

# CENTRAIS HELIOTÉRMICAS



EMC 5489 – Energias Renováveis  
Colaborador: Marcelo Wendel



# Central Heliotérmica: Conceito

- Similar a usinas termoelétricas convencionais
- Mesmos processos térmicos de conversão
  - Turbina a vapor
  - Turbina a gás
  - Motor Stirling
- Radiação solar como fonte primária de calor
  - Substituindo
    - Combustíveis fósseis
    - Energia nuclear

# Central Heliotérmica: Conceito

- Ciclo térmico convencional  
(Rankine, Brayton, Stirling)
  - Temperatura da fonte de calor maior
  - Eficiência do ciclo maior
- Alternativas
  - Vácuo no interior dos receptores
  - Radiação concentrada
    - Tecnologias de energia solar concentrada  
*Concentrated solar power (CSP)*

# Características

- Vantagens
  - Fonte de energia gratuita
  - Materiais comuns
  - Segurança energética
  - Redução da emissão de CO<sub>2</sub>
- Desvantagens
  - Alto investimento inicial
  - Operação e manutenção dos coletores
  - Grandes áreas de captação



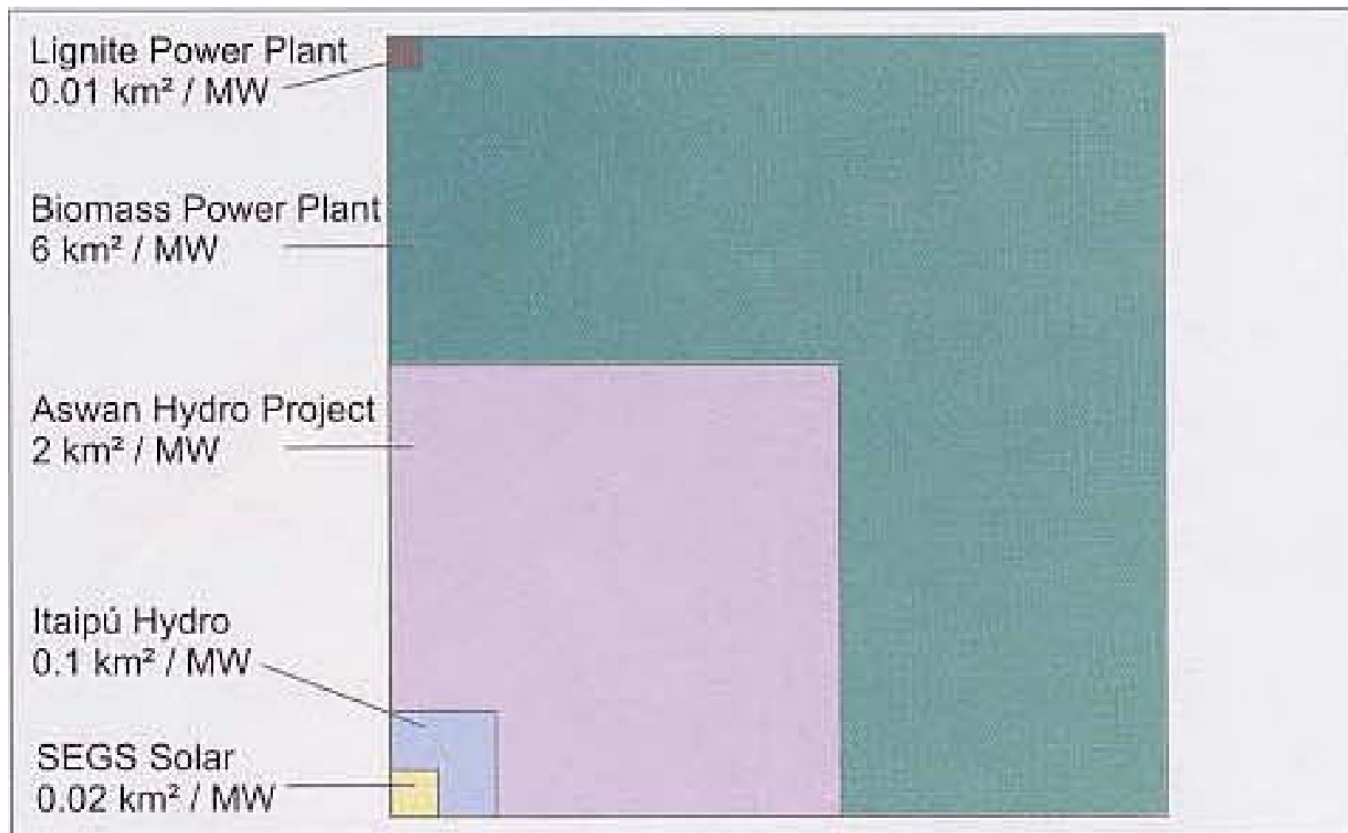
# Características

- Grandes áreas de captação



# Características

- Mesmo assim, área de terreno necessário muito menor em relação a hidroelétricas!





# Concentração da Radiação

- Coletores planos

área de recepção = área de perdas

- Coletores concentradores

área de recepção >> área de perdas



# Concentração da Radiação

- IST-PT Solar Collector
  - Não-evacuado / 100-300°C
  - Razão de concentração: 45
- Luz LS-2 Solar Collector
  - Evacuado / 100-400°C
  - Razão de concentração: 71

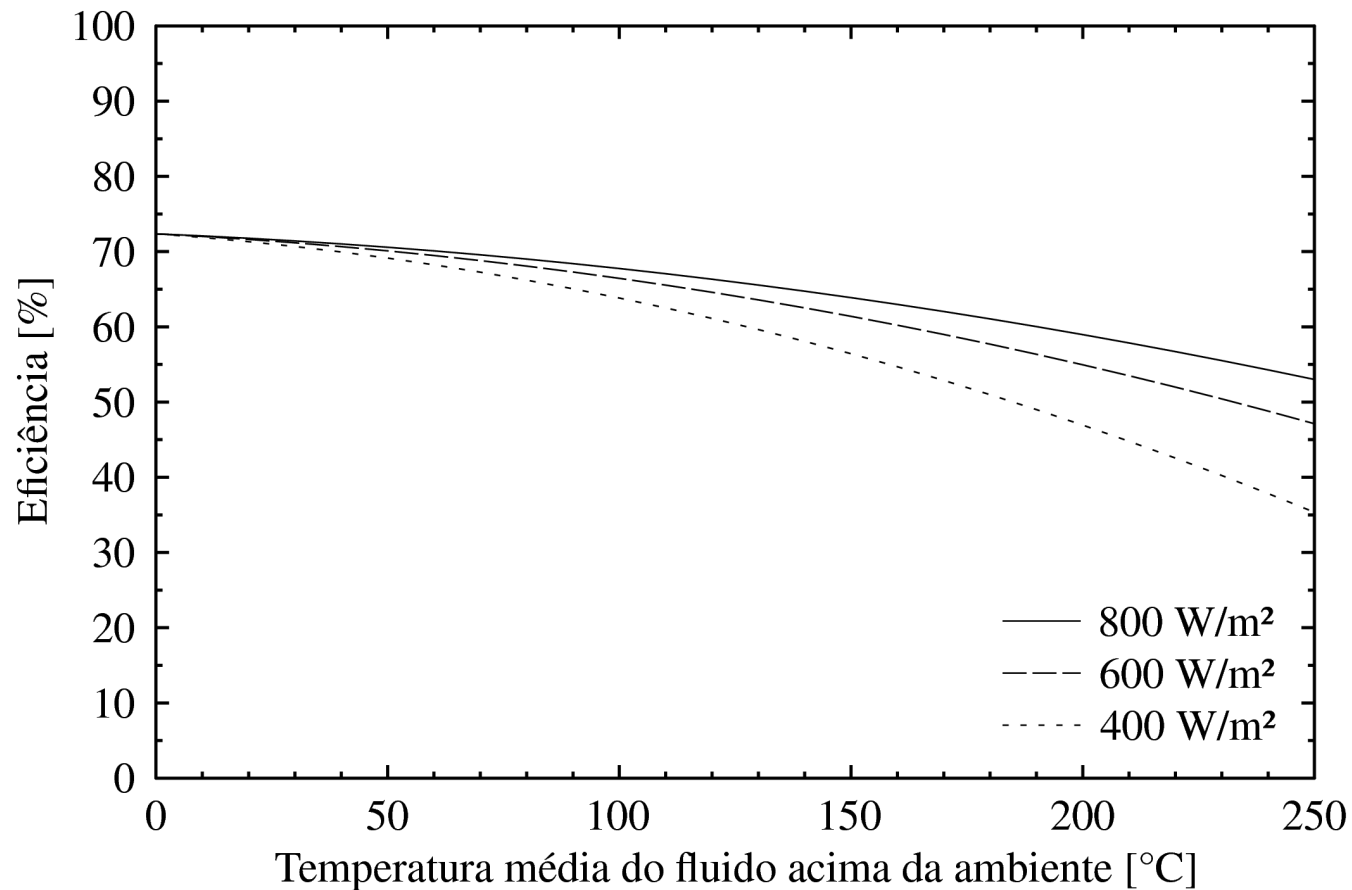
DUDLEY, V. E.; EVANS, L. R.; MATTHEWS, C. W. Test results: Industrial Solar Technology Parabolic Trough Solar Collector. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, nov. 1995. Relatório SAND94-1117.

DUDLEY, V. E.; KOLB, G. J.; MAHONEY, A. R.; MANCINI, T. R.; MATTHEWS, C. W.; SLOAN, M.; KEARNEY, D. Test results: SEGS LS-2 Solar Collector. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, dez. 1994. Relatório SAND94-1884.



# Concentração da Radiação

- Curva de eficiência (coletor IST-PT)



# Concentração da Radiação

- Interposição de dispositivos ópticos
- Diversos métodos
  - Refletores ou refratores
  - Superfícies de revolução ou cilíndricas
  - Superfícies contínuas ou segmentadas
  - Razões de concentração: de 1 a  $10^{5*}$

\* DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal processes. 3. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

# Concentração da Radiação

- Razão de concentração maior
  - Temperatura maior
  - Praticamente apenas radiação direta  
(radiação difusa insignificante)
  - Rastreamento
  - Requisitos mais estritos
    - Qualidade óptica das superfícies
    - Posicionamento do sistema

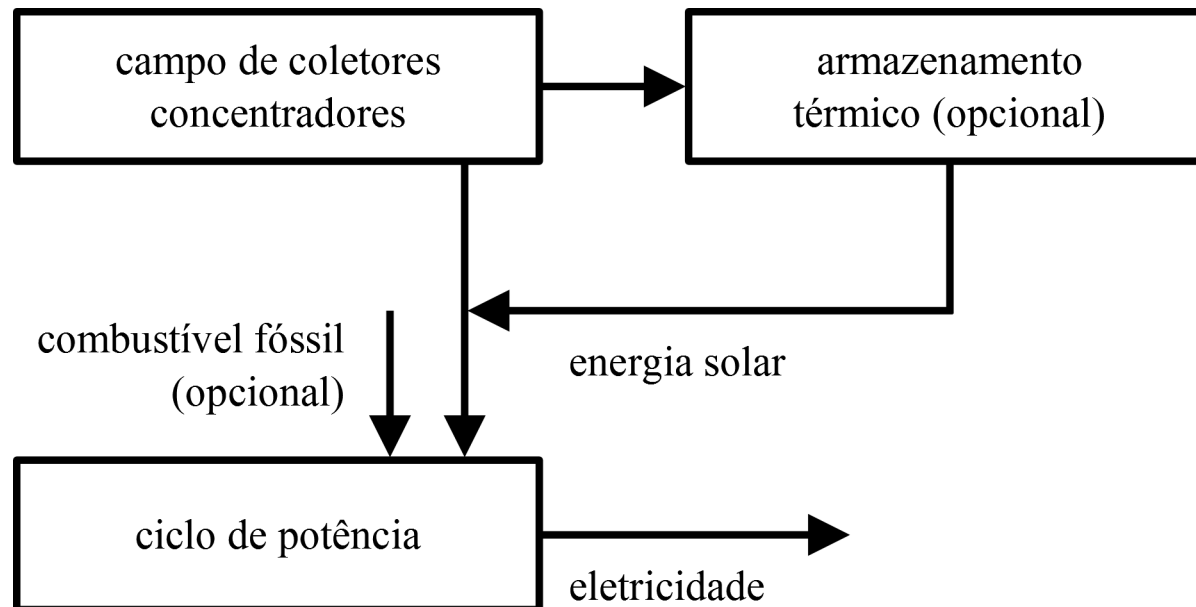
# Concepções

- Conceção típica
  - Concentrador
  - Receptor  
(captação da radiação em forma de calor)
  - Meio de transporte  
(fluido térmico)
  - Ciclo de potência  
(conversão do calor em trabalho)



# Concepções

- Possibilidade: aumento ou deslocamento do despacho (vantagem em relação a PV)
  - Fonte complementar (usinas híbridas)
  - Armazenamento térmico



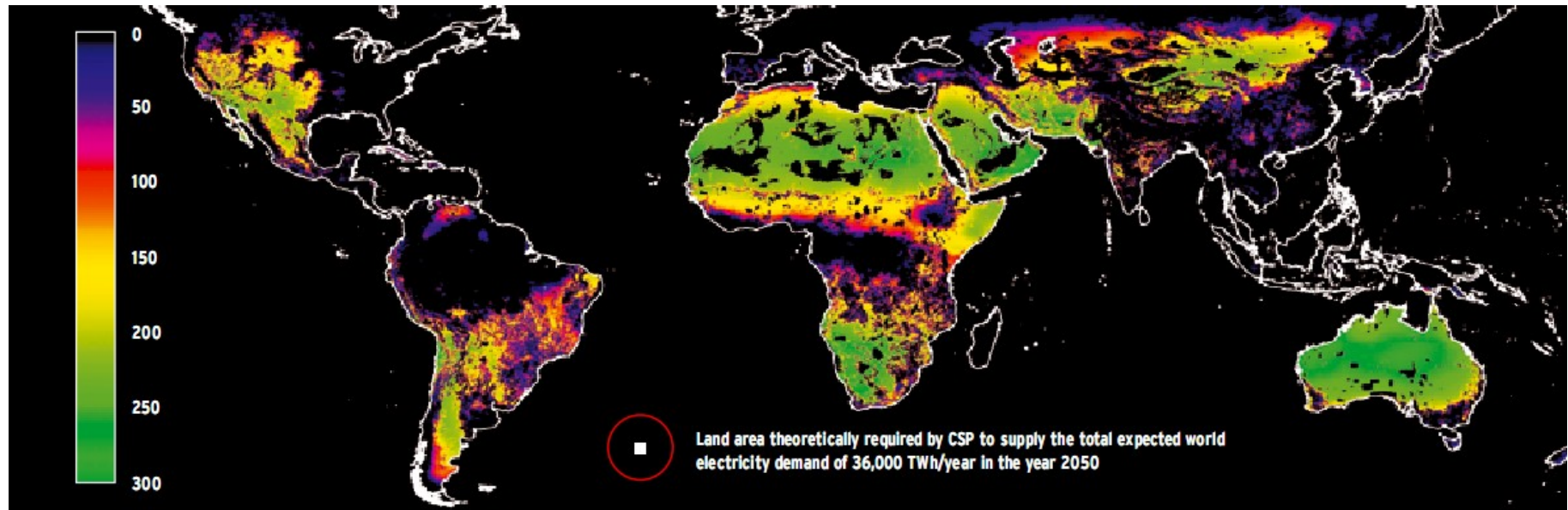
# Localidades Ideais

- Critérios considerados
  - Intensa incidência de radiação direta (baixos níveis de umidade e poeira)
  - Velocidade do vento moderada
  - Água para resfriamento
  - Fontes convencionais de energia
  - Disponibilidade de terreno
  - Condições topográficas (calhas parabólicas)
  - Qualidade do solo
  - Acesso a rodovias
  - Proximidade de linhas de transmissão
  - Infraestrutura urbana
  - Suporte técnico
  - Força de trabalho

# Potencial no Mundo

- Regiões promissoras
  - Países mediterrâneos da Europa
  - Norte da África
  - Oriente Médio
  - Sudoeste dos Estados Unidos
  - Austrália
  - Partes da China e Índia
  - Desertos do Chile e África do Sul

# Potencial no Mundo



World wide potential of solar electricity generation by CSP in GWh/km<sup>2</sup> year (based on radiation data from G. Cziisch, ISET).



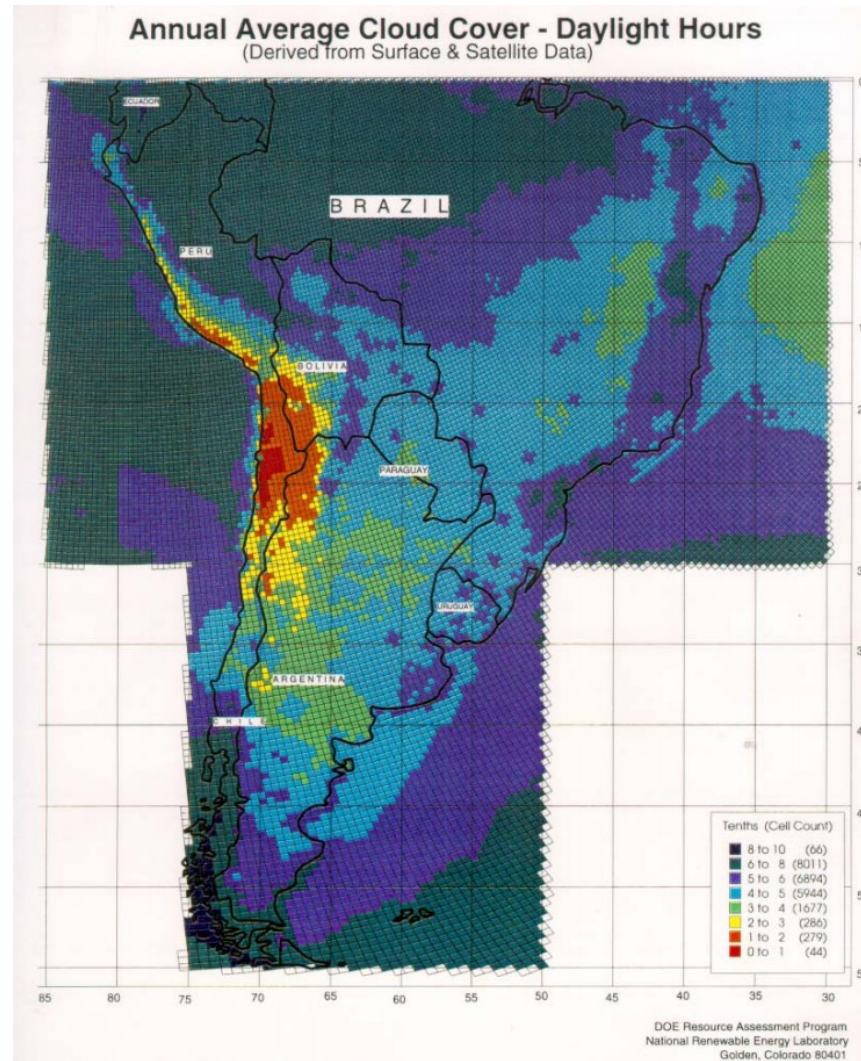
# Potencial no Brasil

- Bacia do Rio São Francisco (água disponível)  
Entre o interior da BA e o norte de MG

Localidade	Média anual de radiação direta ao longo de um dia na horizontal [kWh/m <sup>2</sup> ]
Florianópolis, SC	2,60
Fortaleza, CE	3,39
Petrolina, PE	3,68
Bom Jesus da Lapa, BA	4,07
Sobradinho, BA	3,93
Januária, MG	4,01

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar. 1. ed. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

# Potencial no Brasil

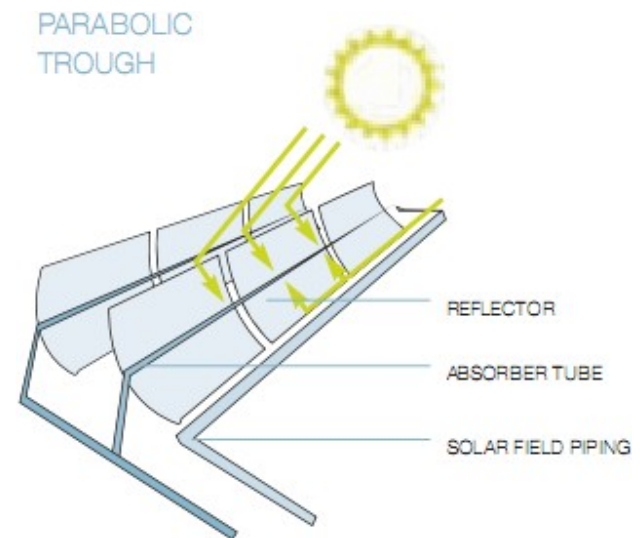
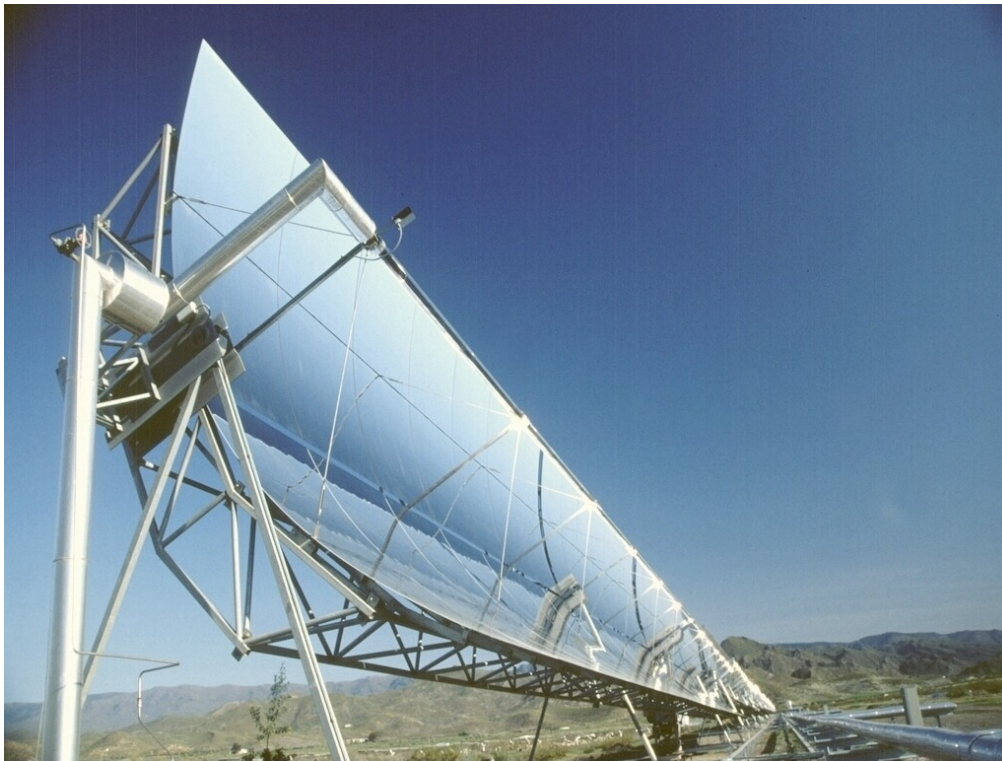


# Tecnologias

- Tecnologias comercialmente relevantes
  - Concentradores lineares
    - Calhas parabólicas
    - Refletores Fresnel
  - Concentradores pontuais
    - Torres solares
    - Pratos parabólicos

# Tecnologias

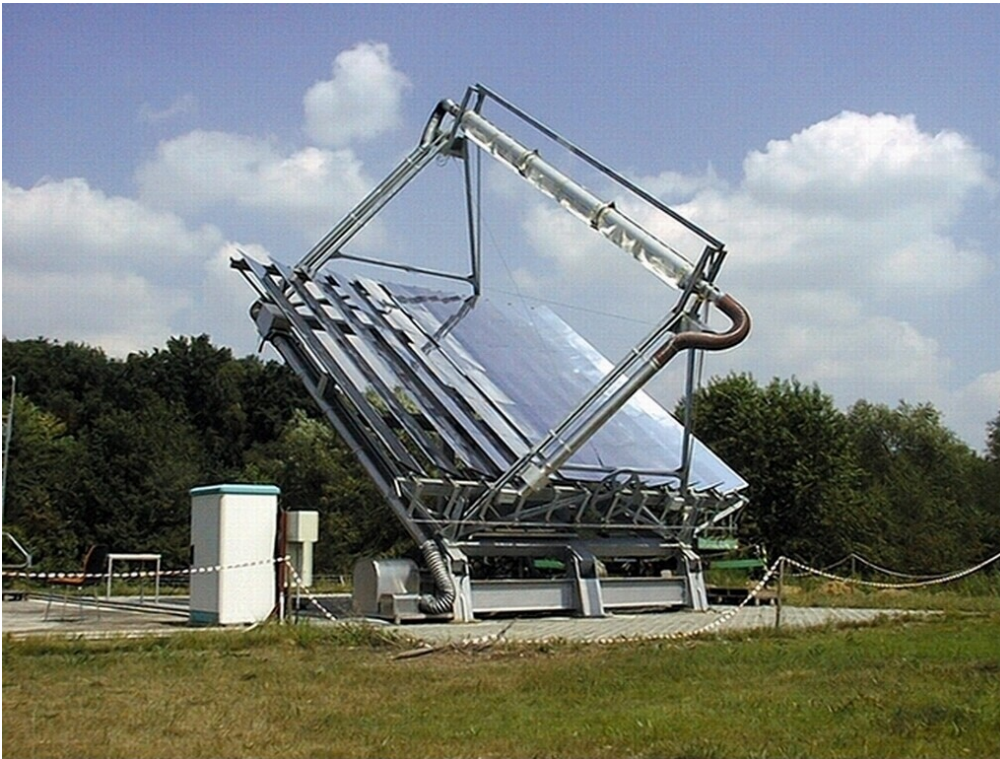
- Calhas parabólicas



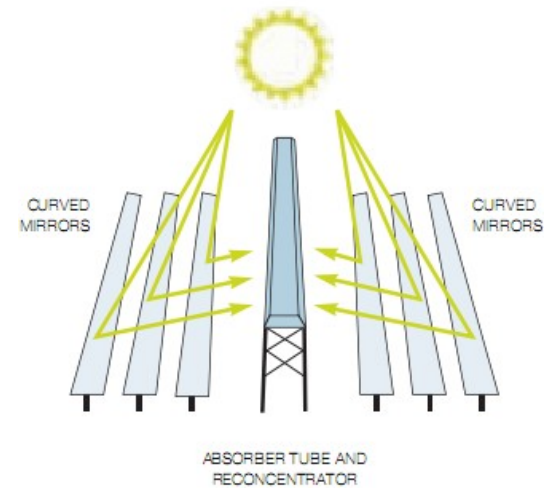


# Tecnologias

- Refletores Fresnel

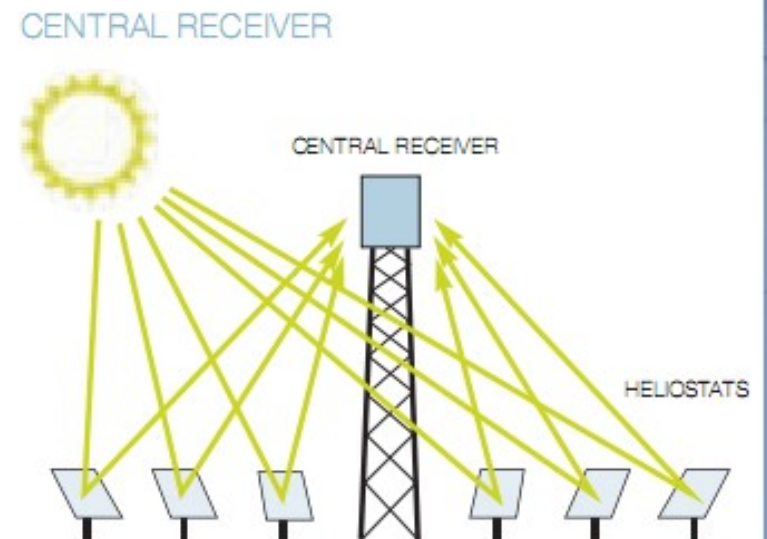


LINEAR FRESNEL REFLECTOR (LFR)



# Tecnologias

- Torres solares



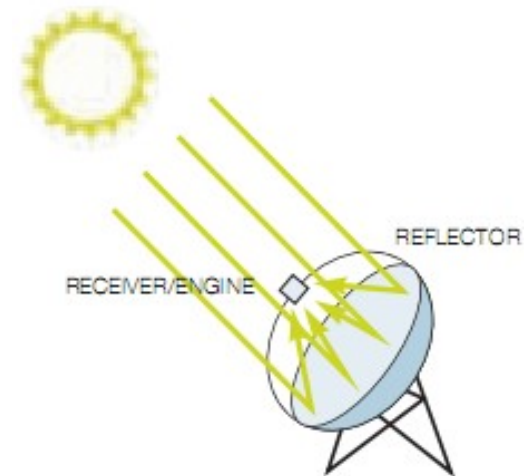


# Tecnologias

- Pratos parabólicos



PARABOLIC DISH



# Tecnologias

- Calha parabólica:  
mais amadurecida  
(SEGS)

RICHTER, C.; TESKE, S.; SHORT, R.  
Concentrating solar power: global  
outlook 09. Amsterdam, The  
Netherlands: Greenpeace International,  
mai. 2009. Relatório.



Tipo de tecnologia	Capacidade instalada em 2009 [MW]	Eletricidade produzida até 2009 [GWh]
Calhas parabólicas	500	>16000
Torres solares	40	80
Refletores Fresnel	5	8
Pratos parabólicos	0,5	3

# Histórico

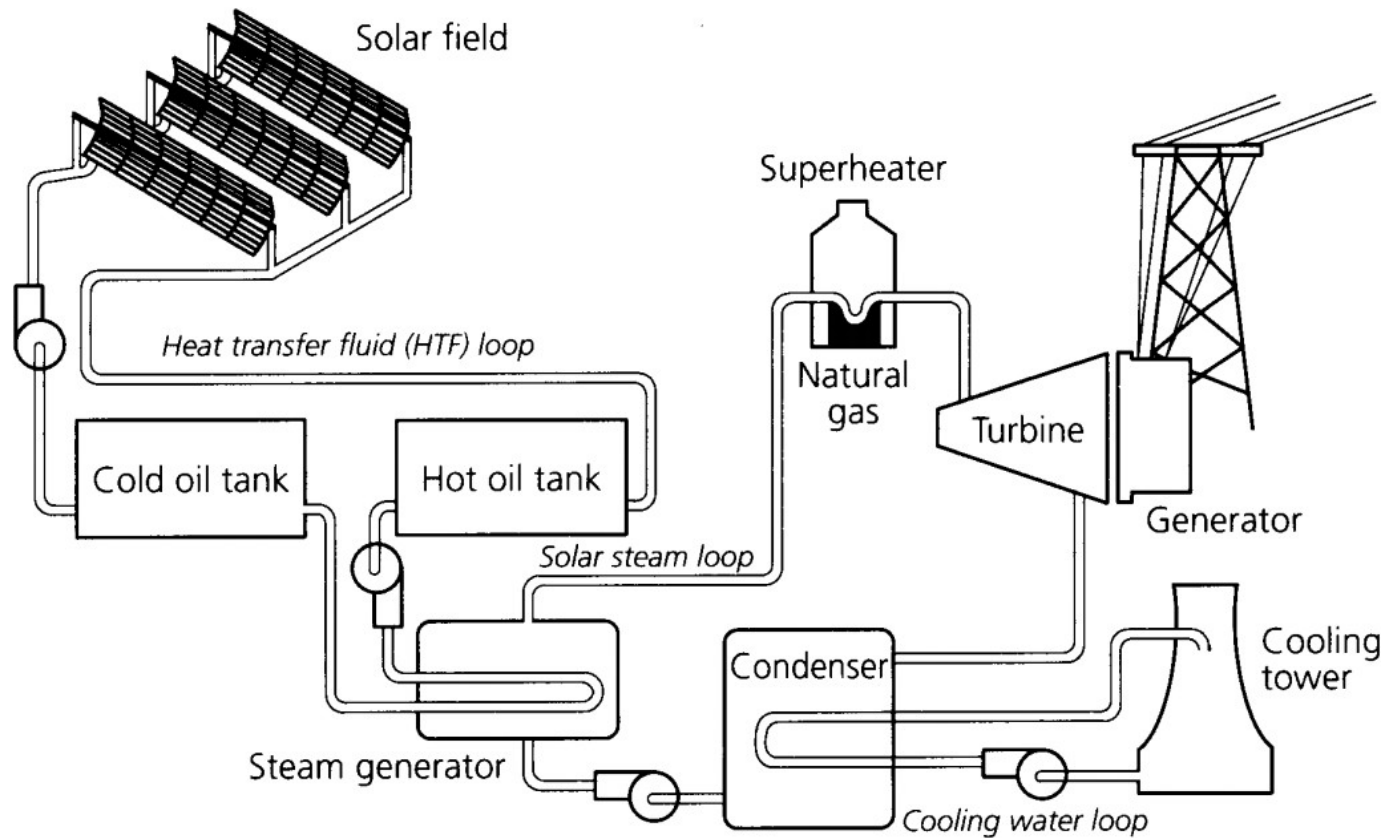
- Conversão de radiação solar térmica em trabalho mecânico
  - Ano 1872: prensa movida por vapor de coletores solares em Paris
  - Década de 70: projetos de demonstração
    - Willard (25 hp)
    - Gila Bend (50 hp)
    - Coolidge (200 kW)
  - Década de 80: realidade comercial
    - SEGS (escala de MW)



# Histórico

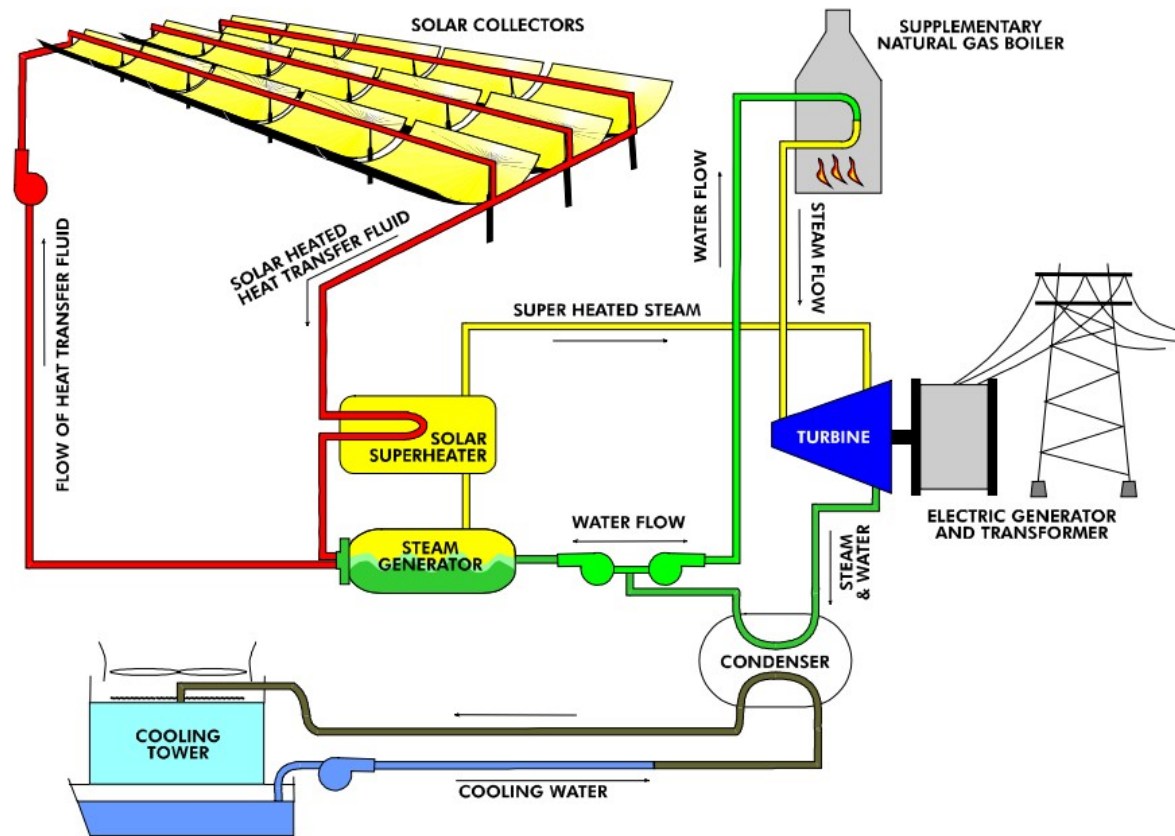
- Solar Electric Generating Systems (SEGS)
  - Conjunto de nove usinas
  - Potências entre 14 e 80 MWe
  - Potência total de 354 MWe
  - Deserto de Mojave na Califórnia
  - Empresa Luz International Ltd
  - Conectadas à rede entre 1984 e 1991
  - Início: crise do petróleo na década de 70
  - Fim: falência da empresa Luz em 1991
    - Incentivos e custos de energia reduzidos

# SEGS I



PILKINGTON SOLAR INTERNATIONAL. Survey of thermal storage for parabolic trough power plants. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, set. 2000. Relatório NREL/SR-550-27925.

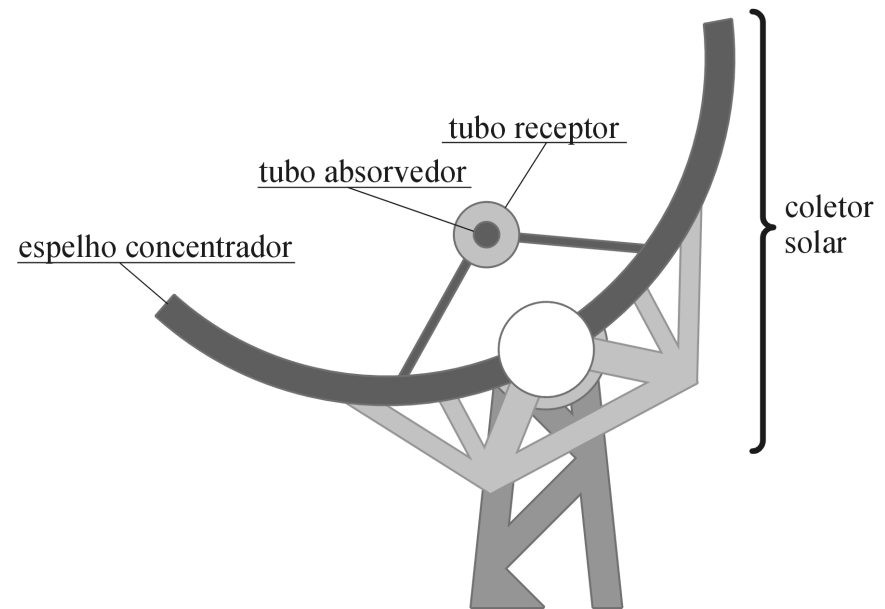
# SEGS VI



COHEN, G. E.; KEARNEY, D. W.; KOLB, G. J. Final report on the operation and maintenance improvement program for concentrating solar power plants. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, jun. 1999. Relatório SAND99-1290.

# Calhas Parabólicas

- Estrutura
  - Espelho: filme polido de prata ou alumínio
  - Tubo receptor: aço, cobertura absorvedora
  - Envoltório: vidro, revestimento anti-reflexivo



# Calhas Parabólicas

- Rastreamento em único eixo horizontal
  - Direção norte-sul
    - Maior produção ao longo do ano
    - Maior produção no período do verão
    - Mais interessante para latitudes maiores
  - Direção leste-oeste
    - Mais uniforme ao longo do ano
- Rastreamento em eixo inclinado
  - Padrões de escoamento diferentes
  - Tubulação maior (mais perda de carga)
  - Incidência de radiação maior



# Calhas Parabólicas

- Concepção comum (com trocador de calor)
  - Fluido térmico no campo de coletores
    - Óleo mineral ( $< 300^{\circ}\text{C}$ )
    - Fluido sintético ( $> 300^{\circ}\text{C}$ )
  - Fluido de trabalho no ciclo de Rankine
    - Vapor de água
    - Fluido orgânico  
(refrigerantes, hidrocarbonetos)
- Concepção alternativa (geração direta)
  - Água (coletores e ciclo de Rankine)

# Calhas Parabólicas

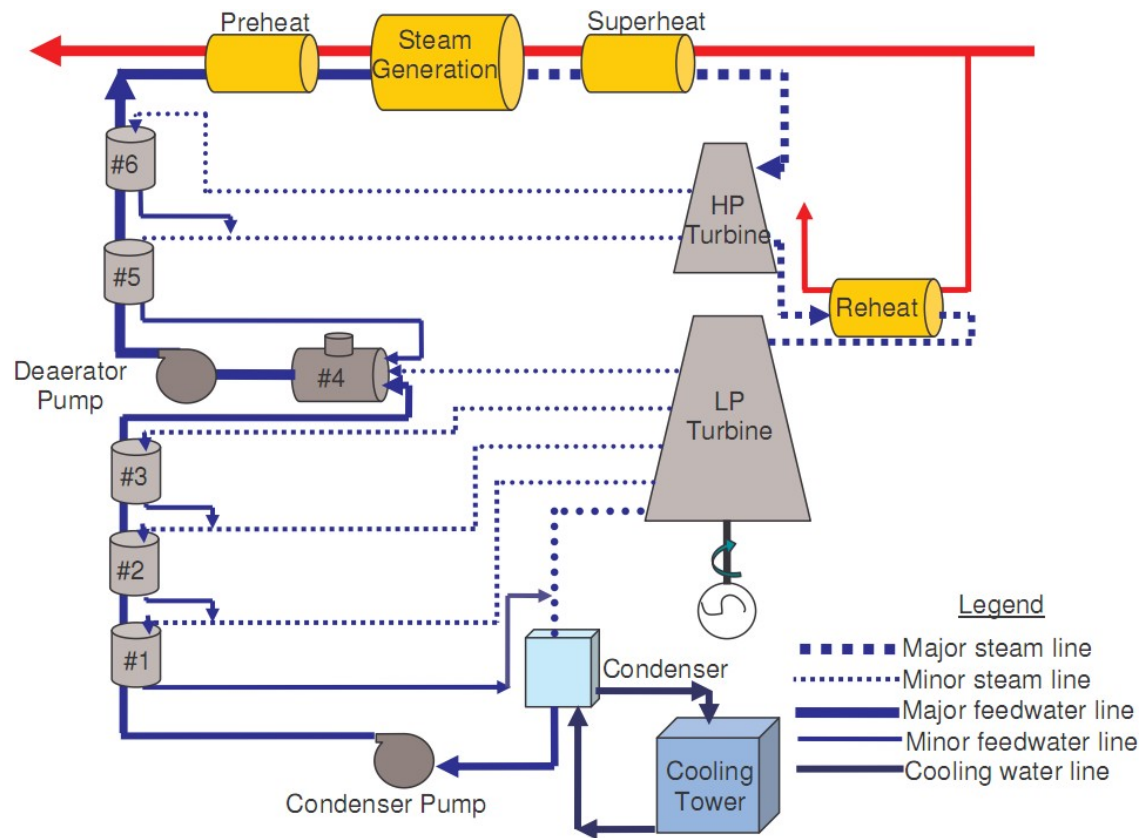
- Vantagens

- Menor custo de geração de eletricidade a partir de energia solar em grande escala
- Custos de investimento e operação comercialmente demonstrados
- Comercialmente disponível

- Desvantagens

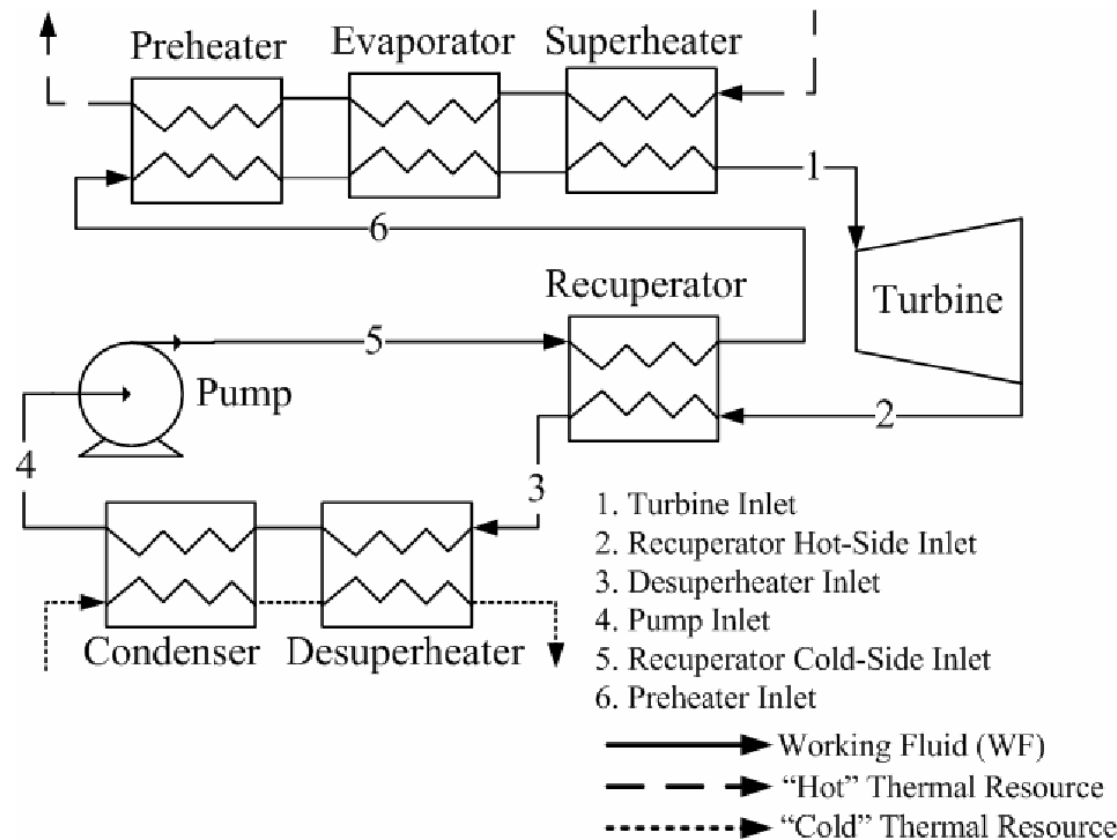
- Temperatura limitada pelo fluido térmico
- Incidência oblíqua de radiação
- Necessidade de terreno plano

# Ciclo de Rankine Convencional



PATNODE, A. M. Simulation and performance evaluation of parabolic trough solar power plants. Dissertação (Mestrado) - University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 2006.

# Ciclo de Rankine Orgânico



MCMAHAN, A. C. Design and optimization of organic Rankine cycle solar-thermal powerplants. Dissertação (Mestrado) - University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 2006.

# Armazenamento Térmico

- Necessidade
  - Crítico com grande capacidade instalada
  - Pouco crítico com capacidade pequena
    - Armazenamento em reservatórios de água (e.g. parque brasileiro de hidrelétricas)
- Funções
  - Suavização de efeitos transientes
  - Deslocamento do período de despacho
  - Aumento do período de despacho



# Armazenamento Térmico

- No próprio fluido térmico
  - Único reservatório estratificado (SEGS I)
  - Dois reservatórios (quente e frio)
- Em um segundo meio  
(sólido, líquido ou em transição de fase)
  - Com trocador de calor: sais fundidos
  - Sem trocador de calor: rocha, concreto
    - (+) Quantidade de fluido e estratificação
    - (-) Transporte de calor e perda de carga

# Armazenamento Térmico

- Critérios de seleção
  - Custo (tanque, meio, trocador de calor)
  - Pressão de vapor do meio
  - Temperatura de operação do meio
    - Estabilidade química
    - Inflamabilidade
    - Congelamento
  - Compatibilidade com outros materiais
  - Capacidade térmica volumétrica
  - Sistemas de controle associados
  - Risco de incêndio  
(na planta solar de Willard e na SEGS I)

# Energia Complementar

- Fonte de calor
  - Gás natural (mais comum)
  - Carvão, biomassa
- Configurações
  - Aquecimento do fluido térmico  
(SEGS VIII-IX)
  - Geração de vapor  
(SEGS II-VII)
  - Superaquecimento do vapor  
(SEGS I)

# Condensação

- Torre evaporativa
  - Menos sensível à temperatura ambiente
  - Maior eficiência
- Condensador resfriado a ar
  - Menor consumo de água (deserto)
  - Comum em ciclos de Rankine orgânicos

# Dificuldades

- Armazenamento em grandes usinas (custo)
- Manutenção do vácuo
  - Infiltração de hidrogênio
  - Quebra de vidros
  - Perda da vedação
- Geração direta de vapor
- Conservação dos espelhos
  - Perda de refletividade (degradação, sujeira)
  - Quebra (vento)



# Situação Atual

- Capacidade instalada no mundo
  - 436 MW (2008)
  - +1000 MW (~2011)
- Usinas na Espanha (2009)
  - Em operação: 6 (81 MW)
  - Em construção: 12 (839 MW)

RICHTER, C.; TESKE, S.; SHORT, R. Concentrating solar power: global outlook 09. Amsterdam, The Netherlands: Greenpeace International, mai. 2009. Relatório.

# Custo

- Custo da eletricidade sem subsídios

	CF	\$/kW	Thirty-Year Levelized ¢/kWh (2005 Dollars)			
			IOU	IPP	Coop	Muni
Coal (high capacity factor)	90%	\$1,275	3.5	3.5	2.9	2.8
CC (high capacity factor)	90%	\$650	5.7	5.7	5.4	5.4
Coal (trough capacity factor)	56%	\$1,275	4.7	4.7	3.8	3.7
CC (trough capacity factor)	56%	\$650	6.3	6.3	5.9	5.8
CSP (trough)	56%	\$3,220	8.0	8.0	5.6	5.3
Geothermal	90%	\$2,300	3.7	3.7	2.8	2.7
Wind	40%	\$940	3.8	3.8	2.9	2.8

Note: CF= Capacity factor; IOU= Investor-owned utility; IPP= Independent power producer.

# Custo no Brasil

- Visita da SolarPACES ao Brasil em 1997
  - Custo de geração 12% maior no Brasil em relação aos Estados Unidos
    - Política de impostos e equipamento importado
  - Usina de calhas parabólicas de 80 MW
    - 114 US\$/MWh
  - Termoelétrica a óleo combustível em MG
    - 75 US\$/MWh
  - Energia hidroelétrica
    - 50 US\$/MWh

CORDEIRO, P. START mission to Brazil. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, fev. 1998. Relatório.

# Outras Tecnologias

- Chaminé solar (Austrália)
  - Aquecimento do ar em estrutura de vidro
  - Aerogerador próximo da base  
(sem emprego de ciclo térmico)
  - Eficiência: ~1%
  - Potência: 200 MWe
  - Altura: 1 km

# Referências

[www.nrel.gov/csp/troughnet](http://www.nrel.gov/csp/troughnet)  
[www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org)

# Contato

[marcelowendel@yahoo.com.br](mailto:marcelowendel@yahoo.com.br)