



# Geração térmica de eletricidade por concentradores solares

Coletânea para a disciplina EM-5486 – Energias  
Renováveis

Thomaz Borges

Abril de 2008



# Sumário

---

- Geração elétrica através de concentradores solares
- Sumário
- Princípio básico: Placas Planas
  - Funcionamento básico
  - Equação de Hottel-Whillier-Bliss
- Princípios da Geração solar térmica
  - Aquecimento
  - Ciclos termodinâmicos conhecidos
  - Problema: gerar vapor
- Tipos de Sistemas de concentração
- Coletores evacuados
- Coletores concentradores
  - Pratos concentradores
  - Torres solares
  - Calhas concentradoras
- Pratos concentradores
- Torres solares
- Calhas concentradoras
- Comparações entre tecnologias
- Custo das tecnologias
- Outras tecnologias

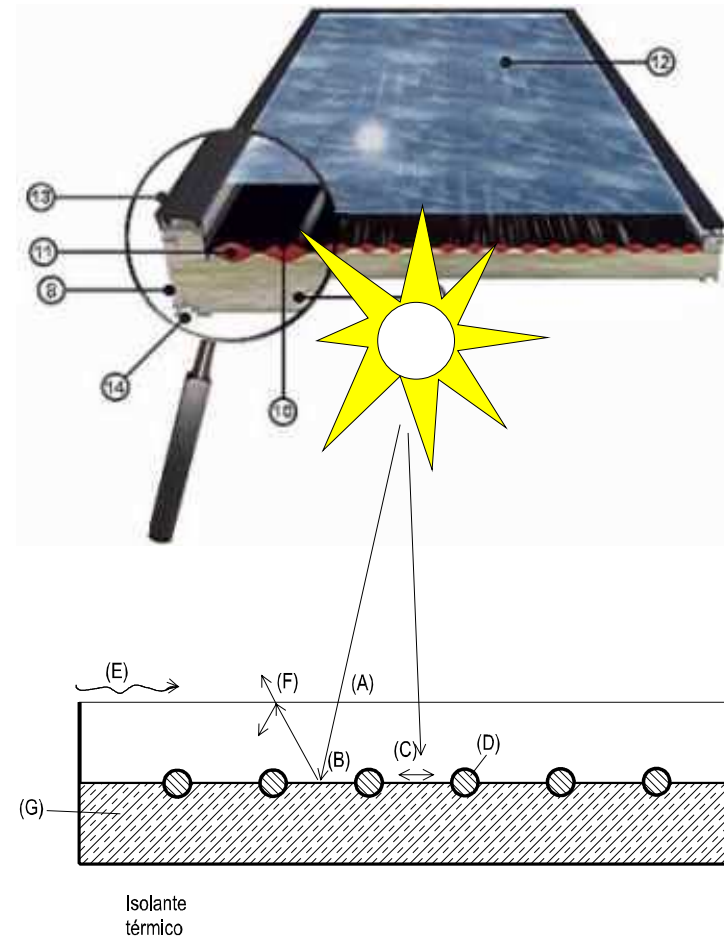


## Princípio básico: Placas Planas

- Compreender o funcionamento de um coletor de placas planas é essencial para entender coletores concentradores

# Coletores de placa plana

- Cobertura de vidro (opcional)
- Superfície absorvedora
- Malha ou serpentina de tubos
- Isolamento térmico





# Equação de Hottel-Whillier para placas coletoras (I)

Uma placa coletora solar absorve tanto a radiação solar direta quanto a difusa. A radiação direta é aquela que faz com que os objetos tenham sombra. A radiação difusa é aquela que é refletida e/ou difundida por nuvens, névoa ou particulados antes de atingir o solo.

O calor útil ganho por uma placa coletora plana pode ser expresso por

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad [1]$$

Onde

$\dot{Q}_u$	calor útil transferido para o fluido circulante [W];
$\dot{m}$	fluxo de massa do fluido [kg/s];
$c_p$	calor específico do fluido [kJ/kg°C];
$T_i$	temperatura do fluido que entra no coletor [°C];
$T_o$	temperatura do fluido que sai do coletor [°C].



# Equação de Hottel-Whillier para placas coletoras (I)

A equação de Hottel-Whillier expressa o desempenho térmico de um coletor solar em regime permanente [Duffie e Beckman, 1991] :

$$\dot{Q}_u = A_c F_R \left[ I (\tau\alpha)_e - U_L (T_i - T_a) \right] \quad [2]$$

Onde:

- $A_c$  área da placa coletora [m<sup>2</sup>]  
 $F_R$  fator de remoção de calor da placa coletora.  
 $I$  taxa de radiação solar incidente na superfície da placa coletora [W/m<sup>2</sup>]  
 $\tau$  transmitância da cobertura de vidro [decimal]  
 $\alpha$  absorptância da superfície “negra” da placa [decimal]  
 $(\tau\alpha)_e$  produto transmitância-absorptância efetivo [decimal]  
 $U_L$  coeficiente global de perdas de calor da placa coletora [W/m<sup>2</sup>°C]  
 $T_a$  temperatura ambiente [°C]



# Equação de Hottel-Whillier para placas coletoras (III)

O fator de remoção de calor  $F_R$  relaciona o ganho real de energia útil pela placa coletora com o ganho útil de calor se a placa inteira estivesse à temperatura do fluido que entra. Sua expressão algébrica fica [Duffie e Beckman, 1991]:

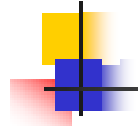
$$F_R = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{A_c [S - U_L (T_i - T_a)]} \quad [3]$$

Onde:

$S$       Radiação solar absorvida pelo coletor, por unidade de área.



# Equação de Hottel-Whillier para placas coletoras (IV)



A eficiência de um coletor solar pode ser definida como a razão entre o ganho de calor útil pelo fluido e a radiação solar incidente sobre a superfície do coletor, em um dado intervalo de tempo:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{IA} \quad [4]$$

Das equações anteriores resulta [Norton,1991]

$$\eta = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{IA}; \quad [5]$$

e finalmente:

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I}. \quad [6]$$





# Equação de Hottel-Whillier para placas coletoras

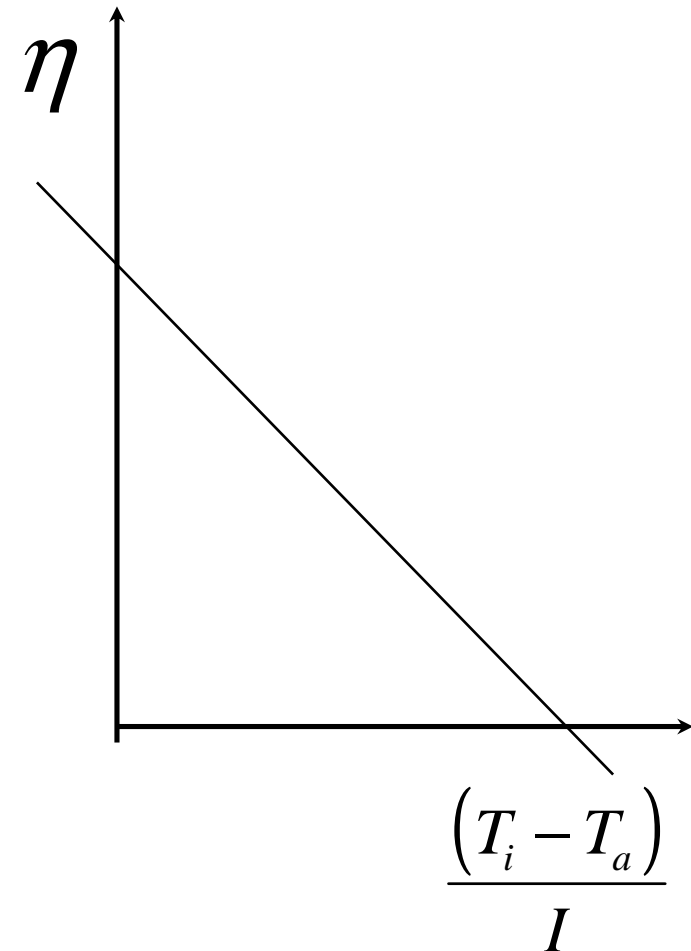


$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i)$$

$$Q_u = A F_R \left[ I (\tau \alpha)_e - U_L (T_i - T_a) \right]$$

$$\eta = \frac{Q_u}{IA}$$

$$\eta = F_R (\tau \alpha)_e - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I}$$





# Levantamento de curvas de eficiência

Em linhas gerais, o procedimento de teste para placas coletoras planas em regime permanente consiste em:

- 1- apontá-las para o sol de modo a receber radiação direta em incidência normal;
- 2- submetê-las a uma vazão constante de fluido;
- 3- determinar  $\dot{Q}_u$  por medições e pelo uso da equação [1] e além disso medir  $I$ ,  $T_i$  e  $T_a$ .

Variando quaisquer um destes parâmetros, eficiências instantâneas podem ser calculadas através da equação [5] e traçadas num gráfico em termos de  $(T_i - T_a)/I$ . O resultado será um segmento de reta com inclinação  $(-F_R U_L)$  e interceptação do eixo da função em  $F_R (\tau\alpha)_e$ .

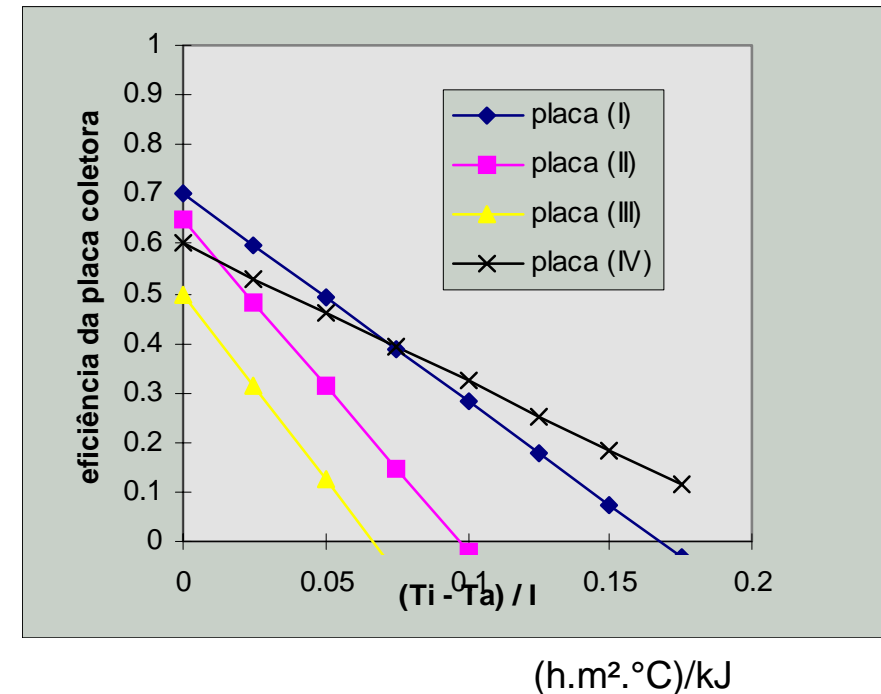
Os termos acima mencionados não são constantes, a rigor:  $U_L$  depende da temperatura e da velocidade do vento e  $F_R$  é levemente dependente de  $U_L$ . No entanto, o desempenho instantâneo de coletores solares planos pode ser caracterizado com boa precisão por esta correlação [Norton,1991].

Portanto, a caracterização de uma placa coletora pode ser apresentada de duas formas: o fluxo de massa utilizado no teste com os parâmetros  $F_R U_L$ ,  $F_R (\tau\alpha)_e$  ou através do próprio gráfico da curva de eficiência, como é exemplificado a seguir.



# Curvas típicas de eficiência

- placa I possui uma única cobertura de vidro e aletas de cobre [Pereira, 1999; Klein, Beckman et al., 1996].
- Placa II possui aletas de alumínio, tubos de cobre e cobertura simples de vidro [Pereira, 1999].
- Placa III possui superfície absorvedora feita em material alternativo (concreto) e cobertura simples de vidro [Nayak, Suchatme et al., 1989].
- Placa IV possui uma camada dupla de lâminas de vidro como cobertura, aletas de alumínio e tubos de cobre. Nota-se o desempenho desta em altas diferenças de temperatura: sua eficiência cai relativamente menos, indicando bom isolamento térmico [Simon, 1976].



$$\text{Placa II: } \eta = 0,65 - 24,12 (T_i - T_a)/I$$



# Modelos para a previsão do desempenho a longo prazo

- Transiente de radiação solar
- Transiente de demanda de energia
- Transiente de condições climáticas
- Transientes diários
- Transientes sazonais

Previsão do funcionamento a curto prazo: pouca utilidade para o projeto.



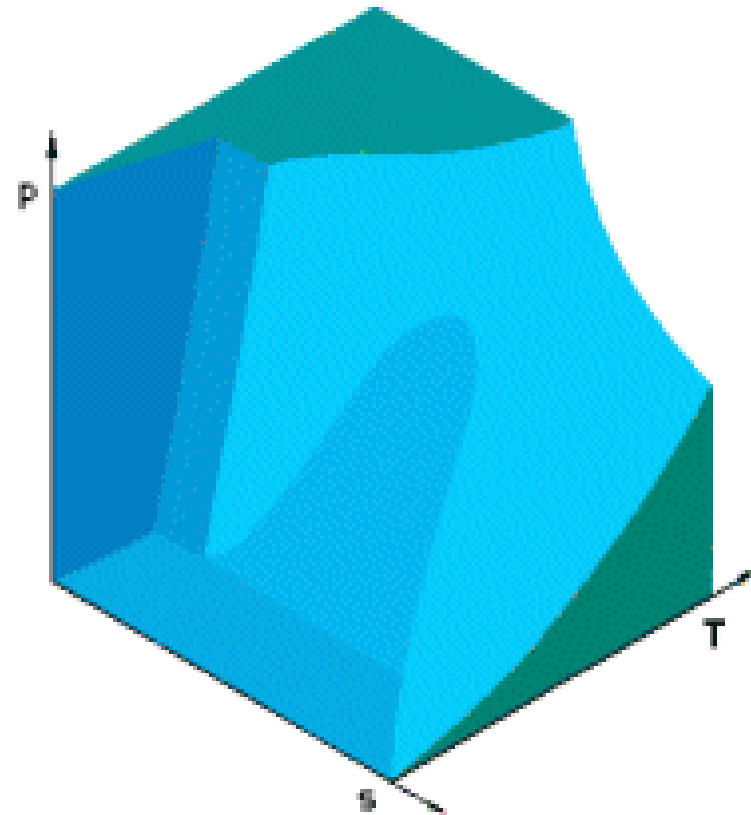
# Princípios da Geração solar térmica

- Aquecimento de fluido de trabalho
- Ciclos termodinâmicos conhecidos



# Problema: gerar vapor

- Pode ser utilizado um fluido para os coletores e outro para o ciclo termodinâmico de geração
- Trocadores de calor



# Sistemas de concentração

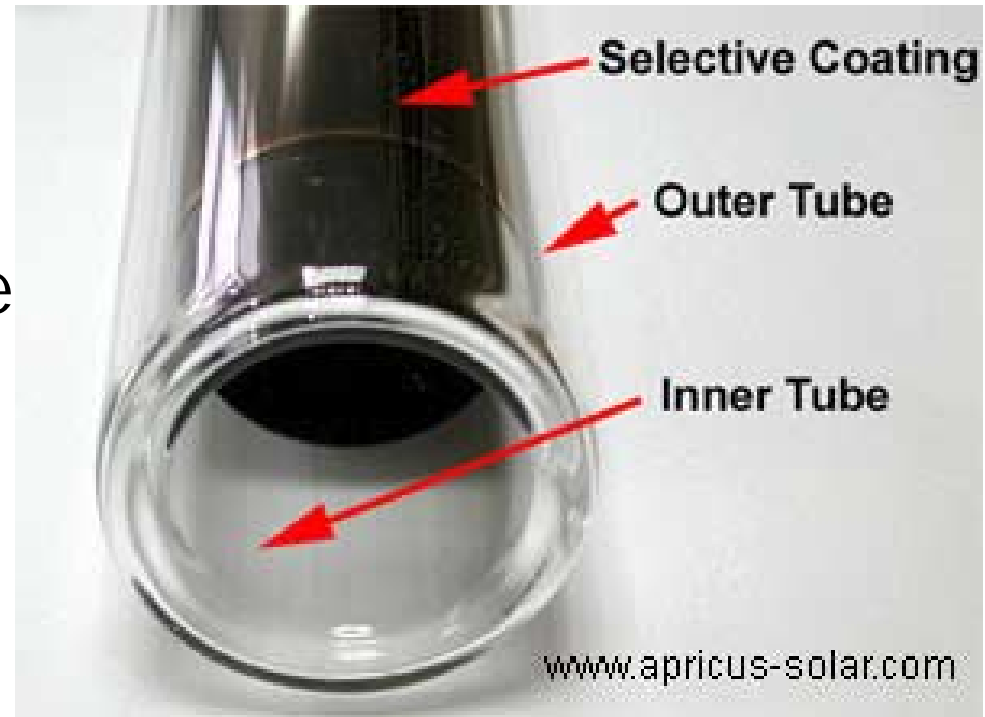
- Aumentam a radiação solar na superfície coletora

$$Q_u = AF_R \left[ I(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a) \right]$$



# Coletores evacuados

- Melhora do isolamento térmico
- Diminuição das perdas na superfície coletora



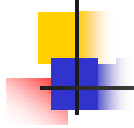
$$Q_u = A F_R \left[ I (\tau \alpha)_e - U_L (T_i - T_a) \right]$$

A green arrow points to the  $U_L$  term in the equation, which is circled in yellow.





# Tecnologias de concentração solar



**Calha parabólica (*parabolic trough*)**

**Torre Solar (*Solar Tower*)**



**Calha Fresnel (*Solarmundo*)**

**Prato parabólico (*Solar Dish*)**



# Pratos concentradores

- Geradores menores
- Gerador Boeing, 25 kWe, motor ciclo Stirling
- Huntington Beach, Califórnia





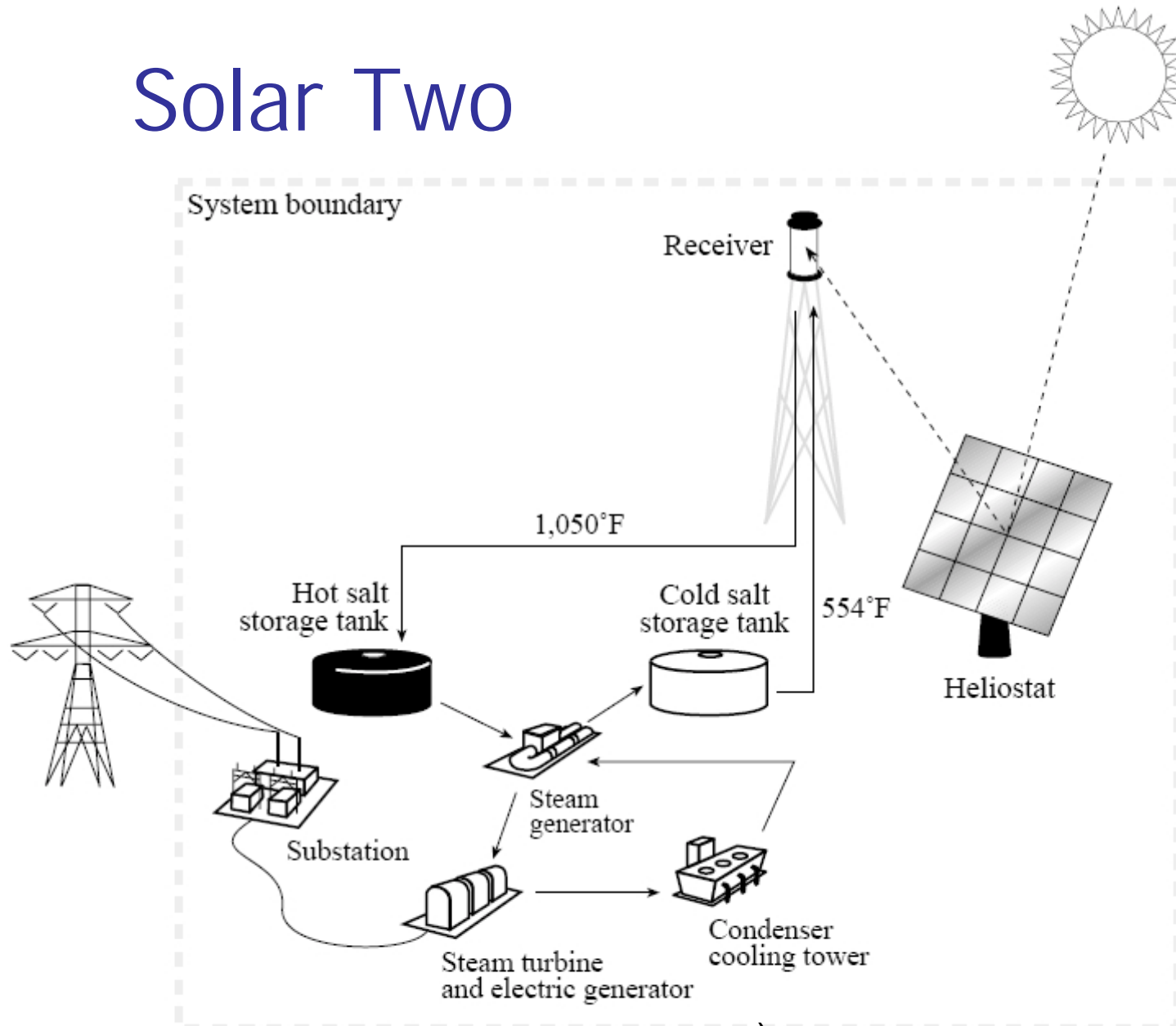
# Torres solares

- Fazenda “Solar Two”, EUA
- Atualmente desativada
- Construção de nova Torre na Austrália





# Solar Two







# Calhas concentradoras

Developer: **Luz International Ltd.**

9 Plants – Total 354 MW – Installed 1984-1990

Capacity – 15 MWe to 80 MWe

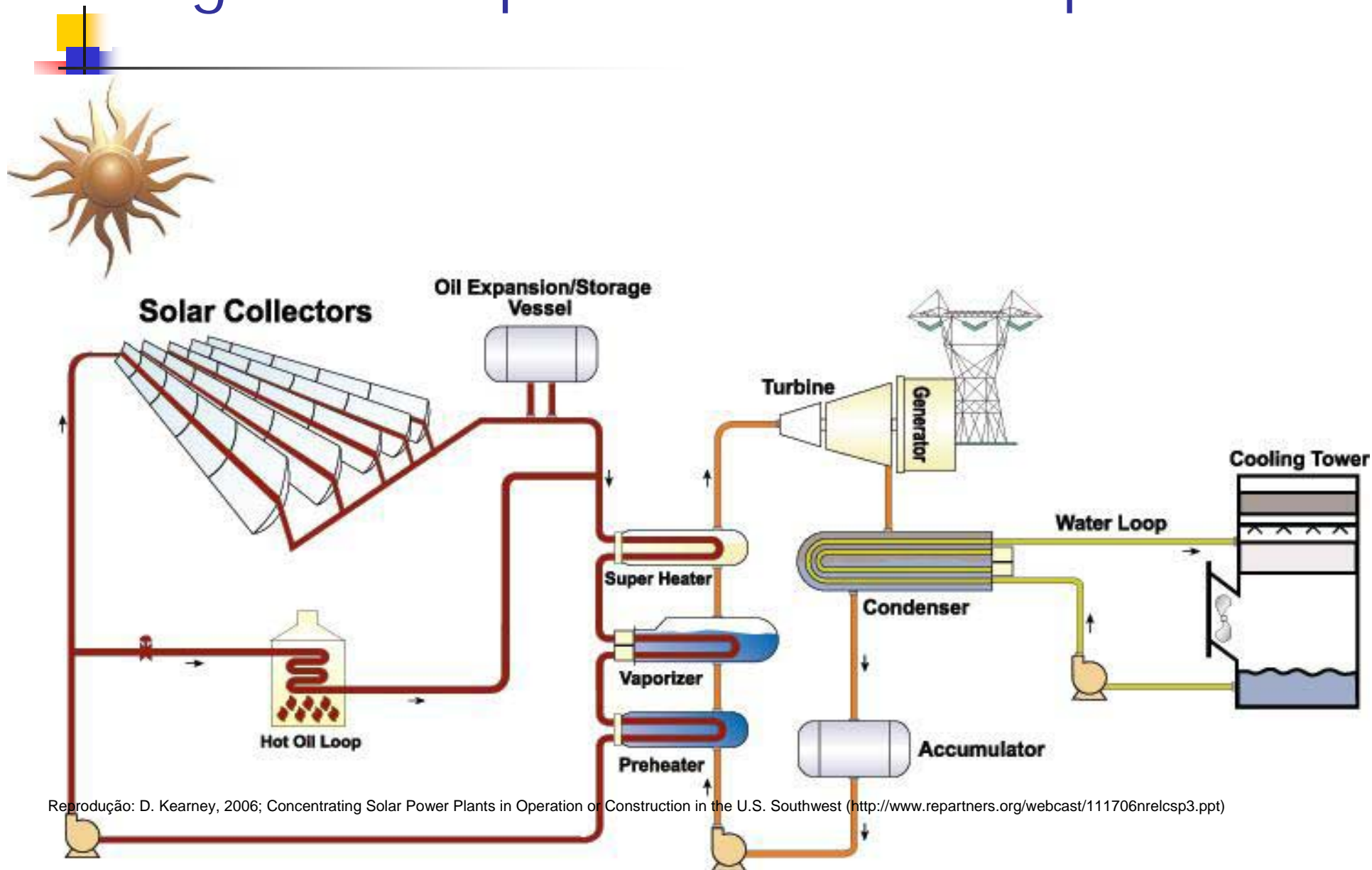


Reprodução: D. Kearney, 2006; Concentrating Solar Power Plants in Operation or Construction in the U.S. Southwest (<http://www.repartners.org/webcast/111706nrelcsp3.ppt>)

Deserto de Mojave, Califórnia



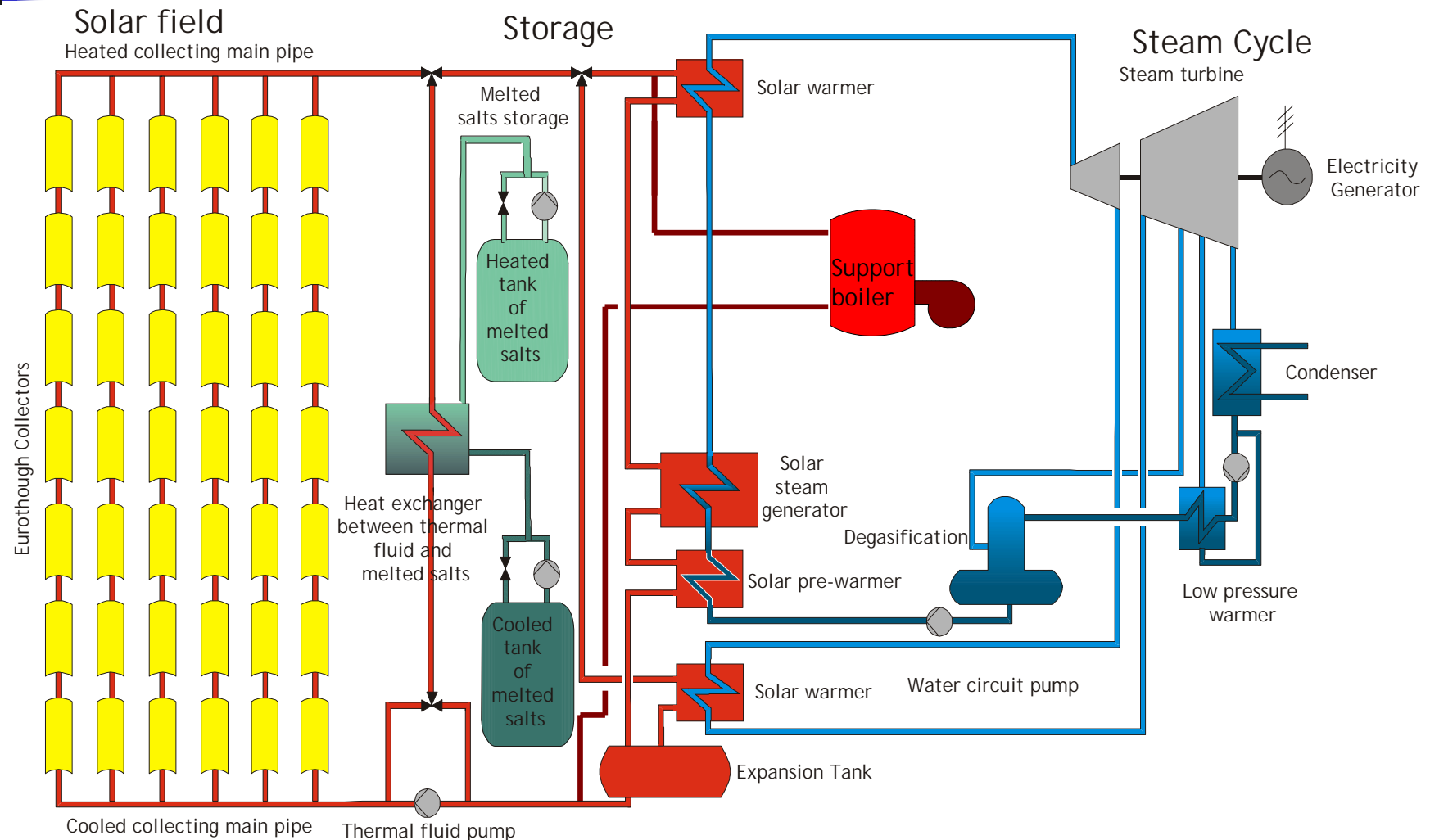
# Diagrama de processo Solel - Espanha



Reprodução: D. Kearney, 2006; Concentrating Solar Power Plants in Operation or Construction in the U.S. Southwest (<http://www.repartners.org/webcast/111706nrelcsp3.ppt>)



# Andasol - Espanha



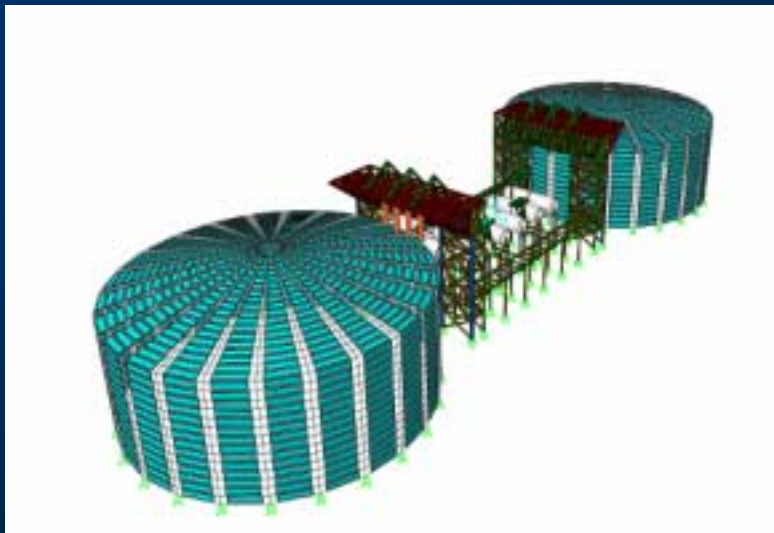
Reprodução: Nebrera, 2008 "Solar Thermal Power Generation - A Spanish Success Story"

([http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos\\_documentos/Solar%20thermal%20Power%20Generation%20GENERA%202008.ppt](http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Solar%20thermal%20Power%20Generation%20GENERA%202008.ppt))



# Andasol: Reservatório Térmico

The molten salt storage tank system increases the running time of the CSP plant up to 3.500 hours/per year



**Two storage tanks ( $\phi= 36$  m,  $h=14$  m)**

- **Storage capacity (h): 7,5h @ 50 MW**
- **Molten salts: 28.000 Metric Tons/**
- **Melting temperature: 221° C**
- **Allowance range: 291° C - 384° C**



**IMPROVED  
MANAGEABILITY**





# SEGS Trough Plant Mojave Desert, California



# Plant Eldorado Valley



**~22% Capacity Factor**  
**Capital Cost ~\$3.5/W**  
**O&M Cost ~3¢/kWh**

**Solargenix Solar Field**  
SGX-1 Parabolic Trough  
390°C Operating Temp.

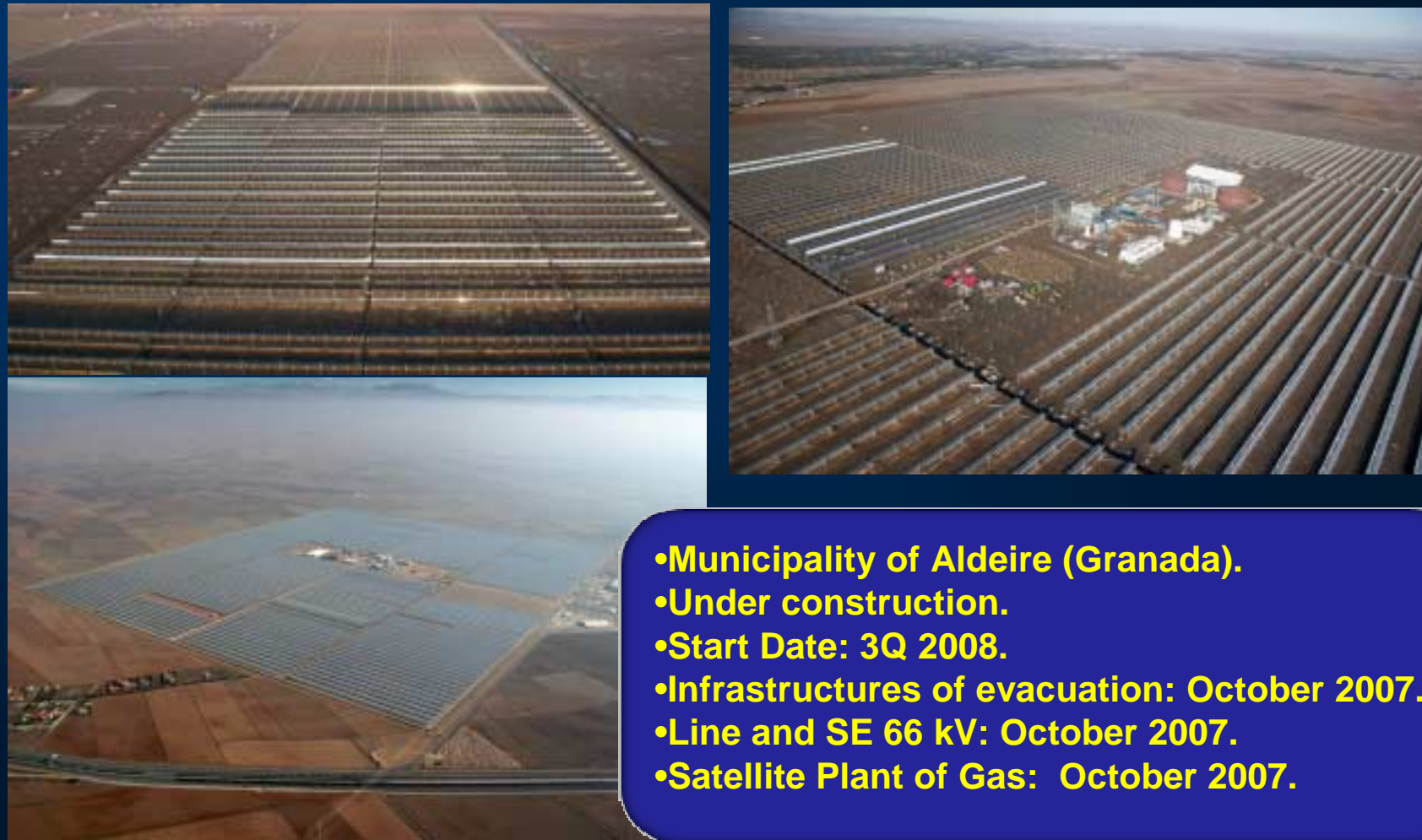
**Siemens Steam Cycle**  
Reheat Steam  
370°C, 100bar  
Wet Cooling



**Developer: Solargenix Energy Inc.**  
**Planned Date of Operation: Spring 2007**



## Andasol 1 - Under construction

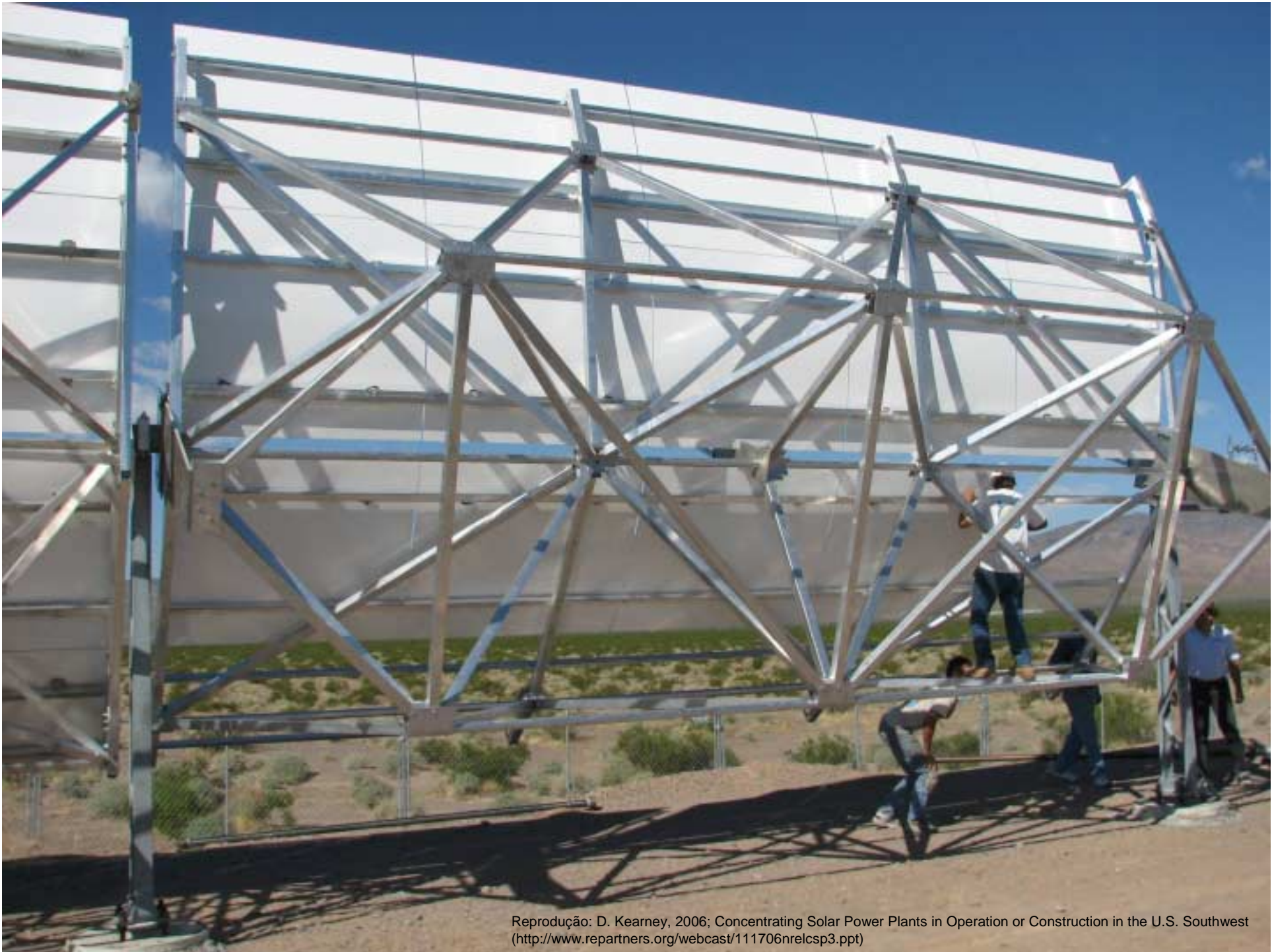


- Municipality of Aldeire (Granada).
- Under construction.
- Start Date: 3Q 2008.
- Infrastructures of evacuation: October 2007.
- Line and SE 66 kV: October 2007.
- Satellite Plant of Gas: October 2007.



Reprodução: D. Kearney, 2006; Concentrating Solar Power Plants in Operation or Construction in the U.S. Southwest (<http://www.repartners.org/webcast/111706nrelcsp3.ppt>)





Reprodução: D. Kearney, 2006; Concentrating Solar Power Plants in Operation or Construction in the U.S. Southwest (<http://www.repartners.org/webcast/111706nrelcsp3.ppt>)





Reprodução: D. Kearney, 2006; Concentrating Solar Power Plants in Operation or Construction in the U.S. Southwest (<http://www.repartners.org/webcast/111706nrelcsp3.ppt>)



## 1 MW Plant Construction





## APS 1 MWe Solar Power Plant

Startup: January 2006

Status as of November 2006

- construction complete
- fully operational
- operating in 1 year demonstration phase







# Atuador linear das calhas

**Mechanical  
torque transfer**

**Hydraulic  
drive**

**Solar brain –  
hardware &  
software control**



# APS 1 MWe Solar Power Plant Organic Rankine Cycle Power Block

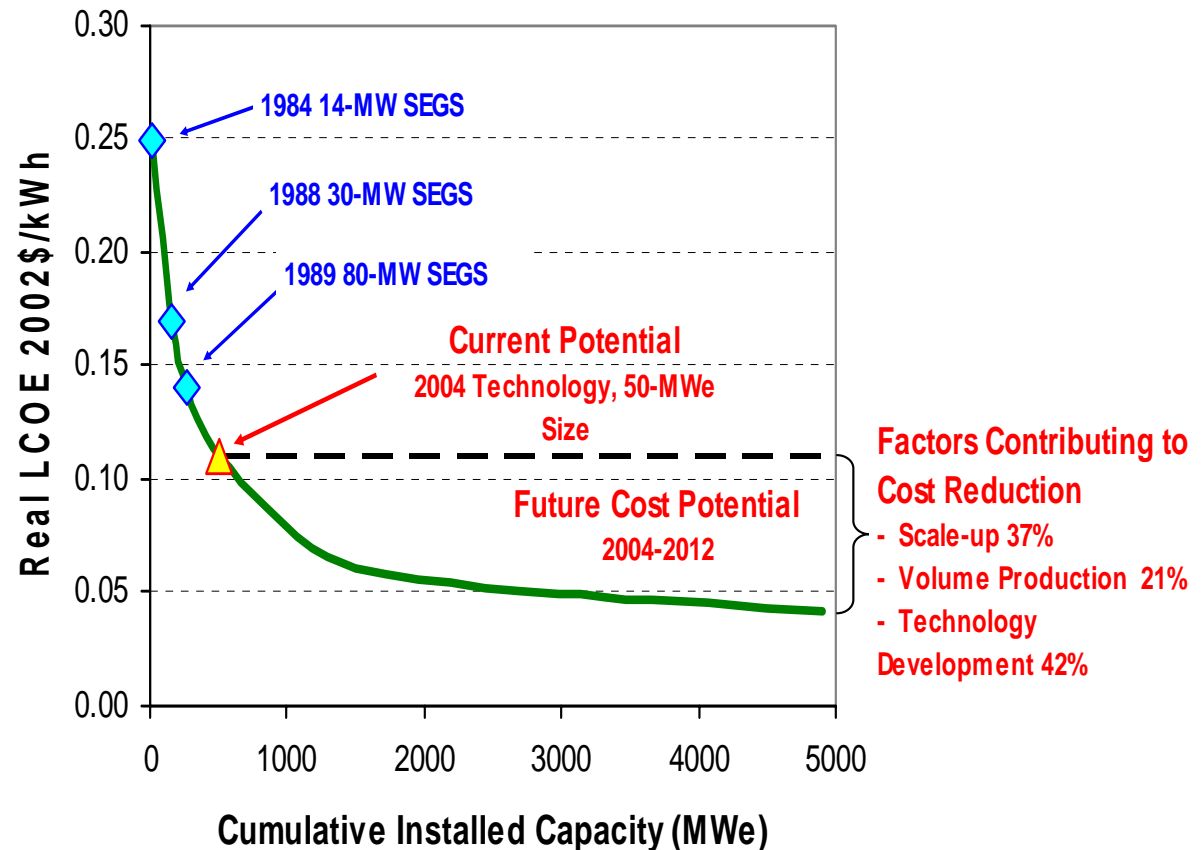


Reprodução: D. Kearney, 2006; Concentrating Solar Power Plants in Operation or Construction in the U.S. Southwest (<http://www.repartners.org/webcast/111706nrelcsp3.ppt>)



# Custo da geração por Concentração Solar Térmica

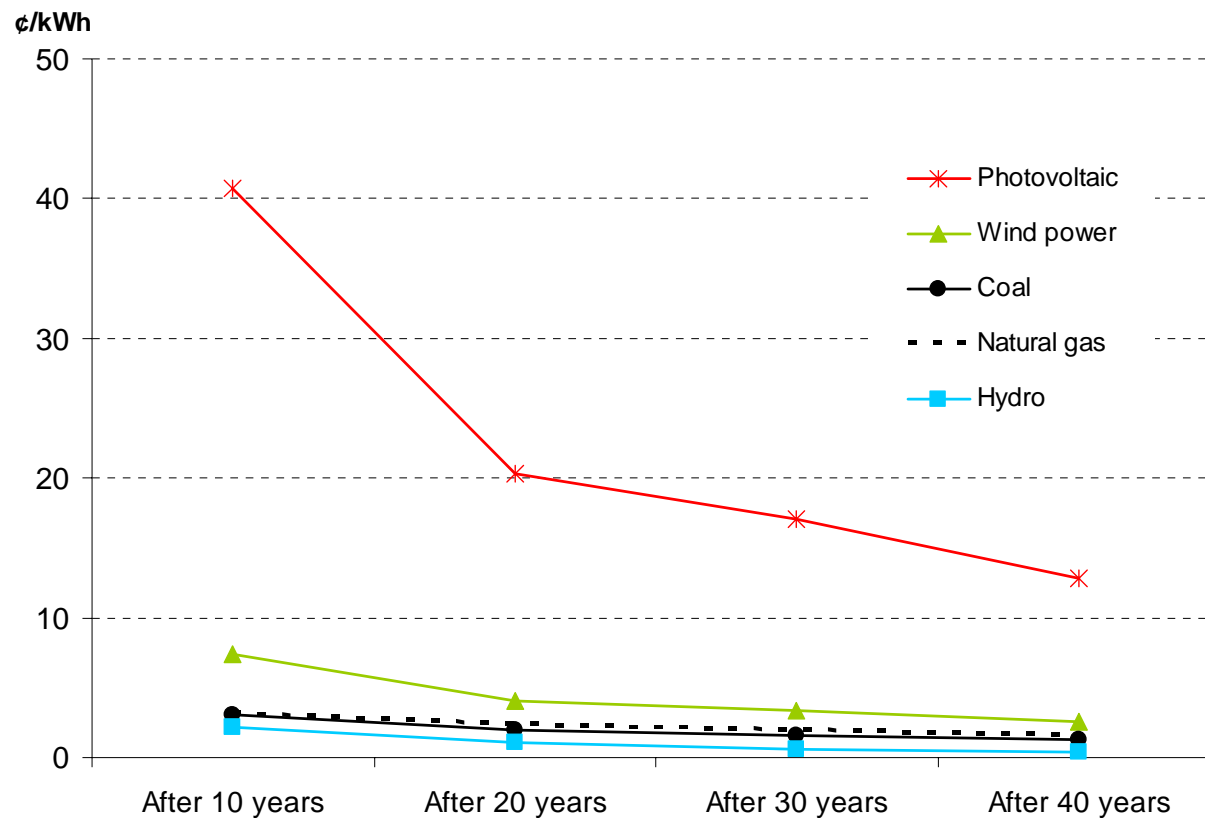
- Sargent & Lundy's due-diligence study\* evaluated the potential cost reductions of CSP.
- Cost reductions for trough technology will result from scale-up, R&D and deployment.
- Utilities have expressed interest in technology if cost at 7 cents/kWh or less.



- Sargent and Lundy (2003). Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Impacts. <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34440.pdf>
- Wilkins, 2004 "Concentrating Solar Power- Barriers and Opportunities" - <http://cohesion.rice.edu/CentersAndInst/CNST/emplibrary/Wilkins.ppt>



# Custo de outras fontes

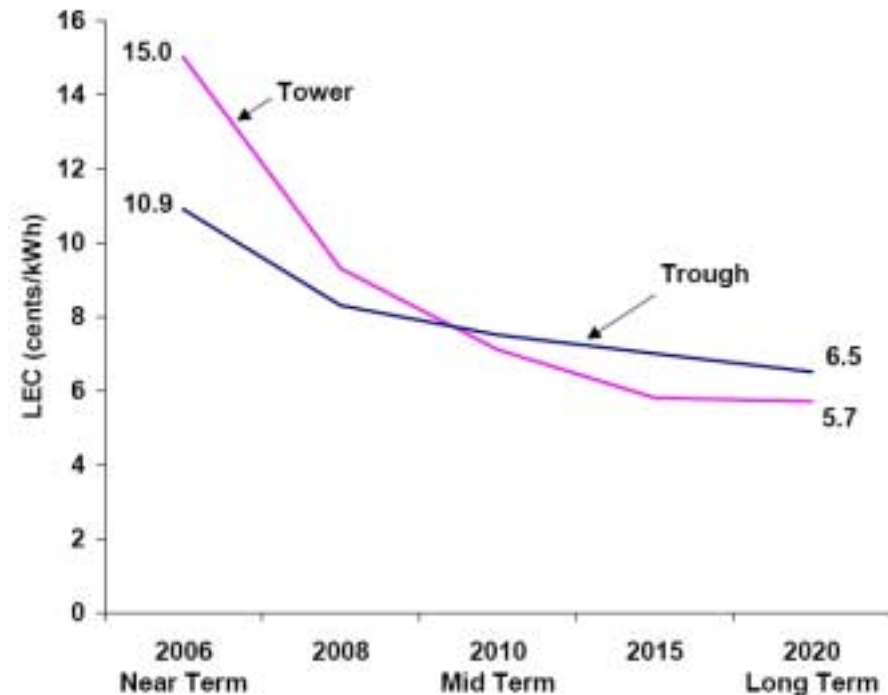


Pacca, S., Horvath, A., "Greenhouse Gas Emissions from Building and Operating Electric Power Plants in the Upper Colorado River Basin." *Env.Sci.Techn.*, 36(14), 2002, pp. 3194-3200



# Calhas vs torres solares

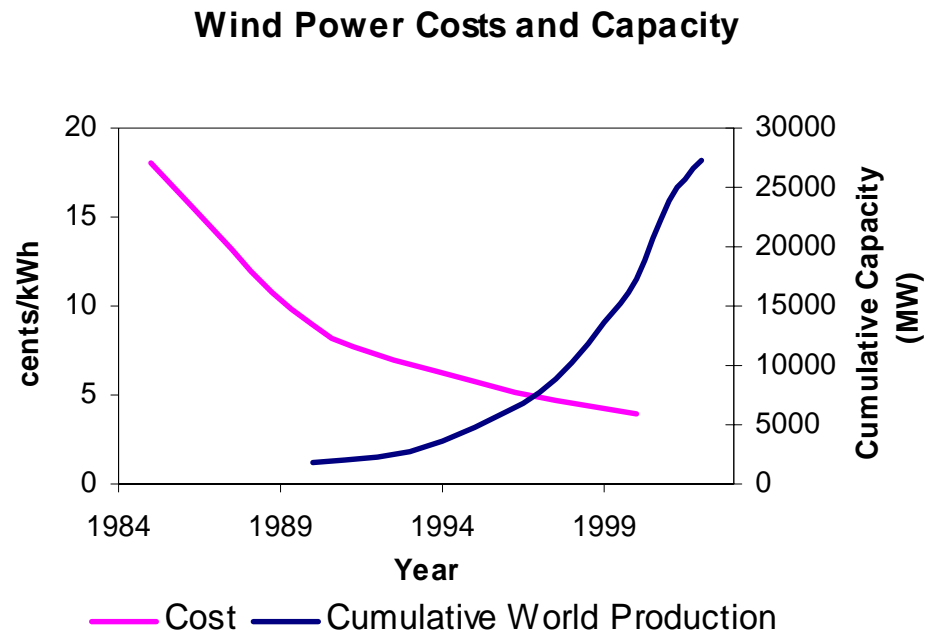
- Calhas solares com avaliação mais consistente (empreendimentos comerciais operando)
- Torres solares prometem custos menores com maturação da tecnologia





# Redução dos custos

Cost reduction realized by wind power is a good example for CSP.

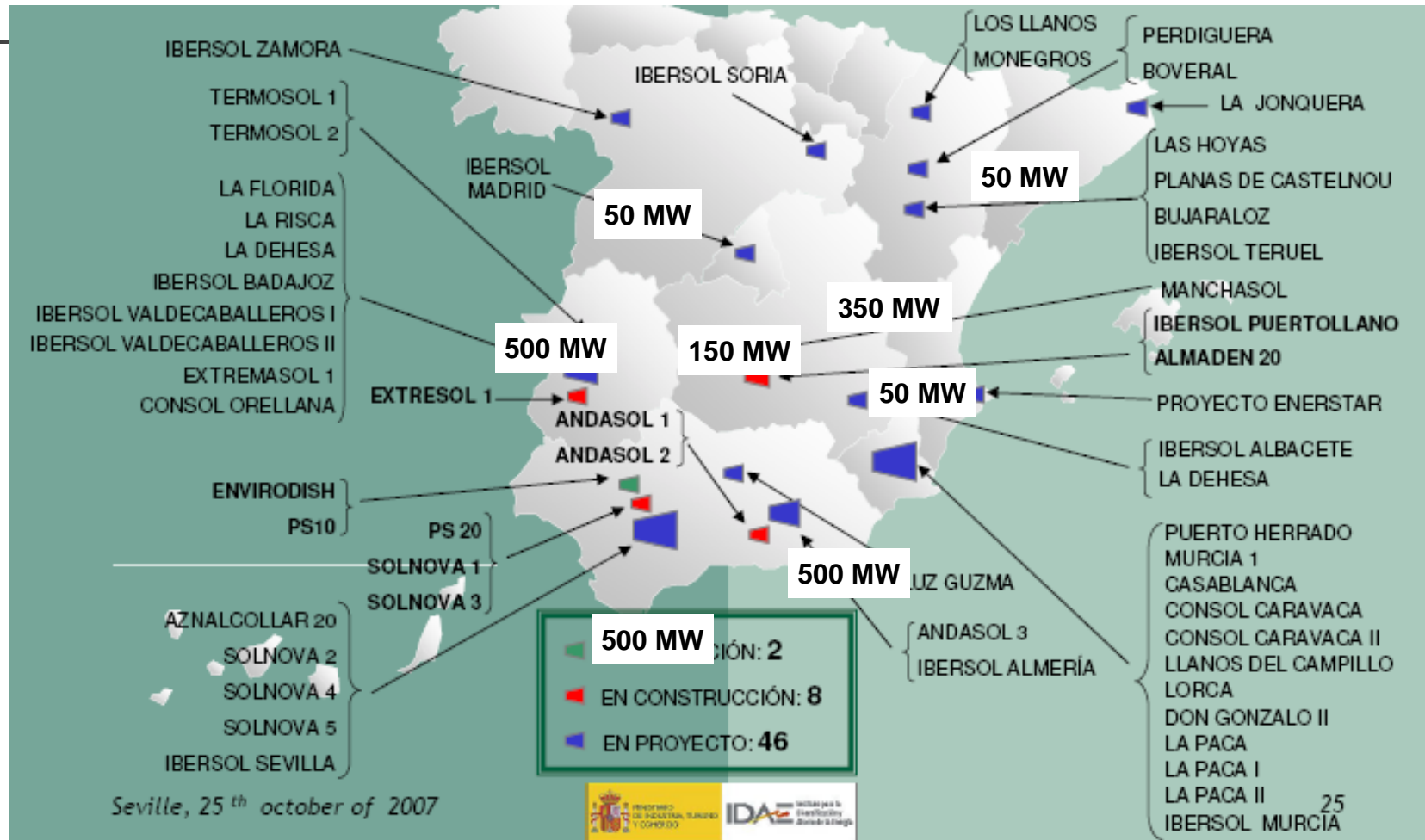


- Initial cost of wind power was high but decreased as installed capacity increased.
- The same trend will occur for CSP.





# Situação na Espanha



Até o final de 2007, mais de 50 empreendimentos com aproximadamente 2.150 MW foram registrados no Ministério da Indústria espanhol (Itaipu= 14.000 MW)



# Outras tecnologias

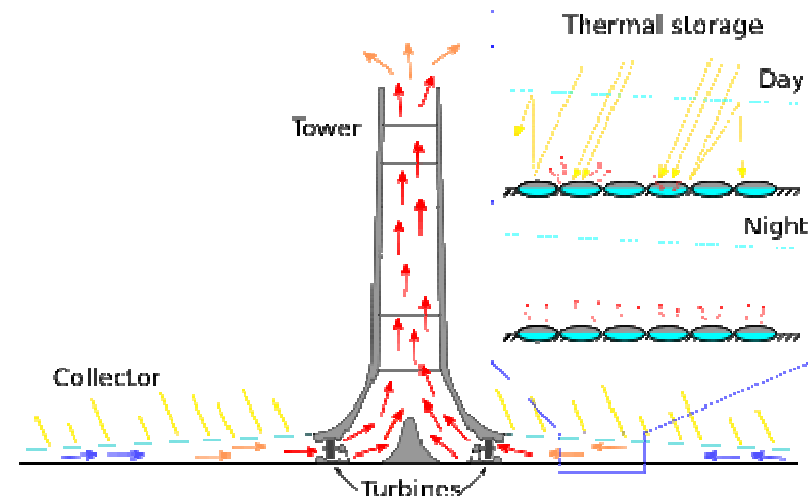
---





# Chaminés Solares

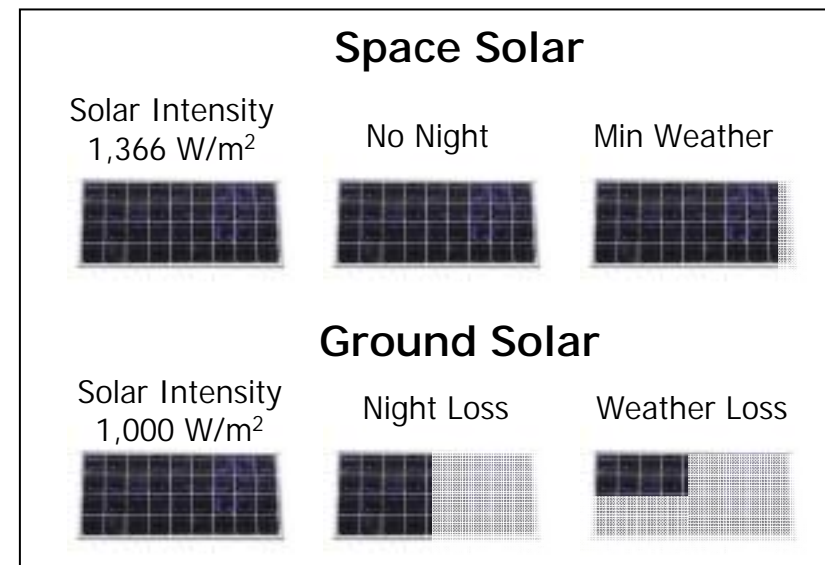
- Proposta na Austrália, baseada em tecnologia alemã, e experimento na Espanha
- Projeto chaminé 200 MW
- Experimento original 1982-1988 na Espanha (eficiência de 0,53%)





# Coletores solares orbitais

- Captação de energia solar fotovoltaica no espaço e envio para a terra por antena de microondas ou raio laser
- Captador em terra, associado a uma usina elétrica, converteria a energia enviada para uso na rede elétrica
- Não existem informações precisas sobre os custos e riscos inerentes a esta tecnologia





# Leitura Obrigatória

- Mills, D. 2004 "Advances in solar thermal electricity technology" Solar Energy 76 (2004) 19-31



## Leitura Recomendada

- Charles R.P., Davis K.W. Smith J.L. (Sargent & Lundy Consulting), 2005 "Assessment of Concentrating Solar Power Technology Cost and Performance Forecasts" - Apresentado no Electric Power 2005, Chicago 5-7 abril 2005
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. (1991); *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2 ed. New York; John Wiley & Sons. 919 p.
- Demais referências reproduzidas nesta apresentação

A large solar thermal collector (heliostats) is shown in the foreground, partially obscuring the view. The collector is a large, curved, metallic structure with a grid of supports. In the background, a bright sun is setting over a horizon, creating a warm orange and yellow glow in the sky. The overall scene is a sunset over a solar thermal power plant.

# Thomaz Borges

LEPTEN / EMC / UFSC

[tborges@emc.ufsc.br](mailto:tborges@emc.ufsc.br)