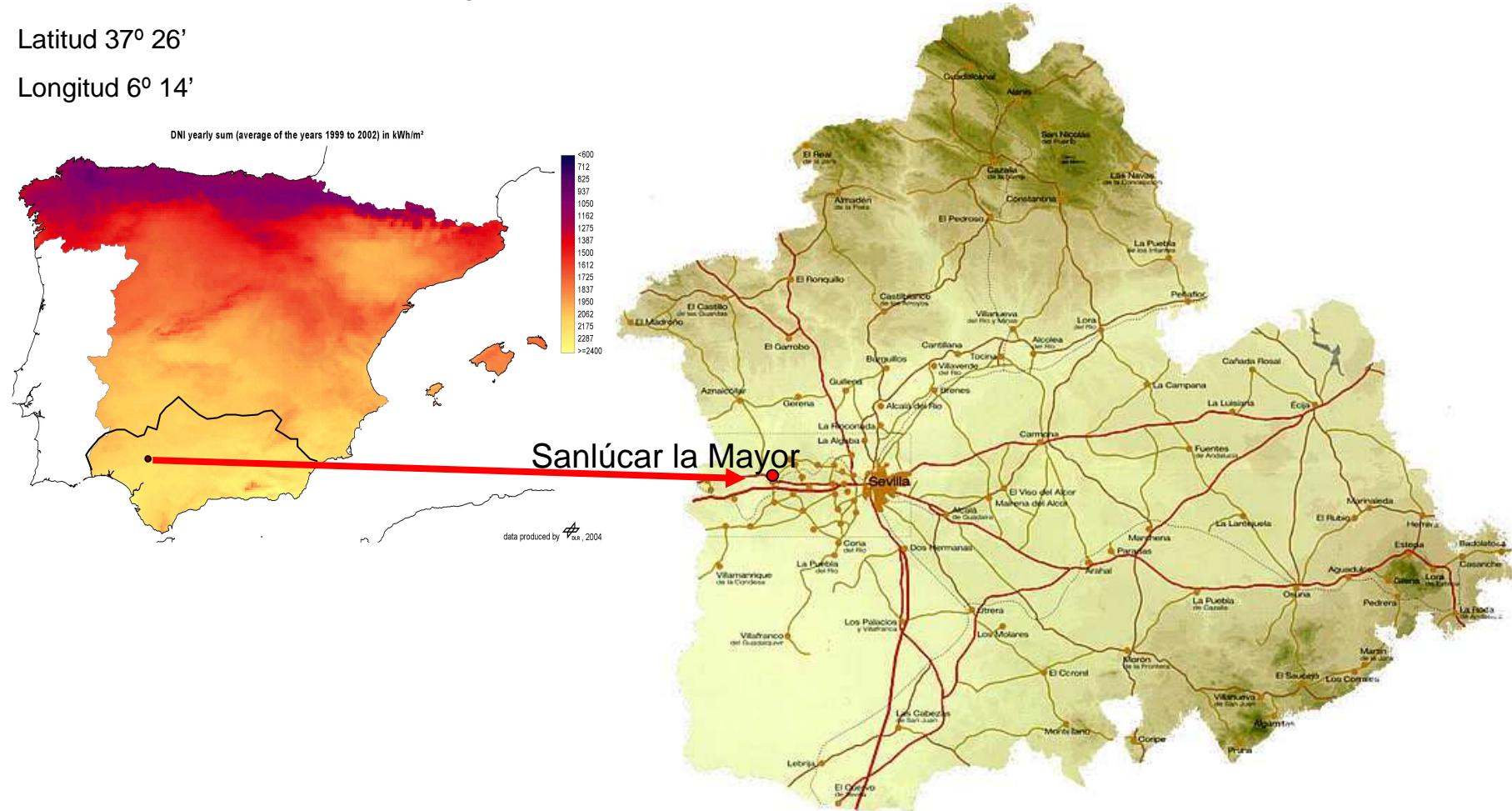
PS20

## Ubicación

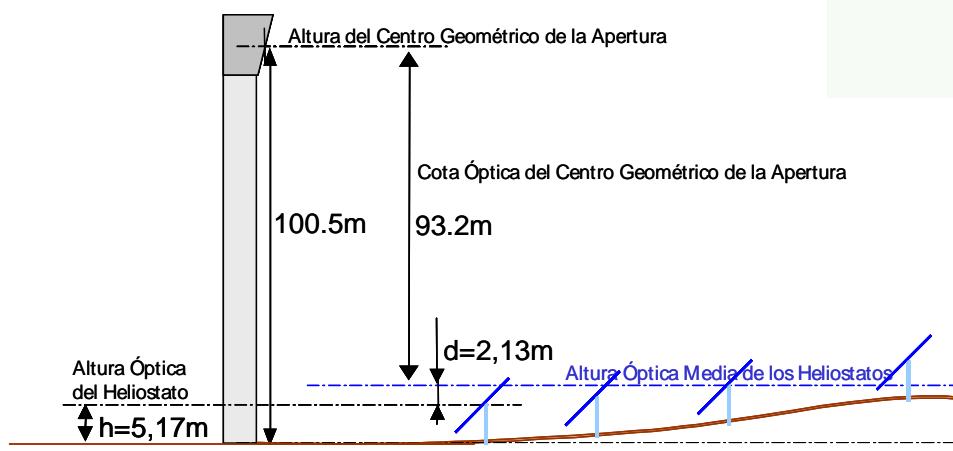
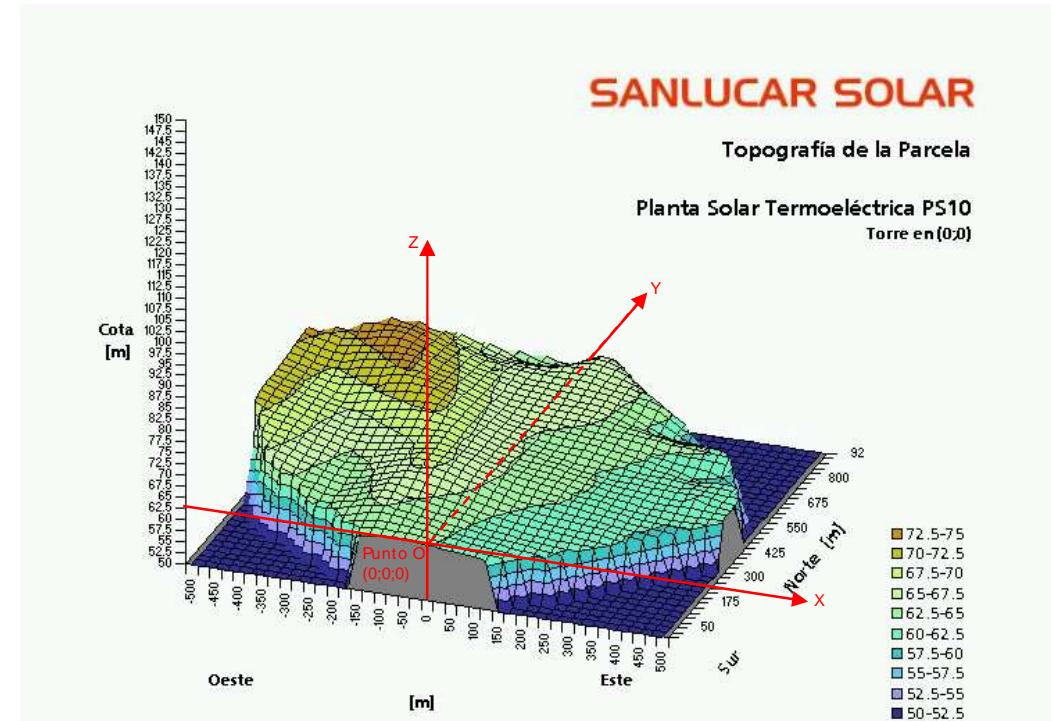
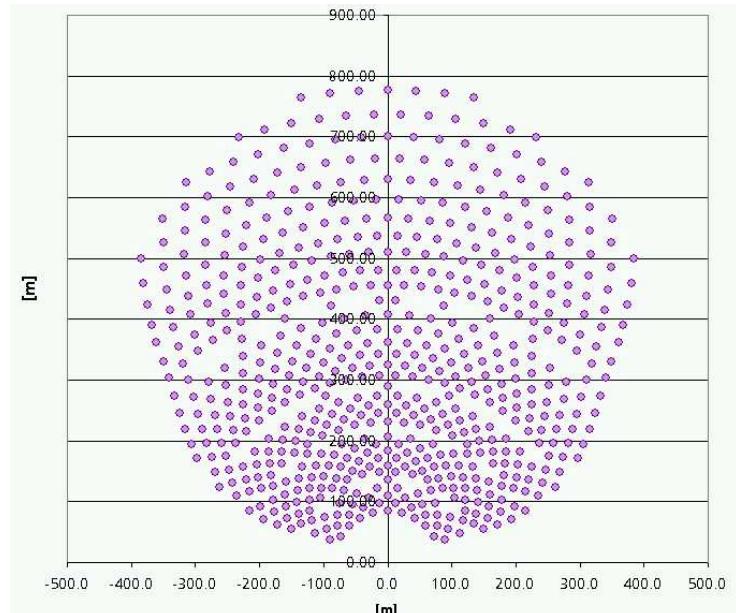
Vega del Guadiamar, Sanlúcar la Mayor, Sevilla  
Finca Casquemada, (Abengoa)

Latitud 37° 26'

Longitud 6° 14'



## Diseño del Campo de Heliostatos



- El Campo de Heliostatos es simétrico N-S. Su diseño comenzó con el levantamiento topográfico de la parcela de implantación

- Para realizar el layout de heliostatos, Solúcar y Ciemat han empleado los códigos WinDelsol, SolVer (Solúcar), Solar Concentration Toolbox (Ciemat)



## PS10, Avance de Construcción, Julio 2005



En Septiembre  
2005 se han  
implantado 200  
heliostatos, a un  
ritmo de 4  
unidades al día



## PS10, Avance en Construcción Torre, Septiembre 2005



19 de Noviembre de 2008, Barcelona. ([Solar Termoeléctrica-F. Téllez](#))

## PS10, Vista aérea Agosto 2005

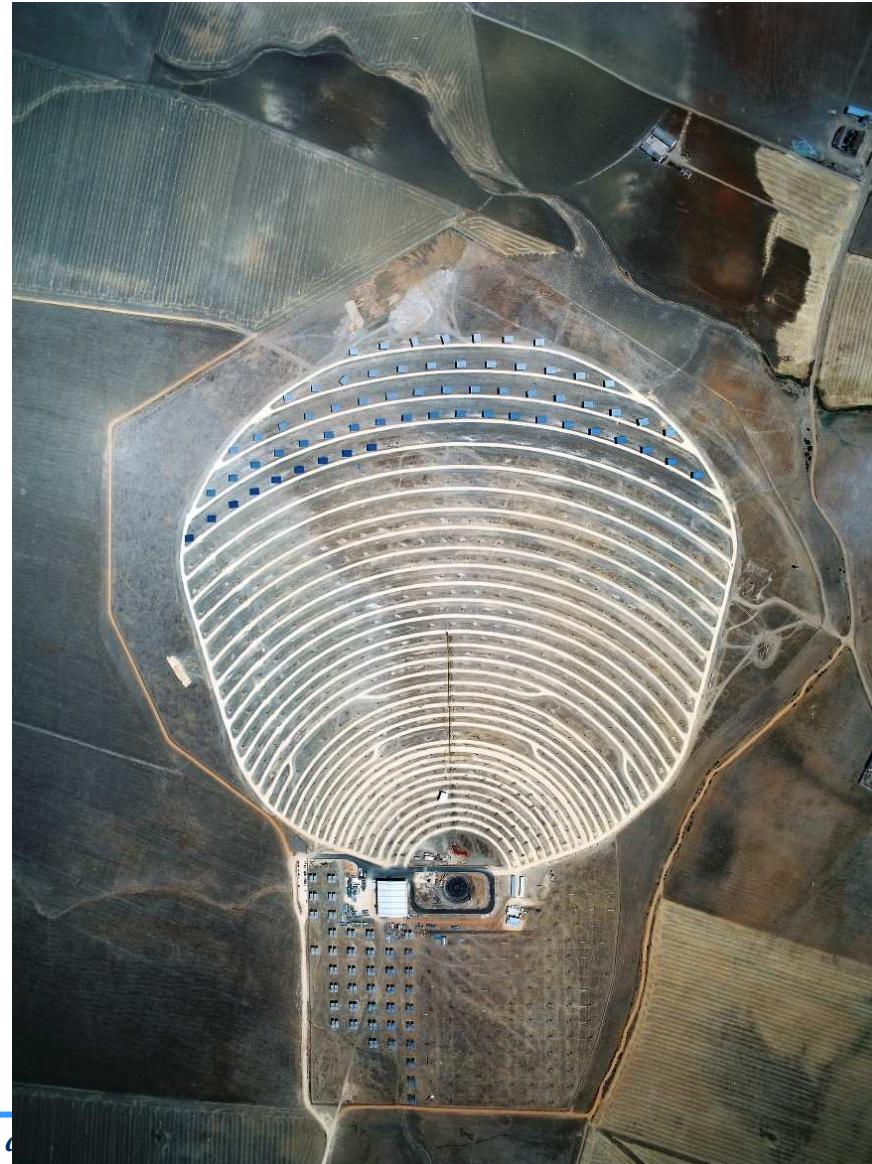


**Jornada**

19 de Noviembre de 2008, Barcelona. ([Solar Termoelectrica-F. Tellez](#))



## PS10, Vista aérea Agosto 2005





PS10, Vista aérea 2006



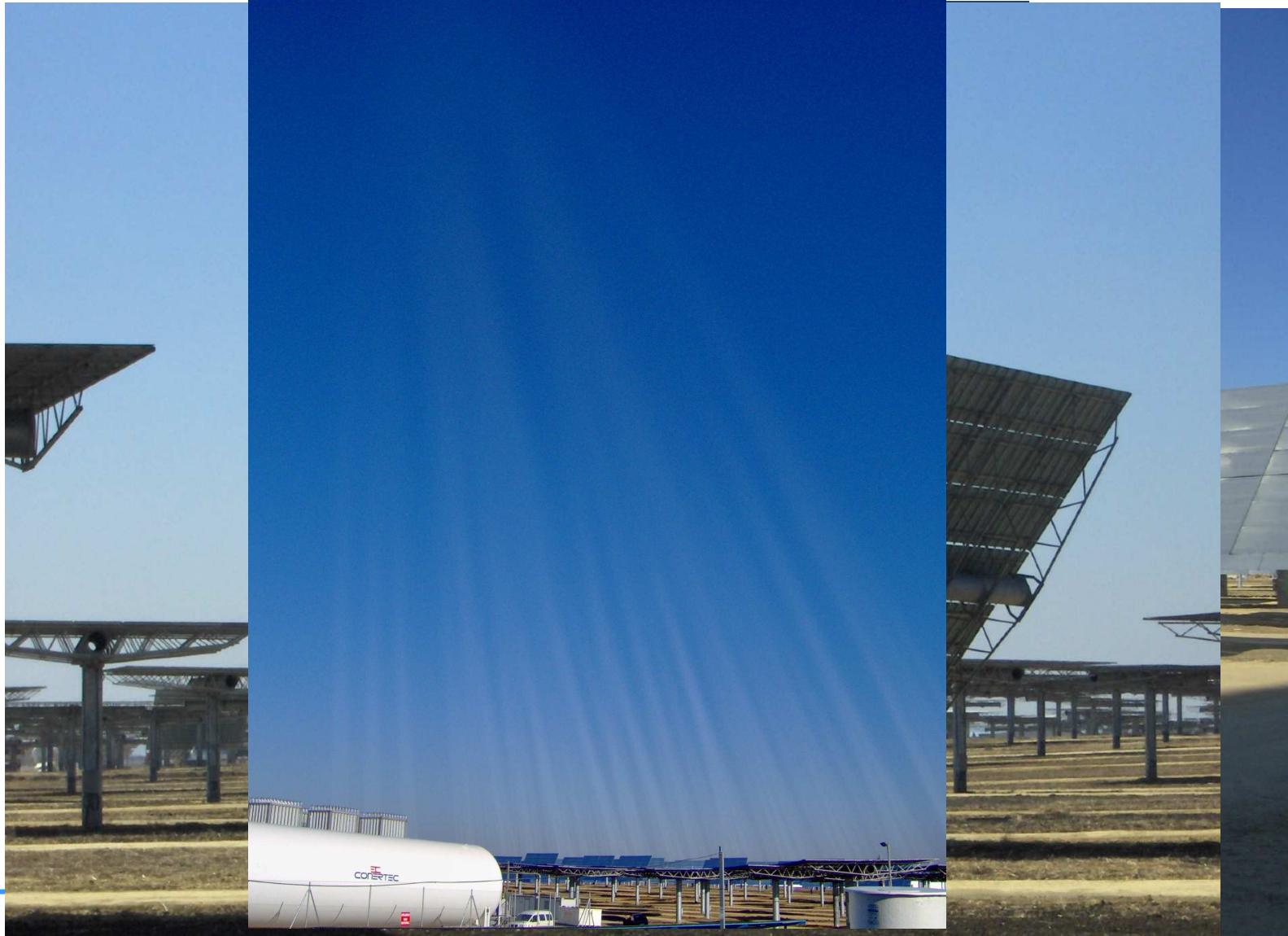


## PS10, Montaje del receptor 2006





## PS10, Pruebas de control, seguimiento y apunte de heliostatos Septiembre 2006



**Jornada**

19 de Noviembre de 2006, Barcelona. ([Solar Termoeléctrica-T. Teñez](#))

slide 30

# Discos Parabólicos, DP

- Seguimiento en **2 ejes**. Disco Parabolico. Temps. De 700-800 °C. Flujos de 500-3000 kW/m<sup>2</sup>.
- Ciclos Stirling y Brayton
- Amplia **variedad de diseños** han demostrado los **altos rendimientos** requeridos a nivel comercial
- Efic. Conversión solar-electricidad anual 20-22 %
- Ninguna planta comercial conectada a red. **Algunas unidades conectadas.**
- Permite **Generación en zonas aisladas** o en plantas centralizadas. Módulos de 10-25 kWe (Stirling)
- **Proyectos** de plantas:
  - España: ~0.1 MWe
  - EEUU: **500 MW** (SCE - 20,000 discos) + **300 MW** con SDG&E – 12,000 discos)

MDAC ('83-'88) Boeing/SES  
('98-'99)



Avanco ('82-'85)



Disco Australiano (400 m<sup>2</sup>  
y 90 kWe!)

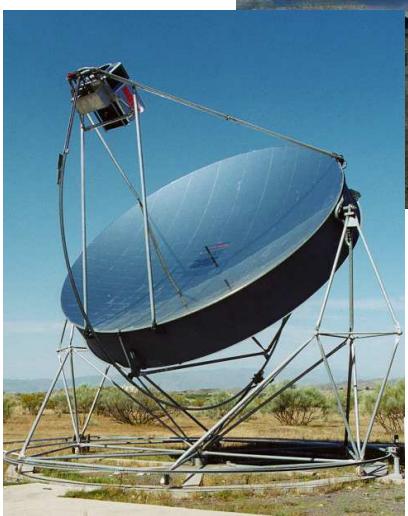
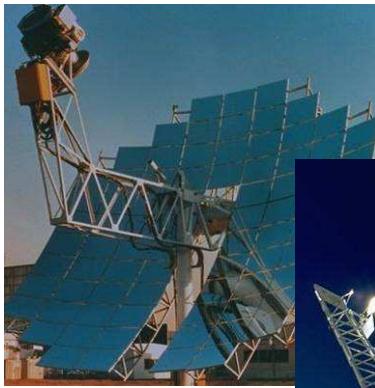


SBP/Almeria  
('88-'99)

Cummins  
('89-'96)



# DP, Estado de la tecnología



- **Los costes de inversión son, actualmente, la mayor barrera**

- La variedad de diseños de **disco concentrador** (paraboloides continuo/facetado + estructura,...) y de **receptores-motores** han demostrado altas eficiencias (record de 29.5% solar-electricidad)
- **La Durabilidad del motor-receptor requiere mejoras**

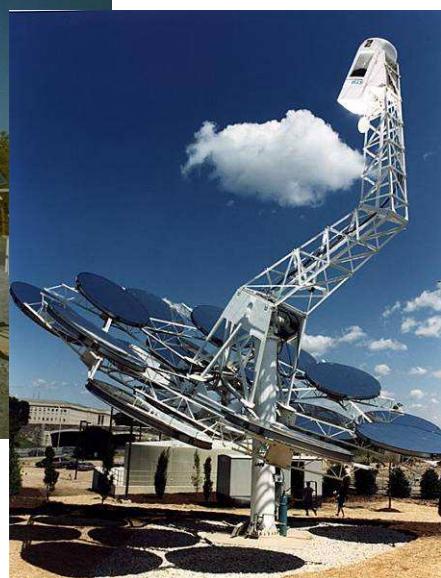


## DP, Futuro

- Empresas Europeas y de EE.UU.  
Están desarrollando las primeras unidades comerciales (SBP, SES,...)
- Lo previsible es que los costes disminuyan enormemente (desde los actuales 8000-10000 €/kWe pico) cuando se comience la producción en masa.



SES/Boeing



I+D:

- Desarrollos de motores híbridos (solar-fuel), ciclos brayton, cogeneración, ...
- Concentradores de menor coste específico...

# Nuevos desarrollos

Infinia Corp., EEUU

- 3 kWe
- Pistón libre
- Unos prototipos en operación
- comienzo de fabricación





# ¿Qué Tecnología CS Termoeléctrica elegir?

# Ventajas / Inconvenientes



	Receptor Central	Discos-Stirling	Cilindro-Parabólicos
Aplicación	Generación Centralizada	Generación Aislada	Generación Centralizada
Situación	Prototipos y Demostración hasta 10 MWe	Prototipos y Demostración entre 9-50 KWe	Plantas comerciales . Unidades de hasta 80 Mwe; Capacidad total: ~420 MWe
Ventajas	Perspectivas a medio plazo de altas eficiencias (~18-20%) y grandes Factores de Capacidad (hasta 70%)	Muy alta eficiencia de conversión (Demostrado 29.5% pico)	Disponibilidad Comercial. 15-20 años demostración. Almacenamiento demostrado.
Inconvenientes	Alta inversión. Costes reales no bien conocidos. Alta Temperatura de operación requiere alta tecnología (> coste).	Apoyo fósil no demostrado. Problema de almacenamiento Muy altos costes de inversión	Menor Temperatura => menor calidad del vapor. Limitación debida a propiedades de los fluidos (aceite < 370°C) y recubr. selectivos

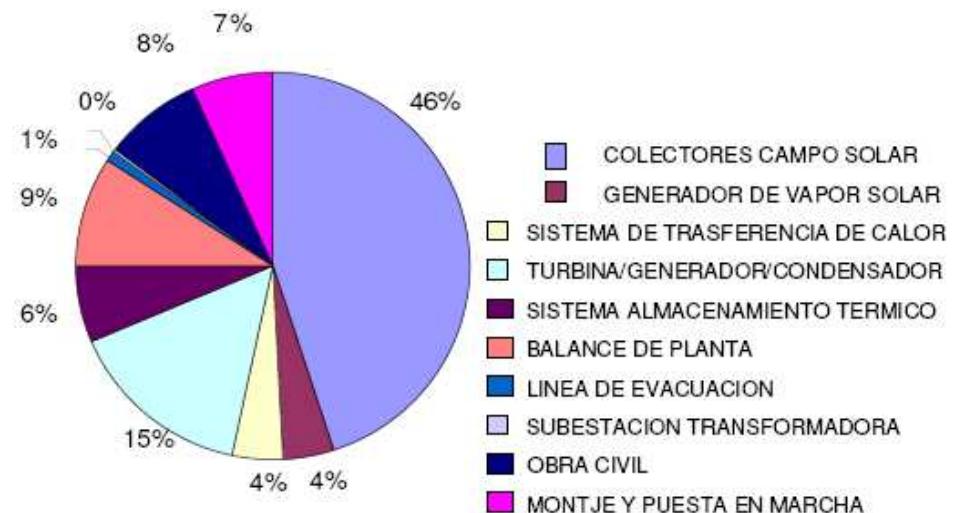


# ¿Cuánto cuesta la Energía Solar Termo- Eléctrica?

- La experiencia, diferente en cada tecnología, solo permite hacer estimaciones sobre el coste, con razonable credibilidad, (cifras aceptadas por bancos): coste final de la electricidad entre 0.14-0.20 €/kWh

## Coste de la Tecnología. CCP

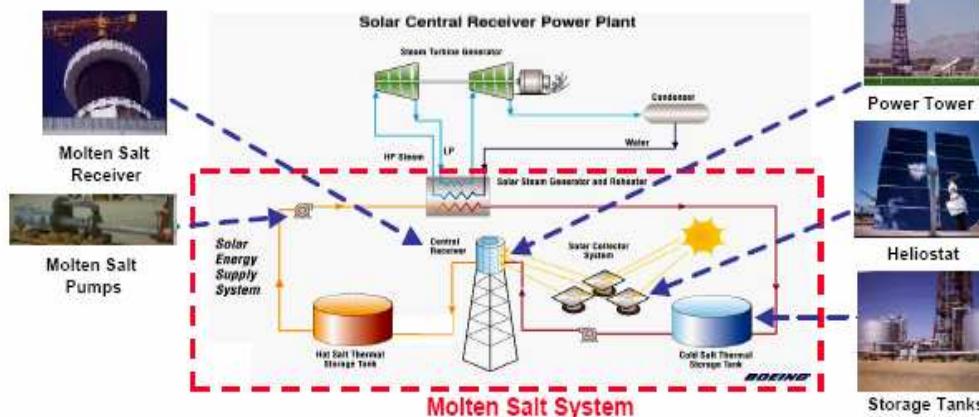
Resultados (CCP-Aceite y 3h almacenamiento)		
Costes Inversión específicos	3530	€/kW <sub>el</sub>
Factor de Capacidad	28.5	%
Fracción de la Demanda (referencia) satisfecha por aporte solar	50.0	%
Coste global de la electricidad (solo solar)	0.172	€/kWh <sub>el</sub>
Coste O&M incluido en coste global	0.032	€/kWh <sub>el</sub>



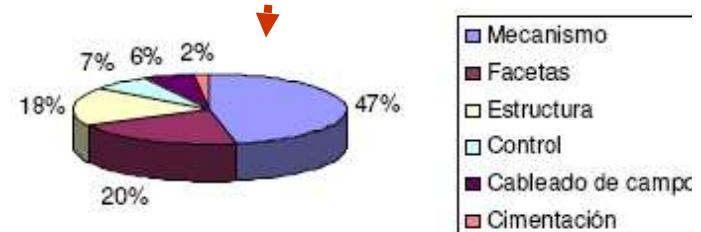
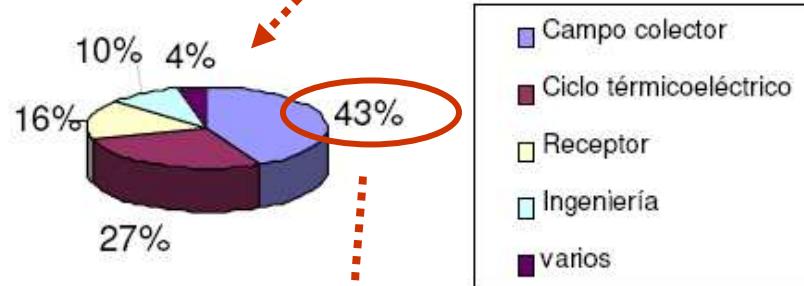
Desglose de costes en instalaciones cilindro-parabólicas

# Coste de la Tecnología. SRC

- Costes específicos de inversión elevados (~2-3 veces las tecnologías convencionales)
- Alto potencial reducción de costes en campo solar (helióstatos)



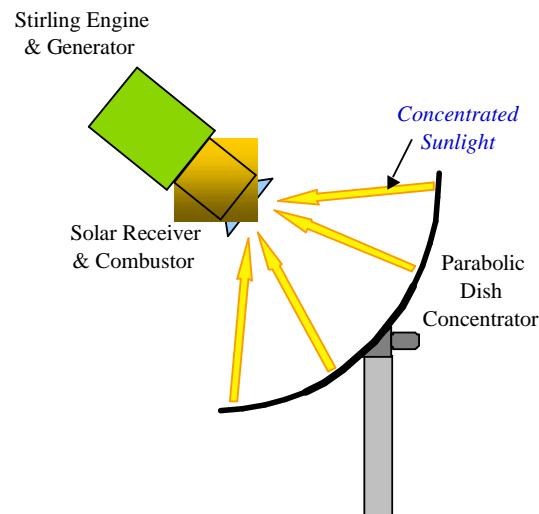
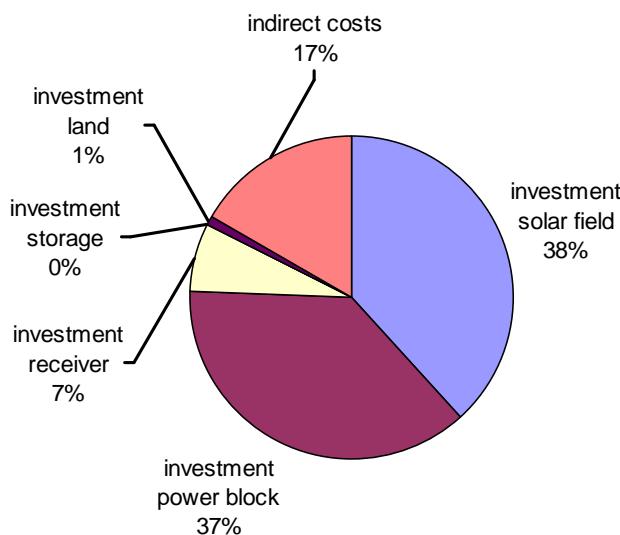
Resultados (SRC-Sales + 3h almacenamiento)			
Costes Inversión específicos	3 473	€/kW <sub>el</sub>	
Factor de Capacidad	33.3	%	
Fracción de la Demanda (referencia) satisfecha por aporte solar	29.2	%	
Coste global de la electricidad (solo solar)	0.154	€/kWh <sub>el</sub>	
Coste O&M incluido en coste global	0.036	€/kWh <sub>el</sub>	



# Coste de la Tecnología. Discos Parabólicos

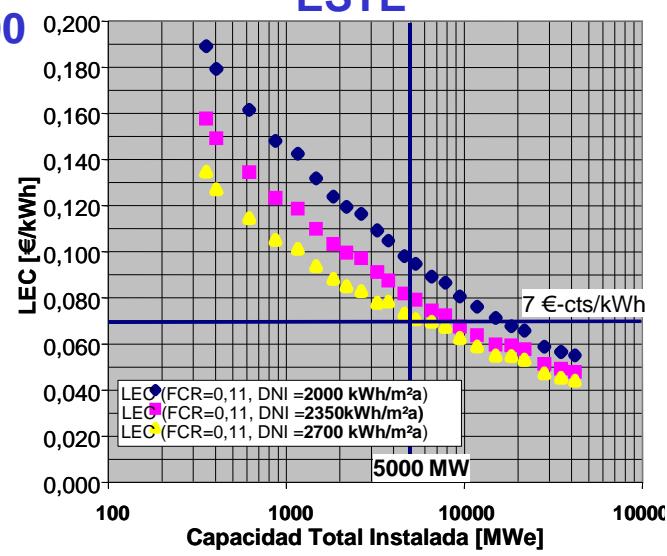
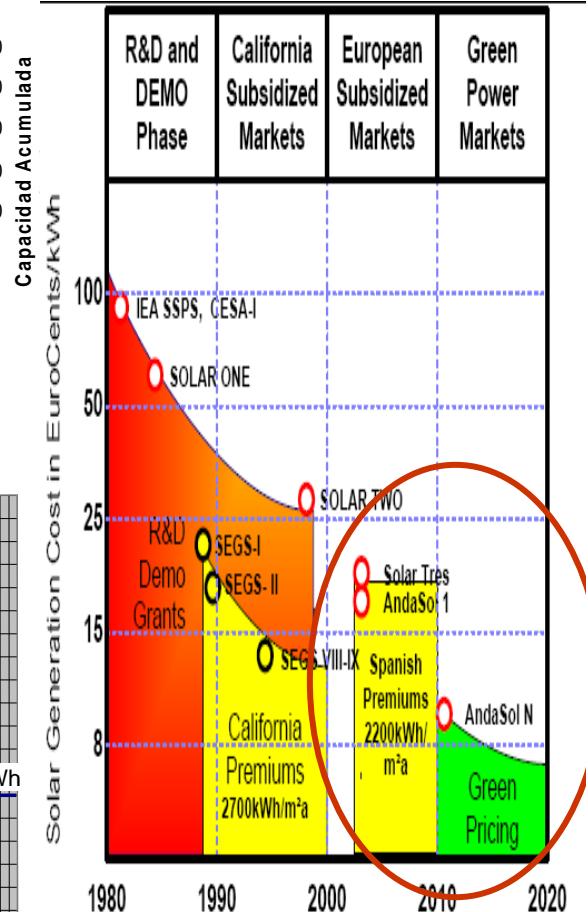
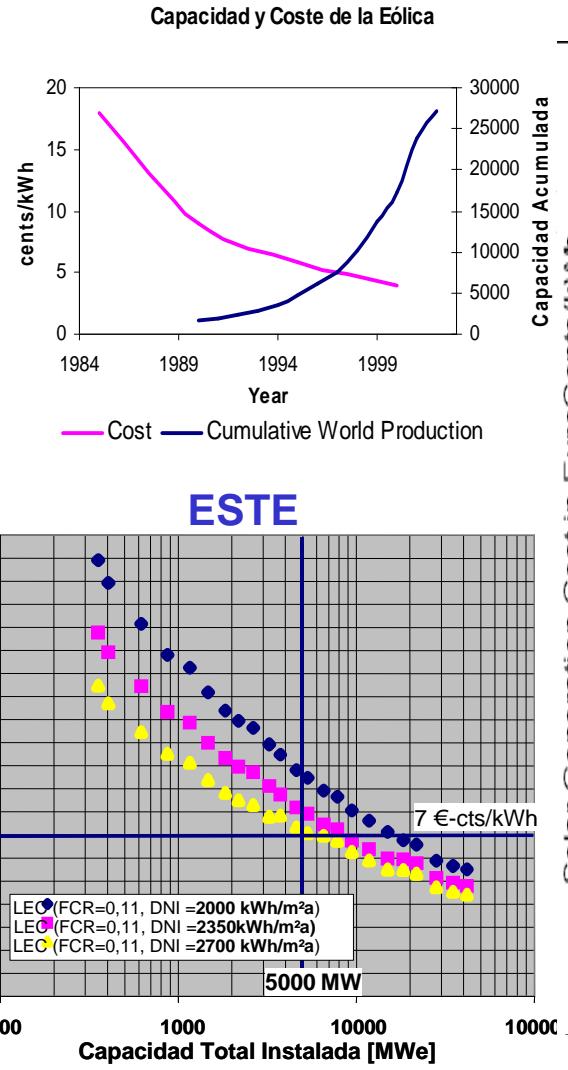
- Costes específicos de inversión doble que las otras ESTE. También doble coste de la electricidad producida.
- Alto potencial reducción de costes en concentrador y bloque receptor - motor Stirling

Resultados (SRC-Sales + 3h almacenamiento)		
<b>Costes Inversión específicos</b>	<b>8035</b>	<b>€/kW<sub>el</sub></b>
<b>Factor de Capacidad</b>	<b>49.6</b>	<b>%</b>
<b>Fracción de la Demanda (referencia) satisfecha por aporte solar</b>	<b>45</b>	<b>%</b>
<b>Coste global de la electricidad (solo solar)</b>	<b>0.281</b>	<b>€/kWh<sub>el</sub></b>
<b>Coste O&amp;M incluido en coste global</b>	<b>0.046</b>	<b>€/kWh<sub>el</sub></b>



# Potencial reducción de costes de la ESTE

- La reducción de costes de la **Eólica** es un ejemplo para la ESTE. Los costes iniciales eran elevados y se redujeron al aumentar la capacidad instalada (razón de aprendizaje ~20%)
- La **ESTE** podría seguir una reducción semejante (con **razón de aprendizaje** estimada de la experiencia Californiana de ~8%).
- Conseguir la **instalación de 5000 MWe** conduciría a reducir el **coste a la mitad** (7-9 c€/kWhe). [= Propuesta GMI]
- **Estrategia combinada:**
  - 1) Mayores tamaños de planta;
  - 2) Producción en serie de componentes;
  - 3) Mejora tecnológica (I+D)





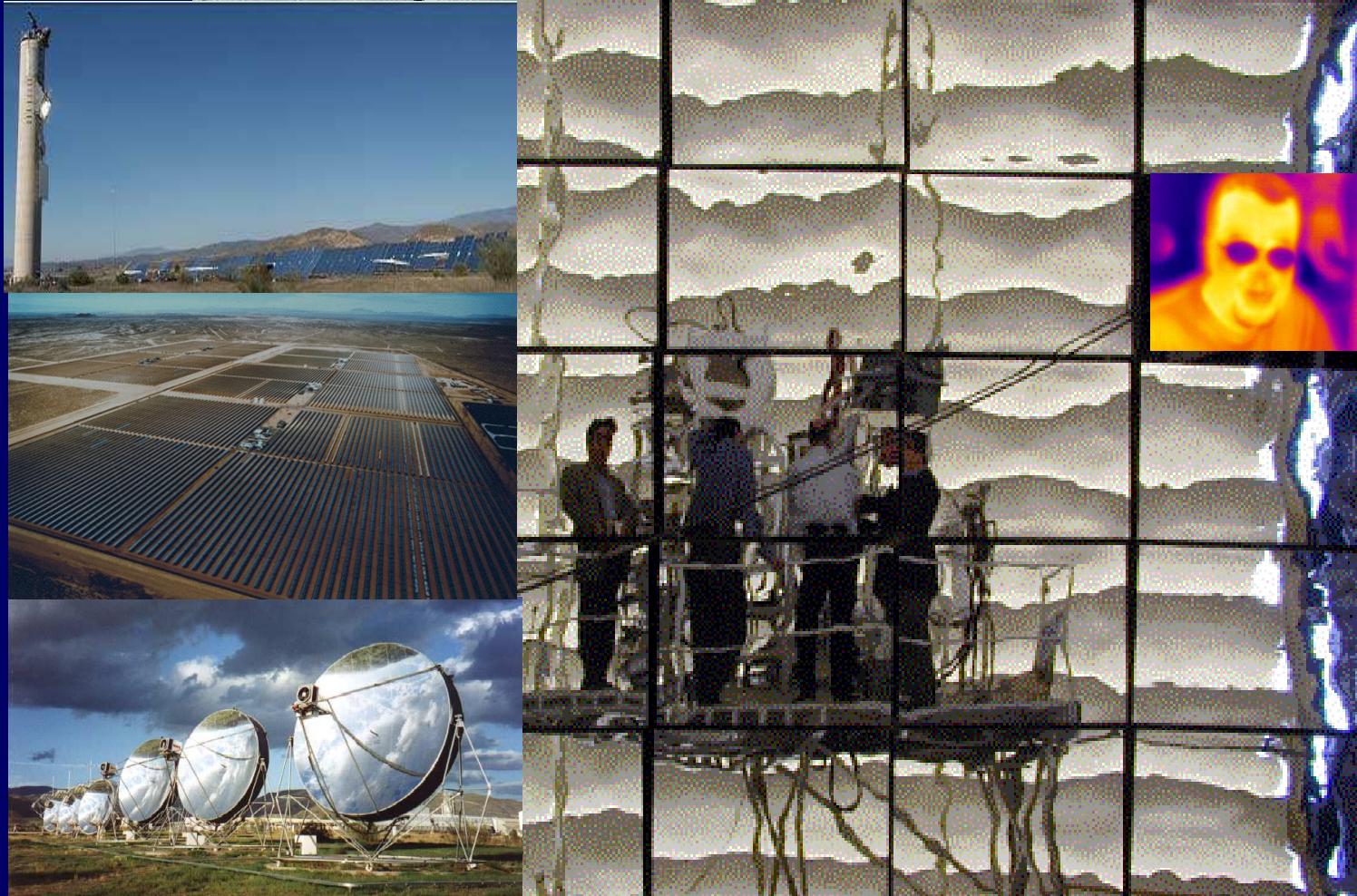
## En resumen:

- Enorme potencial para la Solar Termoeléctrica a medio Plazo (¿5% de la electricidad mundial para 2040?, ¿18-66 GWe en España?, de *Electricidad “gestionable”*).

### RETOOS (para un éxito semejante al de la eólica):

- Las primeras plantas han de ser “un éxito”
- Reducir los costes de generación:
  - Despliegue continuado de plantas, con tiempo de incorporar innovaciones
  - Mayor competencia
  - Nuevas tecnologías / Innovaciones
  - Plantas de mayor tamaño
- Reducir el consumo de agua (de los ciclos de vapor) que las haga compatibles con zonas desérticas
- Promover la cooperación e interconexión eléctrica con el Norte de África (y el Medio Este), auténticas “minas solares”.

# ¡ Gracias por su Atención !



[Felix.tellez@ciemat.es](mailto:Felix.tellez@ciemat.es)

[www.psa.es](http://www.psa.es)