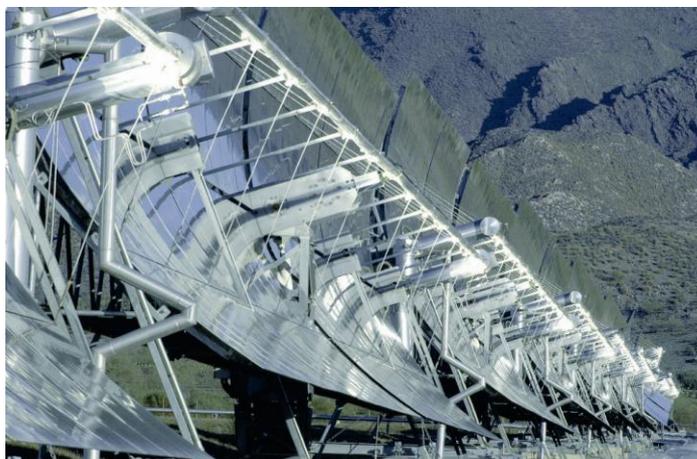




## Programa de Capacitação em Energias Renováveis



OBSERVATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS  
PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE



---

# Energia Solar Térmica

---

# Índice

Energia solar térmica .....	1
Objetivos .....	1
1. Introdução.....	2
1.1. A radiação solar .....	3
1.1.1. O espectro solar. Componentes da radiação solar .....	3
2. Bases de dados para radiação solar .....	5
3. Balanço energético em um coletor solar térmico.....	8
3.1. Funcionamento térmico de um coletor solar térmico .....	8
3.2. Mecanismos de transporte de energia.....	10
3.2.1. Radiação.....	10
3.2.2. Condução .....	11
3.2.3. Convecção .....	11
4. Sistemas solares térmicos: do coletor plano aos discos de concentração .....	12
4.1. Coletores de baixa temperatura (menor que 125°C) .....	13
4.2. Coletores de média e alta temperatura .....	17
5. Água quente sanitária e aquecimento solar .....	20
5.1. Configurações possíveis.....	20
5.1.1. Sistemas Diretos.....	20
5.1.2. Sistemas indiretos .....	21
5.1.3. Sistemas termossifão ou circulação natural.....	22
5.1.4. Sistemas compactos .....	23
5.2. Orientação e inclinação dos coletores.....	23
5.3. Aquecimento solar.....	24
6. Refrigeração e ar condicionado solar .....	26
6.1. Equipamentos térmicos de refrigeração em ciclo fechado .....	27
6.2. Ciclos abertos de refrigeração solar .....	29
6.3. Desenvolvimento nos países da América Latina e do Caribe .....	30
7. Calor solar para processos industriais .....	31
7.1. Chaves para a integração de plantas solares.....	32
7.1.1. Nível de temperatura do processo.....	32
7.1.2. Meio de transferência do fluxo de energia .....	34
7.1.3. Perfil de consumo .....	34

7.2. Exemplos de instalações solares em países da ALC.....	35
7.2.1. Secagem de frutas e hortaliças em Nicarágua .....	35
7.2.2. Secagem de café no Peru .....	36
7.2.3. Indústria de mineração no Chile .....	36
<b>8. Tecnologia de foco linear: coletores Cilíndrico parabólicos e Fresnel.....</b>	<b>38</b>
8.1. Componentes de coletores cilíndrico parabólicos .....	38
8.2. Concentradores lineares tipo Fresnel.....	41
8.3. Aplicações .....	42
8.4. Plantas de coletores de foco linear .....	44
8.4.1. Anteprojeto do campo solar .....	44
<b>9. Tecnologia de foco pontual: centrais de Receptor central e Discos parabólicos .....</b>	<b>46</b>
9.1. Sistemas de receptor central ou centrais de torre .....	46
9.1.1. O Campo Solar.....	46
9.1.2. O receptor .....	47
9.1.3. O sistema de aproveitamento da energia térmica.....	49
9.2. Sistemas de discos parabólicos.....	49
<b>10. Armazenamento térmico .....</b>	<b>51</b>
10.1. Armazenamento em calor sensível .....	51
10.1.1. Materiais de armazenamento sensível .....	51
10.1.2. Configurações de armazenamento sensível.....	53
10.2. Armazenamento em calor latente.....	55
10.2.1. Materiais para armazenamento em latente .....	55
10.2.2. Configurações de armazenamento sensível.....	56
10.3. Armazenamento termoquímico. ....	56
10.4. Aplicações .....	57
<b>11. Situação Mundial .....</b>	<b>58</b>
11.1. Sistemas solares para baixa temperatura .....	58
11.2. Sistemas solares para média e alta temperatura .....	60
11.3. Barreiras ao grande desenvolvimento da energia solar térmica .....	61
<b>Bibliografia .....</b>	<b>65</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>67</b>
Tabelas/ Ilustrações .....	67

# Energia solar térmica

## Objetivos

O objetivo deste curso é dar uma visão geral das potenciais aplicações da energia solar térmica, destacando aquelas que melhor se adaptam às condições e necessidades de países da América Latina e do Caribe. Partindo dos fundamentos físicos mais relevantes até os avanços tecnológicos mais atuais, o estudante adquirirá as capacidades e habilidades necessárias para definir e projetar, de forma elementar, sistemas energéticos que aproveitem a energia solar térmica em um determinado local.

# 1. Introdução

O princípio comum a todos os sistemas solares térmicos é o de que a radiação solar é captada e utilizada para aquecer um fluido (normalmente um líquido, ainda que também possa ser um gás como ar ou CO<sub>2</sub>).

## Importante

Os sistemas solares térmicos utilizam a capacidade da radiação solar de aquecer, diferenciando-se claramente dos sistemas fotovoltaicos, que se baseiam na capacidade de certos materiais para transformar, diretamente, a radiação solar em energia elétrica. As diferenças entre estes dois tipos de sistemas solares se referem à tecnologia, aplicações e desenvolvimento, de modo que não podem ser tratados da mesma forma.

Nos sistemas solares térmicos se utilizam coletores para coletar a energia solar. Há muitos tipos de coletores, mas os mais simples e grandes são os próprios edifícios. Este tema é tratado no módulo intitulado *Eficiência Energética na Edificação*.

Os **sistemas solares ativos** são aqueles que usam um equipamento específico para captar a energia solar: os coletores solares térmicos. O fluido aquecido pela energia solar que circula por seu interior pode direta ou indiretamente –por meio de um permutador de calor- transferir sua energia ao destino ou aplicação final.



## Quais são as vantagens específicas da energia solar térmica ativa?

- O **impacto ambiental** do ciclo de vida dos sistemas solares ativos é **praticamente nulo**. O uso de carvão, gás, petróleo ou energia nuclear representa um impacto importante sobre o meio ambiente e, portanto, nos fundos públicos e na sociedade. Trata-se de um impacto que não está refletido no custo específico ao usuário, de maneira que as energias renováveis, de modo geral, e os sistemas solares térmicos ativos, especificamente, competem em desigualdade de condições.
- A energia solar está **disponível quase em qualquer parte do mundo**, o que lhe confere um imenso potencial de aproveitamento, principalmente com sistemas solares térmicos que aproveitam a radiação solar global (sistemas para baixa e média temperatura).
- A energia solar térmica ativa sempre induz uma **redução no consumo de energia primária**, podendo ser combinada com quase qualquer sistema auxiliar de respaldo
- Os sistemas solares térmicos ativos têm um **custo previsível**, já que o montante principal do mesmo está associado ao investimento inicial, não dependendo de variações ou flutuações do mercado do custo de combustíveis.

## 1.1. A radiação solar

O Sol é um enorme reator de fusão nuclear formado por uma esfera de matéria gasosa quente de 1,39 milhões de quilômetros de diâmetro, que constitui a principal fonte de energia para a Terra, situada a uma distância média de  $1,496 \cdot 10^8$  km. Devido à radiação solar, a temperatura na superfície terrestre é cerca de  $250^\circ\text{C}$  superior à temperatura que existiria na superfície se esta dependesse somente do calor interno.

O Sol radia continuamente uma potência de  $3,8 \cdot 10^{23}$  kW, das quais a Terra intercepta  $1,7 \cdot 10^{14}$  kW. A energia solar recebida na atmosfera exterior da Terra em um ano se conhece como SERPE (*Solar Energy Received Per Year*) e corresponde a  $1,55 \cdot 10^{15}$  MWh, quantidade que equivale aproximadamente a 12000 vezes a energia consumida no mundo, considerando os dados publicados de produção e consumo energético mundial durante o ano 2005 [British Petroleum, 2006]. Da radiação recebida na superfície exterior, 30% é refletida ao espaço, 47% é absorvido pela atmosfera, mares e Terra para manter a temperatura ambiente, e o restante 23% se usa para manter a convecção atmosférica e o ciclo hidrológico.

### 1.1.1. O espectro solar. Componentes da radiação solar

As diversas formas que apresenta a energia radiante são reunidas no chamado **espectro eletromagnético**, dividido, por sua vez, em diferentes bandas caracterizadas por suas frequências ou comprimentos de onda. A energia radiante pode ser considerada como um feixe de partículas ou energia luminosa denominados fótons que viajam descrevendo um movimento ondulatório na velocidade de a luz. Cada fóton tem um comprimento de onda,  $\lambda$ , e uma quantidade de energia,  $E$ , relacionadas entre si pela constante de Planck.

Certas bandas de comprimento de onda são conhecidas por nomes especiais. A mais conhecida é o *espectro visível*, que compreende o intervalo de radiação com comprimentos de onda de  $0,38$  a  $0,75$   $\mu\text{m}$ . A região *infravermelha* compreende a radiação com comprimentos de onda de  $0,75$  a aproximadamente  $100$   $\mu\text{m}$ ; as ondas de radiação de comprimentos de onda que excedem os  $100$   $\mu\text{m}$  são conhecidas como *ondas de radio*. A região de radiação com comprimento de onda inferior ao visível compreende regiões do *ultravioleta*, *os raios X* e *os raios gamma*.

A radiação solar é a energia radiante que vem do Sol e em seu espectro podem ser distinguidas igualmente as distintas regiões do visível, infravermelho e ultravioleta. **O máximo de intensidade do espectro solar cai no centro do espectro visível** que se estende de  $0,38$  a  $0,74$   $\mu\text{m}$ .



A atmosfera terrestre tem alguma influencia sobre a radiação solar recebida na superfície da Terra?

A radiação solar, em seu caminho até a superfície terrestre, sofre ao passar pela atmosfera uma atenuação devido a processos de *absorção* e *de dispersão* (ou difusão).

- A absorção da radiação solar na atmosfera, que produz uma redução de sua intensidade, deve-se principalmente ao ozônio da zona ultravioleta do espectro, ao vapor de água e ao dióxido de carbono nas bandas do infravermelho.
- A dispersão da radiação na sua passagem pela atmosfera, fenômeno mais conhecido como *scattering*, é causada pela interação da radiação com as moléculas de ar, água (vapor ou gotas de condensado) e, de modo geral, com pelas partículas em suspensão. O grau de dispersão dá-se em função do número e tamanho de partículas através das quais a radiação solar deve passar.

A dispersão da radiação solar provoca múltiplas mudanças em sua direção e, junto com a absorção, uma considerável redução de energia. A fração da radiação solar que chega à superfície terrestre sem uma trajetória definida (radiação multidireccional) se denomina **radiação solar difusa (Gd)**. A radiação difusa varia em uma gama de menos de 10% da radiação global, para condições de céu claro e elevações solares altas (meio dia), até o 100% quando o disco solar não está visível devido a presença de nuvens.

A **radiação solar direta (Gb)** é aquela fração da radiação solar que chega à superfície terrestre com uma trajetória bem definida, que une o Sol com o ponto em que está situado o observador na superfície terrestre. Por ter carácter vectorial, pode ser concentrada por lentes ou refletores. Este componente pode significar uma fração de 90% da radiação global em dias muito ensolarados (céu claro), sendo nula em dias completamente cobertos por nuvens.

A **radiação refletida (Gr)**, também denominada albedo, é a radiação que chega a uma superfície determinada como consequência da reflexão da radiação solar no solo ou em superfícies verticais. Normalmente rerepresenta uma fração muito pequena da radiação solar global, mas pode chegar a ser algo mais de 40% da radiação global.

A **radiação global (G)** sobre uma superfície horizontal é a soma destes três componentes.

$$G = Gb(H) + Gd + Gr$$

Onde  $Gb(H)$  é a radiação direta sobre o plano horizontal, i.e.,  $Gb \cdot \cos\theta$ , sendo  $\theta$  o ângulo de incidência da radiação solar, isso é, o ângulo que forma o vector que une o sol com a Terra e a superfície horizontal correspondente.

Portanto, em um dia ensolarado predominará a radiação solar direta e em um dia nublado, a difusa, enquanto que a refletida depende sempre do ambiente e é muito importante em zonas nevadas ou nas cidades com edifícios altos.

### Importante

De acordo com componentes da radiação solar a ser utilizados, utiliza-se um tipo ou outro de coletores solares térmicos.

## 2. Bases de dados para radiação solar

No estudo e dimensionamento de sistemas de aproveitamento de energia solar térmica é necessário conhecer a disponibilidade energética da fonte, tanto quantitativamente quanto qualitativamente. Assim, e dependendo do tipo de coletor solar térmico a utilizar, é necessário determinar cada um dos componentes da radiação solar incidente na superfície de aproveitamento: direta, difusa e refletida

### Importante

As bases de dados disponíveis na internet ou procedentes de pacotes de software comerciais constituem uma ferramenta muito útil para verificar, ao menos em primeira instância, a adequação de um local para uma instalação solar térmica.



Refleta por um momento: que dados são usados para a construção destas bases de dados?

Efetivamente, estas bases de dados estão construídas a partir de dados de radiação de anos anteriores, sejam de sensores ou de imagens de satélite, já que os fatores climáticos que condicionam a quantidade e forma de radiação que chega a uma determinada superfície na Terra são impossíveis de prever com muita antecipação.

A seguir serão apresentadas algumas das páginas da internet que proporcionam dados de radiação solar para países da América Latina e do Caribe

**Internacional H-World** está administrada pelo Censolar. O Censolar é um centro para a formação técnica em energia solar. Facilita dados de irradiação solar sobre solo horizontal gratuitamente a sus alunos e mediante prévio pagamento a outros usuários.

- *Endereço eletrônico:* <http://www.censolar.es>
- *Procedência dos dados:* Dispõe de dados mensais de todo o mundo. A origem destes dados são 2000 localidades de distintos países e origem dentre os que figuram Barbados, Belize, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, Cuba, Dominica, Equador, El Salvador, Grande Caimán, Guatemala, Guiana, Haiti, Honduras, Martinica, México, Nicarágua, Panamá, Paraguai, Peru, República Dominicana, Suriname, Uruguai e Venezuela.
- *Comentário:* não há informação sobre a qualidade dos dados proporcionados.

**SoDa (SolarData)** é uma página resultado de um projeto europeu que inclui dados de radiação solar com amostras temporais desde semi-horários até mensais da Europa, África e Brasil. Atualmente o download de informação está restringido.

- *Endereço eletrônico:* <http://www.soda-is.com> (também disponível na página inicial <http://www.helioclim.org>)

- *Procedência dos dados:* Os dados, segundo sua categoria e nível, procedem tanto de estações radiométricas quanto de imagens de satélite.
- *Comentários:* Utiliza tanto dados de sensores terrestres –cuja qualidade de medição se desconhece–, como mapas de satélite. É capaz de gerar mapas de radiação.

**Meteonorm** é uma aplicação comercial orientada fundamentalmente à geração de “Anos Meteorológicos Tipo” (TME) em os formatos requeridos por os programas de simulação de sistemas solares térmicos mais normais (DOE, TRNSES, PVSEST,...).

- *Endereço eletrônico:* <http://www.meteonorm.com>
- *Procedência dos dados:* Dados climatológicos de 7.400 estações de medida.
- *Comentários:* Utiliza tanto dados de sensores terrestres –cuja qualidade de medição é desconhecida–, quanto mapas de satélite. As séries horárias que proporciona são séries sintéticas geradas a partir de uma base de dados mensal incluída no próprio pacote; esta base pode ser enriquecida com os dados correspondentes a locais que o usuário introduza.

**SOLEMI** é um serviço comercial operado pelo DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) que oferece diferentes níveis de informação, de estudos em uma área espacial extensa, a estudos para uma localização concreta. O Brasil é o único país da América Latina e do Caribe considerado.

- *Endereço eletrônico:* <http://www.solemi.de/home.html>
- *Procedência dos dados:* Estimção a partir de imagens do satélite Meteosat, com resolução espacial de 2.5km e uma resolução temporal de meia hora
- *Comentários:* O nível de informação fornecido pode incluir informações diversas como geomorfologia, redes elétricas, áreas protegidas, critérios de exclusão devidos a usos de solo, de acordo com o interessado.

**WRDC (World Radiation Data Centre)** é uma página que depende da Organização Meteorológica Mundial, através do Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring e o NREL (National Renewable Energy Laboratory). Fornece dados da Rede Radiométrica Mundial na que estão incluídas algumas estações de medida de radiação solar da Argentina, Chile, Colômbia e Venezuela.

- *Endereço eletrônico:* <http://wrdc-mgo.nrel.gov>
- *Procedência dos dados:* Rede Radiométrica Mundial
- *Comentários:* Gratuita por e-mail. Fornece dados de 1964 a 1993. A página não é atualizada desde 2002

**BSRN (Baseline Surface Radiation Network)** está formada por estações de medida de alta qualidade, dentre as que se encontra a da Plataforma Solar de Almería (PSA), Espanha, e alguma do Brasil. É administrada da Suíça pelo WRMC (World Radiation Monitoring Center).

- *Endereço eletrônico:* <http://bsrn.awi.de/em/home>
- *Procedência dos dados:* 42 estações de medida com cobertura mundial
- *Comentário:* prevê-se que em breve será possível consultar os dados on-line

**SSE-NASA. (Surface Meteorology and Solar Energy)** está administrada pela Web de Recursos em Energias Renováveis, patrocinada pela NASA através do programa Earth Science Enterprise Program.

- *Endereço eletrônico:* <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- *Procedência dos dados:* Estimções a partir de satélite. Cobertura mundial
- *Comentários:* Informação gratuita, solicita-se na própria página no formato desejado.

**EnergyPlus Weather Data** oferece dados climáticos para mais de 2100 lugares no mundo, dentre os que figuram Argentina, Bolívia, Brasil, Chile Colômbia, Equador, Peru, Paraguai, Uruguai e Venezuela.

- *Endereço eletrônico:*  
  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_about.cfm?CFID=763647&CFTOKEN=ac6780384023e2c0-A1BB644D-BF46-DBD3-D5A448C5BEA6CA20](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm?CFID=763647&CFTOKEN=ac6780384023e2c0-A1BB644D-BF46-DBD3-D5A448C5BEA6CA20)
- *Procedência dos dados:* Estimções feitas em diferentes organizações meteorológicas regionais e nacionais.

**Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)** oferece mapas de radiação direta horaria, anos meteorológicos tipo e outras variáveis interessantes para projetos de viabilidade de energias renováveis, com uma resolução de 40km em regiões da África, China, Índia e da América Latina e do Caribe (Brasil, Cuba, Nicarágua, El Salvador, Honduras e Guatemala).

- *Endereço eletrônico:* <http://em.openei.org/wiki/SWERA/Data>

## 3. Balanço energético em um coletor solar térmico

Neste capítulo se descreve, de forma geral, quais são os mecanismos pelos quais é possível aproveitar a energia solar por meio de um coletor solar térmico. Para tanto é necessário conhecer os mecanismos de transferência de energia térmica, bem como os parâmetros que caracterizam ou definem estes mecanismos. Concretando estes conceitos para um coletor solar térmico é possível encontrar quais serão os requerimentos para um funcionamento ideal.

### 3.1. Funcionamento térmico de um coletor solar térmico

O funcionamento térmico de qualquer coletor solar térmico está determinado pelo chamado **rendimento global**,  $\eta$ , definido como a relação entre a potência térmica que é capaz de proporcionar, ou potência térmica útil  $P_{\text{útil}}$ , e a potência procedente do Sol tomada como referência,  $P_{\text{solar}}$ , isso é,

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{solar}}} \quad (1)$$

A potência térmica procedente do Sol,  $P_{\text{solar}}$ , é o produto da área líquida do coletor que intercepta a radiação solar,  $A_c$ , e da irradiância solar tomada como referência,  $E_c$ ,  $P_{\text{solar}} = A_c E_c$

Em estado estacionário a **potência térmica útil**,  $P_{\text{útil}}$ , é o resultado do balanço entre a potência energética absorvida pelo receptor,  $P_{\text{absorbida}}$ , e a potência que este perde para o ambiente,  $P_{\text{perdida}}$ ,  $P_{\text{útil}} = P_{\text{absorbida}} - P_{\text{perdida}}$

Nem toda a potência solar,  $P_{\text{solar}}$ , pode ser absorvida pelo receptor. Existe uma série de perdas de energia devidas tanto à geometria e óptica do coletor, quanto às propriedades dos materiais do próprio receptor que devem ser consideradas (Ilustração 1). Chama-se rendimento óptico,  $\eta_{\text{opt}}$ , ao fator de correção da potência absorvida pelo receptor a partir da potência solar considerada. Isso é,

$$P_{\text{absorbida}} = \eta_{\text{opt}} P_{\text{solar}} \quad (2)$$

O receptor perde energia ao exterior já que, ao incidir a radiação solar sobre ele, é aquecido, isso é, aumenta sua temperatura com relação à temperatura ambiente. Assim, quanto maior for a diferença de temperaturas entre o absorvente,  $T_A$ , e o ambiente,  $T_{\infty}$ , maiores serão as perdas de energia. As perdas do receptor também devem ser proporcionais à área de intercâmbio desta energia, isso é, à área do absorvente,  $A_A$ . O fator de proporcionalidade deste conjunto de variáveis é denominado **coeficiente global de perdas** do receptor,  $U_L$ , e considera todos os intercâmbios de energia entre o absorvente e o ambiente. Desta forma, pode-se escrever que,

$$P_{perdida} = U_L A_A (T_A - T_\infty) \quad (3)$$

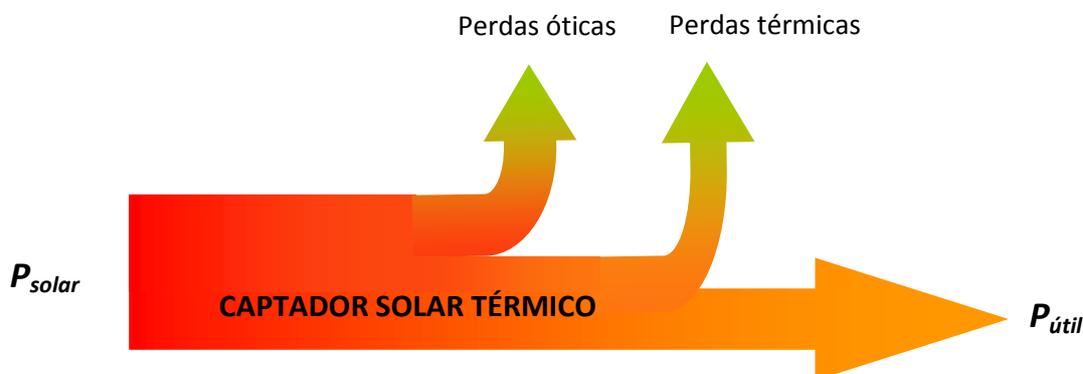


Ilustração 1: Balanço energético em um coletor solar térmico

A *razão de concentração*,  $C$ , é a relação entre a área líquida do coletor que intercepta a radiação solar,  $A_c$ , [Kreith&Kreider, 1978], e a área do receptor,  $A_A$ , (área de perdas de energia ao ambiente exterior).

### Importante

A potência térmica útil é determinada por

$$P_{útil} = \eta_{opt} A_c E_c - U_L A_A (T_A - T_\infty)$$

e o rendimento de um coletor solar térmico  $\eta = \frac{P_{útil}}{A_c E_c} = \eta_{opt} - \frac{U_L (T_A - T_\infty)}{C E_c}$

Todas as superfícies em que incide a radiação solar, seja para refletir-se –quando se trata de coletores com concentração por espelhos–, para transmitir-se –coberturas de vidro que protegem o absorvente do exterior– ou para aquecer um fluido –através de um absorvente solar–, impõem uma atenuação desta radiação solar. Assim, sabendo que o **rendimento óptico**,  $\eta_{opt}$ , é a porcentagem que determina essa atenuação, pode-se dizer que tem sua origem em que:

- ⚙ Em coletores de concentração, os espelhos não são refletores perfeitos, de modo que se deve considerar o valor de sua refletividade especular.
- ⚙ A cobertura de vidro não é perfeitamente transparente, deixando passar uma proporção da radiação incidente, determinada por sua transmissibilidade.
- ⚙ A superfície absorvente tem uma absortância da radiação solar determinada.
- ⚙ Nos coletores de concentração podem existir erros no posicionamento do receptor com relação ao foco, erros na própria forma concentradora dos espelhos, erros no

acompanhamento do Sol que se traduzem em raios refletidos que não interceptam o absorvente, etc. Todos estes possíveis erros englobam-se no chamado fator de interceptação.

Segundo o que foi dito anteriormente, com um coeficiente de perdas constante, quanto maior é o valor do rendimento óptico, maior será o rendimento do coletor. Assim, quanto maiores sejam os valores das variáveis que o definem, melhor será o rendimento dos coletores.



**O estado de limpeza do coletor afeta seu rendimento óptico e, portanto, seu rendimento global?**

Claro que sim.... A refletividade dos espelhos e a transmitância da cobertura são, em grande parte, determinadas pela *limpeza do coletor*. Isto é especialmente crítico em coletores de concentração, de modo que é importante, dentro das atividades de manutenção de uma planta de coletores de concentração, ter uma estratégia adequada de manutenção e limpeza.

## 3.2. Mecanismos de transporte de energia

A energia térmica se transporta de regiões com maior temperatura a regiões em que a temperatura é menor. Os mecanismos básicos de transferência desta energia são: *radiação*, *convecção* e *condução*. Entre estes dois últimos há uma estreita vinculação a escala microscópica. Na prática, a transferência de energia costuma ocorrer por vários destes mecanismos atuando em paralelo.

Nas seguintes seções explica-se brevemente os fundamentos destes três mecanismos, bem como alguns conceitos que permitam de forma rápida trabalhar com bibliografia especializada no tema (para uma descrição mais detalhada ver, por exemplo, [Costa Novella, 1986], [Siegel&Howell, 1972], [Rohsenow et al., 1985]).

### 3.2.1. Radiação

A radiação térmica de um corpo é a radiação eletromagnética emitida devido a sua temperatura e a expensas de sua energia interna. Esta radiação eletromagnética cobre uma gama de comprimentos de onda dentre 0.1 e 100 $\mu$ m.

Para estudar a radiação térmica a nível macroscópico se recorre ao conceito de corpo negro (*black-body*) e às leis que governam seu comportamento. Um corpo negro é um corpo ideal que absorve toda a radiação incidente, qualquer que seja seu comprimento de onda e seu ângulo de incidência, e que emite a máxima energia possível. As superfícies reais não se comportam como corpos ideais ou corpos negros, já que nem absorvem toda a radiação que recebem, nem emitem a máxima energia possível na proporção em que o recebem. Isso depende tanto do comprimento de onda como da

direção da radiação – seja absorvida ou emitida-. Por isso os corpos reais –ou melhor as superfícies desses corpos reais- estão caracterizados por fatores chamados *absortância*,  $\alpha$ , e *emitância*,  $\varepsilon$ , que consideram seu desvio com relação ao comportamento ideal. O fluxo de energia emitido por um corpo negro é proporcional a quarta potência de sua temperatura absoluta (*Lei de Stefan-Boltzman*).

### 3.2.2. Condução

É o mecanismo de transferência de energia produzido entre dois corpos que estão em contato físico. O fluxo de energia transmitido por condução por unidade de área atravessada é proporcional ao gradiente de temperaturas através de um fator chamado *condutividade térmica*. Dá-se em função da temperatura do meio em que se encontra (*Lei de Fourier*.)

### 3.2.3. Convecção

É o mecanismo de transmissão de energia que ocorre entre um sólido e um fluido em virtude dos movimentos macroscópicos do próprio fluido. Este movimento pode ser produzido por causas externas (por exemplo, por um agitador, um ventilador ou uma bomba), em cujo caso o processo se denomina *convecção forçada*, ou pode ser devido a um gradiente de densidade originado por um gradiente de temperaturas, e então o processo se denomina *convecção natural* ou livre.

A nível macroscópico a convecção é estudada a partir da lei de Newton de resfriamento, em que o fluxo de energia é considerado proporcional à diferença de temperaturas entre a superfície sólida e o fluido por meio de um coeficiente de transferência,  $h$ , sensível à geometria do sistema, às propriedades físicas e ao perfil de velocidades do fluido.

## 4. Sistemas solares térmicos: do coletor plano aos discos de concentração

Com energia solar é possível fornecer energia térmica a distintos níveis de temperatura. De fato, as principais características (necessidade de acompanhamento do sol e a relação de concentração) dos diferentes sistemas solares térmicos se determinam pelo nível de temperatura requerido (Ilustração 2)

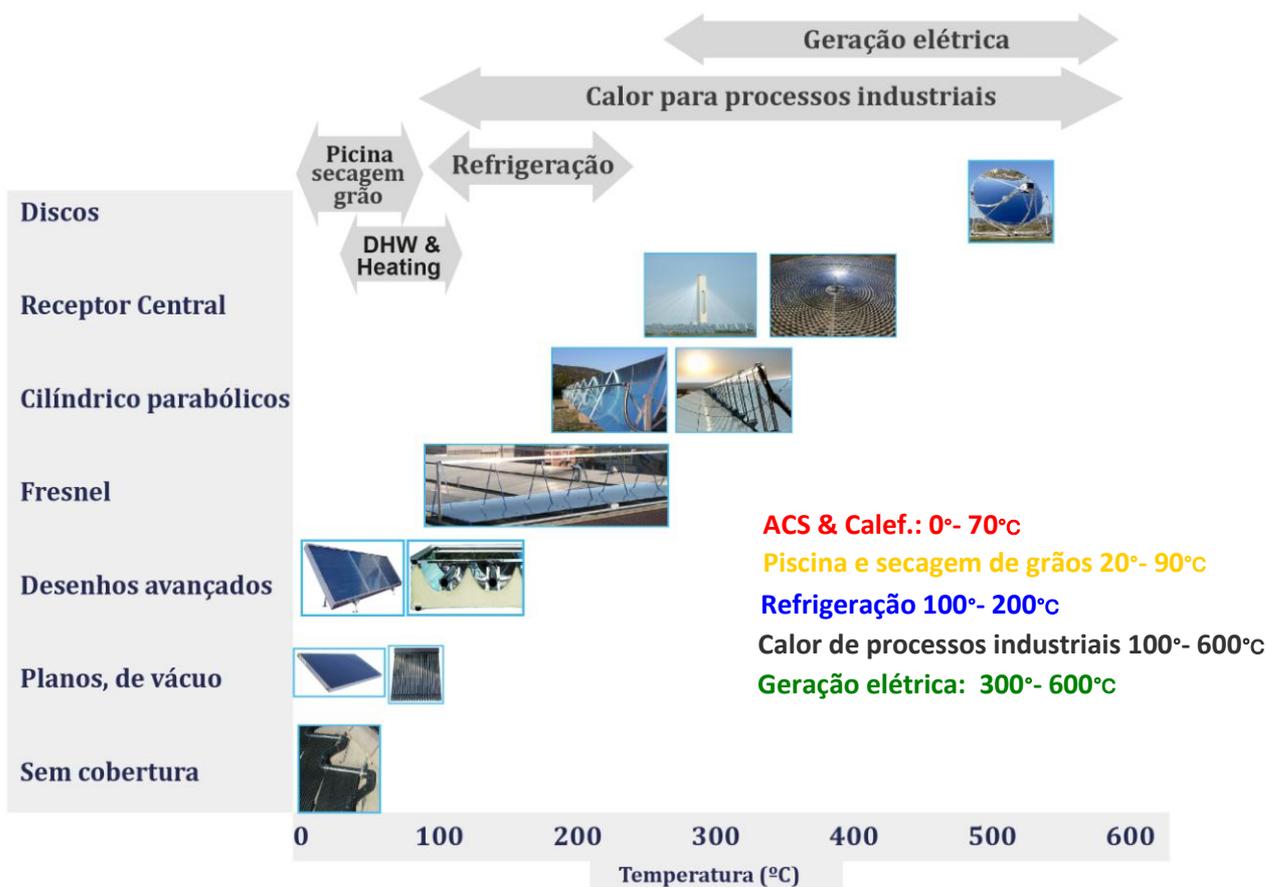


Ilustração 2: Temperaturas proporcionadas por diferentes sistemas solares térmicos

## 4.1 Coletores de baixa temperatura (menor que 125°C)

Para aplicações que requeiram um fluido a baixa temperatura (menor que 125°C) trabalha-se com **coletores sem acompanhamento e com uma pequena ou nenhuma concentração**. Existe uma ampla variedade de modelos, diferenciando-se principalmente pelo fluido de trabalho e pelo número e a eficácia de barreiras térmicas que incorporam para evitar perdas térmicas ao ambiente exterior –i.e., um coeficiente de perdas baixo- e poder, assim, alcançar um determinado nível de temperatura.

**Os coletores sem cobertura** costumam ser utilizado para **climatizar piscinas** elevando a temperatura da água e aumentando a temporada de banho. Estes coletores são uma grade de tubos fabricados em polímeros de alta qualidade que têm uma boa capacidade de absorção da radiação solar (cor preta) e elevada durabilidade, pelos quais circula o fluido a aquecer.

O sistema de funcionamento é bastante simples; uma vez que a água da piscina tenha passado pelo sistema de filtração, ao invés de voltar a ser enviada à piscina, é enviada aos coletores solares, em que é aquecida e volta a ser enviada à piscina.



Como é possível reduzir as perdas térmicas ao exterior destes coletores para piscina?

A melhor forma de reduzir as perdas ao exterior é isolando o coletor. Este isolamento deve ser transparente na zona sobre a que incide a radiação solar e pode ser opaco no resto. Teremos, assim, os **coletores planos com cobertura de vidro**.

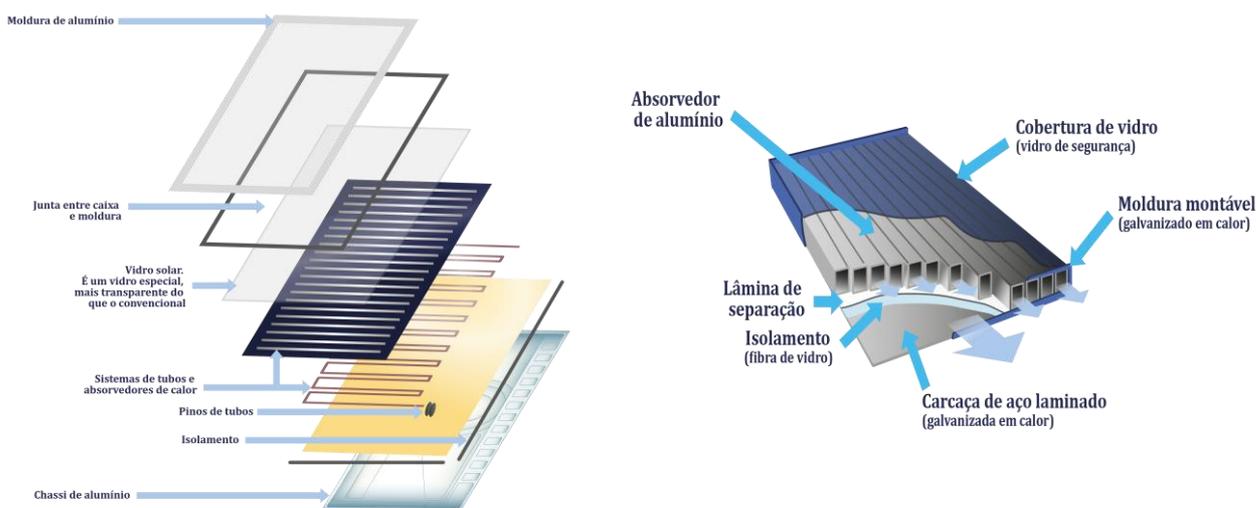
Os coletores planos têm uma grade de tubos ou semelhante, geralmente de cobre, pelas quais circula o fluido a aquecer. Esta grade está protegida do exterior por uma **caixa metálica**, de alumínio e/ou aço galvanizado, cujas dimensões normais oscilam entre 80 e 120 cm de largura, 150 e 200 cm de altura, e 5 e 10 cm de grossura, ainda que existam modelos maiores. A face exposta ao sol está **coberta** por um **vidro** (normalmente temperado e sempre com baixo conteúdo de ferro para melhorar a transmitância solar), enquanto as cinco caras restantes são opacas e estão **isoladas** termicamente do exterior com lã de rocha ou algo semelhante. Para aumentar a área de captação solar da grade de tubos ou conduções, há uma placa, normalmente de cobre ou alumínio, chamada **absorvente**, que sofreu algum tipo de tratamento para que, aumentando sua capacidade de absorber a radiação solar –i.e., ter uma absortância alta-, tenha pequenas perdas por radiação –i.e., uma emissividade baixa-. Este tipo de superfícies tratadas são denominadas **seletivas**.

O **fluido** que circula pelo interior dos canais pode ser

- Um líquido, que pode ser *água, glicol ou outro tipo de anti-congelante*, ou uma mescla de água e anti-congelante. A escolha de um ou outro depende das condições climáticas do local do coletor e da possibilidade de congelamento do fluido por baixas temperaturas ambientais (**Ilustração 3 (a)**).

- Um gás como o *ar*. A geometria dos canais pelos quais circula o ar está desenhada para evitar quedas de pressão importantes ao longo de seu percurso –minimizando, assim, o consumo em bombeamento de ar- e para que sua fabricação seja mais econômica. Assim, costumam ser canais de seção quadrada, ao invés de tubos como os utilizados para a água (Ilustração 3 (b)). Os **coletores de ar** costumam ser utilizados em aplicações em que se requer ar quente diretamente: sistemas de aquecimento por ar para grandes espaços, como naves industriais, e processos de secagem agrícola e industrial.

Ilustração 3: Esquemas gerais de coletores solar térmicos com cobertura



(a) circula um líquido (água e/ou glicol)

(b) circula ar

<http://www.calefaccionsolar.com/calefaccion-solar.html>

[http://www.torsolar.es/servicios/aire\\_solar/jumbosolar/](http://www.torsolar.es/servicios/aire_solar/jumbosolar/)

### Para saber +

A emissividade de uma superfície depende da temperatura em que se encontra, o que é determinado pelo comprimento de onda que caracteriza a radiação emitida (de acordo com a lei de deslocamento de Wien). Os absorventes de um coletor solar térmico trabalham sob temperaturas que poderiam estar na gama de 40°C e 700°C, o que implica que emitem principalmente no IR. O Sol, contudo, emite radiação principalmente no visível (sua temperatura está em torno de 5487°C). É, portanto, desejável que a superfície do absorvente seja capaz de absorber a máxima energia possível no visível (radiação emitida pelo Sol) e de emitir a mínima possível no IR térmico (radiação emitida pelo próprio absorvente). As **superfícies** com esta peculiaridade são denominadas **seletivas**.

Um passo a mais para reduzir as perdas térmicas no coletor e, assim, aumentar seu rendimento, é evacuar o ar que está contido entre a cobertura de vidro e o absorvente. Tem-se assim os chamados **tubos de vácuo**.

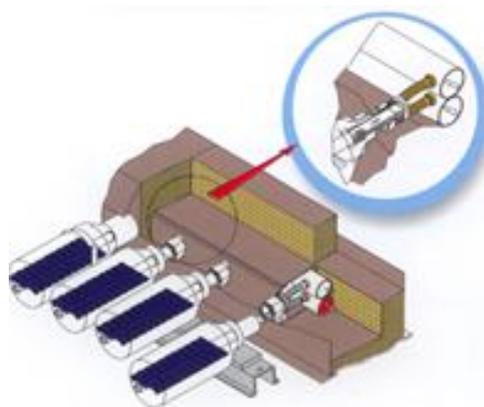
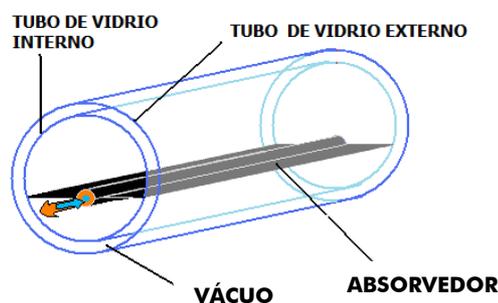
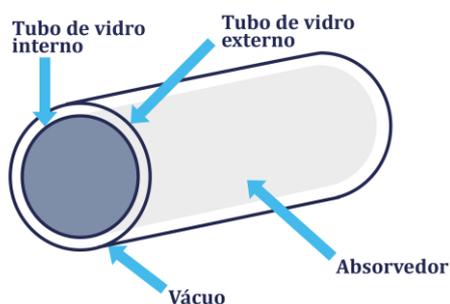
Nos coletores planos com cobertura de vidro a maior perda de energia é produzida por condução e convecção entre a superfície coletora ou absorvente (quente) e o cristal da cobertura de vidro (frio) através do ar existente entre eles. Em um coletor de tubos de vácuo isto não ocorre, já que através do vácuo quase total entre o absorvente e a cobertura não se produz esta prejudicial perda de energia, podendo reduzir o coeficiente global de perdas em até 45%.

O vácuo não apenas contribui para a redução de perdas, mas também para minimizar a influência das condições climáticas externas sobre o funcionamento do coletor. É por isto que este tipo de coletores é adequado em locais frios e/ou com diferenças elevadas entre a temperatura do coletor e a do ambiente.

Existem várias configurações de tubos de vácuo:

- **Absorvente depositado sobre superfície envidraçada.** Trata-se de dois tubos concêntricos de vidro entre os quais o ar é aspirado produzindo um vácuo. Na superfície exterior do vidro interior se deposita a cobertura absorvente que favorece a absorção da radiação solar (absorvente). No interior deste tubo de vidro se localiza um tubo pelo qual circula o fluido a aquecer, sem mudar de fase —*sistema de duplo tubo*- ou mudando de fase e evaporando-se —*sistema heat pipe* ou tubo de calor- (Ilustração 4(a)).
- **Absorvente depositado sobre superfície metálica.** Esta superfície se configura como uma aleta conectada ao circuito do fluido a aquecer. Normalmente nesta configuração se utilizam sistemas *heat-pipe*, mas também pode ser um sistema de duplo tubo (Ilustração 4(b)).

Ilustração 4: Esquemas de tubos de vácuo



(a) Superfície envidraçada e *heat-pipe*

(b) Superfície metálica e duplo tubo

**Para saber +**

O sistema de tubos de calor, *heat-pipe* em inglês, consiste em um tubo fechado por ambos extremos em cujo interior há um fluido que pode mudar de fase entre evaporação e condensação ao ser submetido a uma diferença de temperatura. Quando aplica-se calor em um de seus extremos -no nosso caso, devido à incidência da radiação solar- evapora-se o líquido desse extremo que se desloca para o outro lado, levemente mais frio, condensando-se e transferindo seu calor latente (de mudança de fase) a outro fluido que é o que utilizaremos, direta ou indiretamente, posteriormente. Este sistema de *heat-pipe* é considerado como um supercondutor térmico por seu funcionamento eficaz e não apenas é utilizado em sistemas de energia solar, mas também em sistemas que requeiram uma eficaz refrigeração, como sistemas eletrônicos e informáticos, por exemplo.



Refleta por um momento. Se os tubos de vácuo determinam o limite de redução das perdas térmicas, como a energia térmica útil do coletor poderia aumentar? Atente-se à equação da página 9 (capítulo 3) que proporciona esta energia térmica útil.

Efetivamente, deve-se aumentar a superfície de captação (o  $A_c$  da equação). Para tanto, necessita-se uma superfície refletora com a geometria adequada para que, sendo um sistema estacionário -i.e. não acompanhando de maneira ativa o sol-, reorienta a radiação ao absorvente. Os **coletores** que incorporam estes refletores concentradores estacionários se denominam **CPCs**, abreviatura de coletores *Cilíndrico Parabólicos Compostos*.

Os coletores CPS costumam ter tubos de vácuo com qualquer configuração anteriormente mencionada.

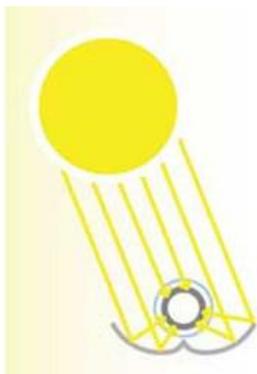


Ilustração 5: Esquema de funcionamento e vista ampliada de um coletor CPC

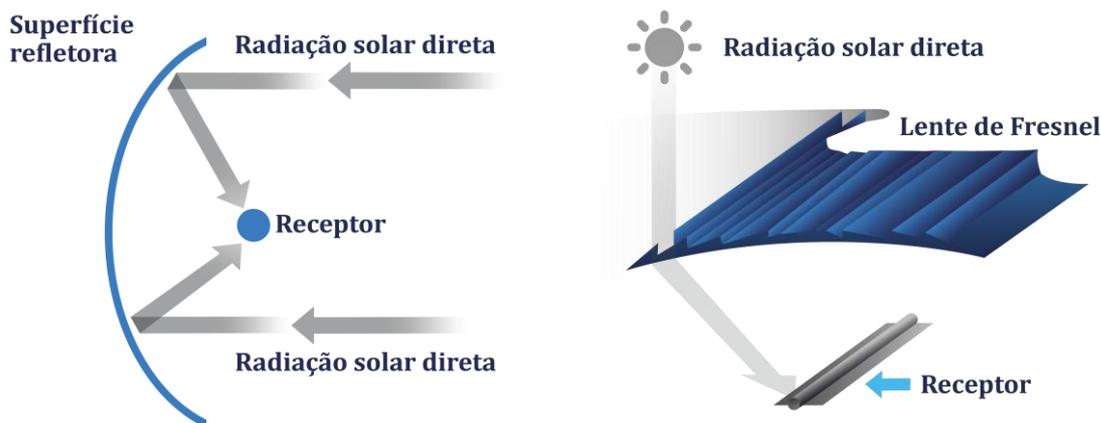
## 4.2. Coletores de média e alta temperatura

Devido à baixa densidade energética da radiação solar, para níveis de temperatura acima de 125°C, é necessário utilizar **coletores solares de concentração**. O grau de concentração deverá ser tão alto quanto maior seja a temperatura a conseguir, sendo possível alcançar temperaturas inclusive superiores a 2000°C.

A concentração da radiação solar pode ser realizada de diversas formas, sendo as mais comuns as duas seguintes:

- Utilização de uma superfície refletora (espelho) que concentra através da reflexão a radiação solar direta sobre um receptor ou absorvente (**Ilustração 6 (a)**),
- Utilização de lentes Fresnel ou lentes convexas que concentram através da refração (**Ilustração 6 (b)**).

**Ilustração 6: Métodos mais comuns para concentrar a radiação solar direta.**



**a) concentração através de reflexão**

**b) concentração através de refração**

Os coletores que utilizam **espelhos** para concentrar a radiação solar são os mais utilizados já que, e principalmente, permitem valores de concentração mais altos e seus preços são menores do que quando se utilizam lentes.

A *parábola* é a única forma geométrica possível de um refletor para concentrar um feixe colimado de radiação em um ponto. A focalização perfeita somente é possível se o feixe incidente é paralelo ao eixo de simetria da parábola. Um feixe colimado procedente de outras direções distintas a esta, não apenas não focaliza em um ponto, mas, devido às aberrações ópticas próprias de um espelho, que não é nunca perfeito, não converge em um ponto.



Qual componente da radiação solar tem uma direção clara e definida no tempo?

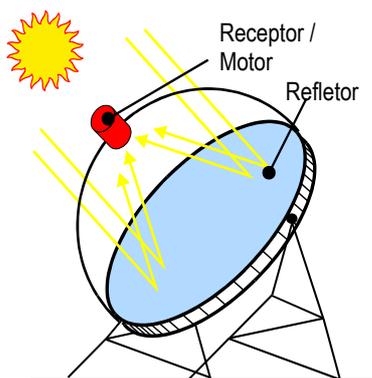
Efetivamente, a *radiação solar direta* tem uma trajetória bem definida e, portanto, é a única aproveitável em sistemas solares térmicos de concentração.

Devido a que os sistemas solares com concentração utilizam somente a radiação solar direta, e considerando que a trajetória desta radiação é definida pela posição do Sol com relação à Terra, os coletores de concentração devem possuir um sistema de movimento que permita **acompanhar o sol** ao longo do dia.

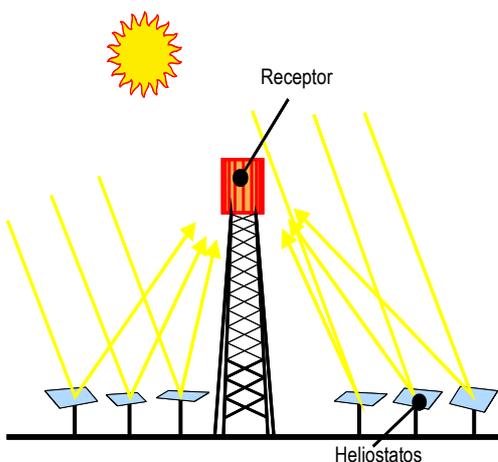
Atendendo à geometria do foco ou o lugar em que se transforma a radiação solar concentrada em energia térmica, os sistemas de concentração podem ser classificados como:

- De foco pontual: discos parabólicos, sistemas de receptor central.
- De foco linear: coletores cilíndrico-parabólicos, concentradores lineares Fresnel.

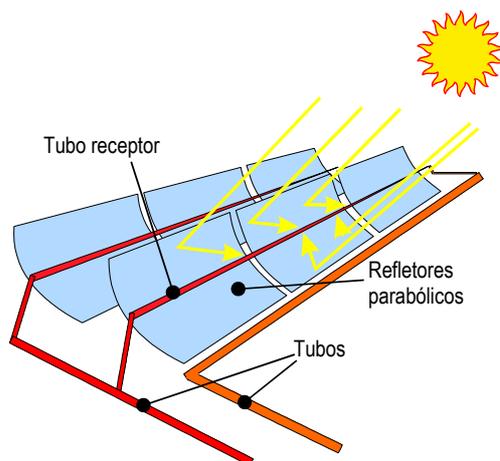
Os sistemas mais desenvolvidos comercialmente são os de coletores cilíndrico parabólicos, e os menos desenvolvidos são os concentradores lineares Fresnel, mas todos são interessantes.



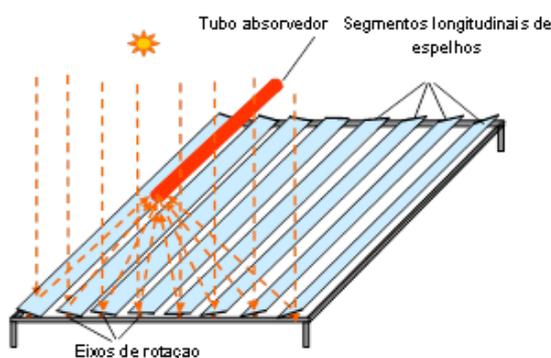
**Discos parabólicos.** Os coletores de disco parabólico consistem em um concentrador de superfície especular que enfoca os raios do sol e os reflete em um receptor instalado acima do disco em seu ponto focal. Cada disco pode ser uma unidade independente ou ser um módulo de um sistema múltiplo para produzir potência. O fluido em um disco parabólico pode alcançar temperaturas de até 1500°C e pode produzir até 50 kW de eletricidade ou 150 kW de potência térmica.



**Sistemas de receptor central.** Utilizam espelhos de grande superfície (40-125 m<sup>2</sup> por unidade) denominados helióstatos, que estão dotados de um sistema de controle para que cada espelho reflita a radiação solar direta sobre um receptor central situado na parte superior de uma torre (ver Fig. 7). Na zona focal se localiza um receptor que absorve a energia refletida pelo campo de helióstatos, dependendo da potência absorvida, do tamanho do receptor e do tamanho do campo de helióstatos. O sistema entrega calor ao fluido de transferência a temperaturas que ultrapassam 1000°C, o que posteriormente pode ser usado para alimentar energeticamente um processo industrial que requeira calor a esses níveis de temperatura, ou para produzir vapor em um permutador de calor para alimentar a uma turbina acoplada a um gerador elétrico.



**Coletores cilíndrico parabólicos.** Estes coletores reorientam a radiação solar graças a uma superfície espelhada, de seção transversal parabólica, até o receptor. Este receptor costuma ser um tubo cilíndrico por cujo interior circula o fluido a aquecer e pode chegar a ter uma superfície até 25 vezes menor que a área de captação da energia solar (área de abertura).



**Concentradores Lineares tipo Fresnel.** Em um concentrador linear Fresnel a radiação solar direta é refletida por longos espelhos retangulares que possuem uma curvatura muito pequena, e que refletem a radiação solar sobre um tubo receptor comum que está fixado e situado sobre os refletores. Cada refletor tem seu próprio eixo de giro e sistema de acompanhamento solar, de forma que giram independentemente uns dos outros. Na realidade, os Concentradores lineares tipo Fresnel podem ser considerados como um híbrido entre os coletores cilíndrico parabólicos e os sistemas receptores centrais, já que têm um receptor longitudinal semelhante ao dos coletores cilíndrico parabólicos, mas sobre o tubo receptor se concentra a radiação solar refletida por vários espelhos, de forma semelhante aos sistemas de receptor central.

**Para saber +**

Os **foros solares** constituem uma variante que toma elementos dos dois sistemas anteriores, a fim de conseguir uma concentração muito alta em uma superfície relativamente pequena. Neles, um campo de helióstatos planos reflete os raios solares paralelos e horizontais sobre um disco parabólico estático, que os reflete novamente concentrando-os em seu foco, em que está situada a área de ensaios. Estes sistemas podem alcançar concentrações de até 10.000 sóis, o que equivale a uma temperatura de 3500°C, sendo especialmente adequados para processos que requeiram temperaturas muito elevadas (superiores a os 1000°C) e também para aqueles em os que o aporte energético seja necessário em forma de choque térmico. O campo de aplicação dos foros solares compreende principalmente o tratamento de materiais, tanto em condições ambientais quanto em atmosferas controladas e a vácuo, e os processos químicos, através de receptores conectados a reatores químicos, sendo o leque de aplicações destes sistemas cada vez mais amplo.

## 5. Água quente sanitária e aquecimento solar

O aquecimento da água sanitária para uso doméstico é a aplicação tradicional da energia solar térmica. Isto se deve a duas razões principais:

- A gama de temperatura da energia térmica necessária combina perfeitamente com coletores solares, inclusive de baixo custo.
- A demanda de água quente sanitária (ACS) é bastante uniforme ao longo do ano.

### 5.1. Configurações possíveis

Existem muitas formas de classificar as diferentes tipologias e configurações dos sistemas solares térmicos para ACS (Ilustração 7). Uma primeira aproximação genérica é diferenciar sistemas diretos e indiretos.

#### 5.1.1. Sistemas Diretos

Os sistemas diretos, ou de circuito aberto (Ilustração 7 (a) e (b)), são aqueles em que a água de consumo é aquecida diretamente nos coletores solares. São sistemas com esquemas realmente simples, em que o campo de coletores está diretamente conectado a um tanque, que atua como armazenamento, existe uma bomba de circulação, um sistema auxiliar alternativo e o correspondente sistema de controle. Assim, na medida em que se consome a água quente, extraída da parte alta do tanque, a água fresca entra no tanque por sua parte baixa e se dirige ao campo de coletores.



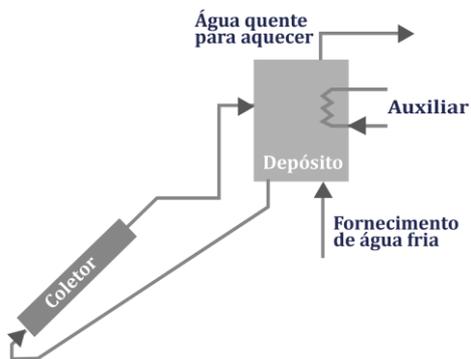
**Quais problemas ou limitações estão previstos para os sistemas solares diretos?**

Efetivamente, a principal limitação do uso destes sistemas é determinada pela climatologia do local e o risco associado de congelamento da água.

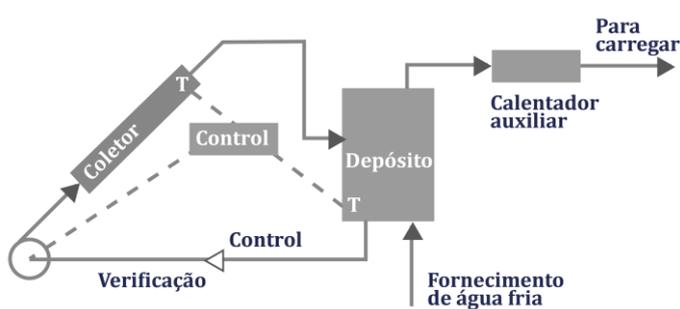
A maioria dos anti-congelantes de água (glicol, principalmente) são tóxicos para o consumo humano, de modo que não podem ser utilizados neste tipo de sistemas. As estratégias possíveis quando existe um risco de congelamento moderado são esvaziar o campo de coletores no tanque de

armazenamento (*drain-back*, na nomenclatura inglesa), ou manter circulando uma pequena quantidade de água no circuito de coletores.

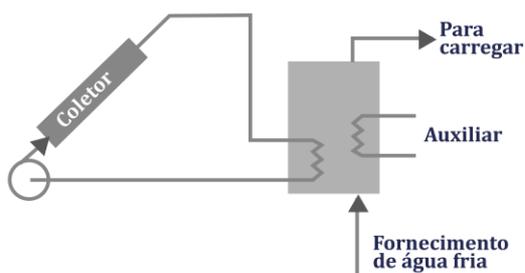
No momento de desenhar estes sistemas diretos deve-se ter cuidado e controlar que a pressão da água da rede possa ser aceita pelos coletores solares, e que a água não seja muito dura, para evitar excessos e incrustações calcárias.



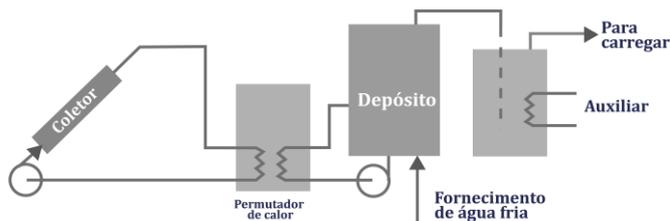
(a) sistema direto e termossifão



(b) sistema direto



(c) sistema indireto com permutador integrado ao tanque de armazenamento



(d) sistema indireto com permutador externo ao tanque de armazenamento

Ilustração 7: Esquemas gerais da configurações típicas de sistemas solares térmicos de baixa temperatura [Rabl, 1985]

### 5.1.2. Sistemas indiretos

Nos sistemas indiretos, ou de circuito fechado, (Ilustração 7(c) e 7(d)), **existe um permutador de calor** entre o fluído que circula pelo campo de coletores e o ACS. Este permutador aumenta o custo do sistema e induz uma leve penalização na eficiência do sistema, mas assegura uma eficaz proteção anti-congelamento. A configuração indireta é a mais usada.

Uma das chaves principais para assegurar o bom funcionamento de um sistema indireto é o adequado desenho do permutador de calor: quando o tamanho do permutador é subestimado, os coletores solares trabalham a temperaturas acima das normais, de modo que seus rendimentos são

relativamente baixos; quando se superestima o tamanho do permutador, tem-se um sobre custo associado que não compensa a melhora no rendimento dos coletores.

Nos sistemas solares de circuito fechado são utilizados muitos tipos de permutadores: externos (Ilustração 7(d)) de placas, em forma de espiral e internos (Ilustração 7(c)) ao tanque de armazenamento, etc. A vantagem dos permutadores integrados ao tanque de armazenamento é que se elimina a bomba do circuito de ACS. A dificuldade desta configuração, com permutador integrado ao tanque, radica em manter uma boa estratificação no tanque, isso é, em não ter uma zona de mescla de água quente e fria importante, e que as zonas de ACS quente e fria estejam claramente separadas entre si (ver capítulo 10).

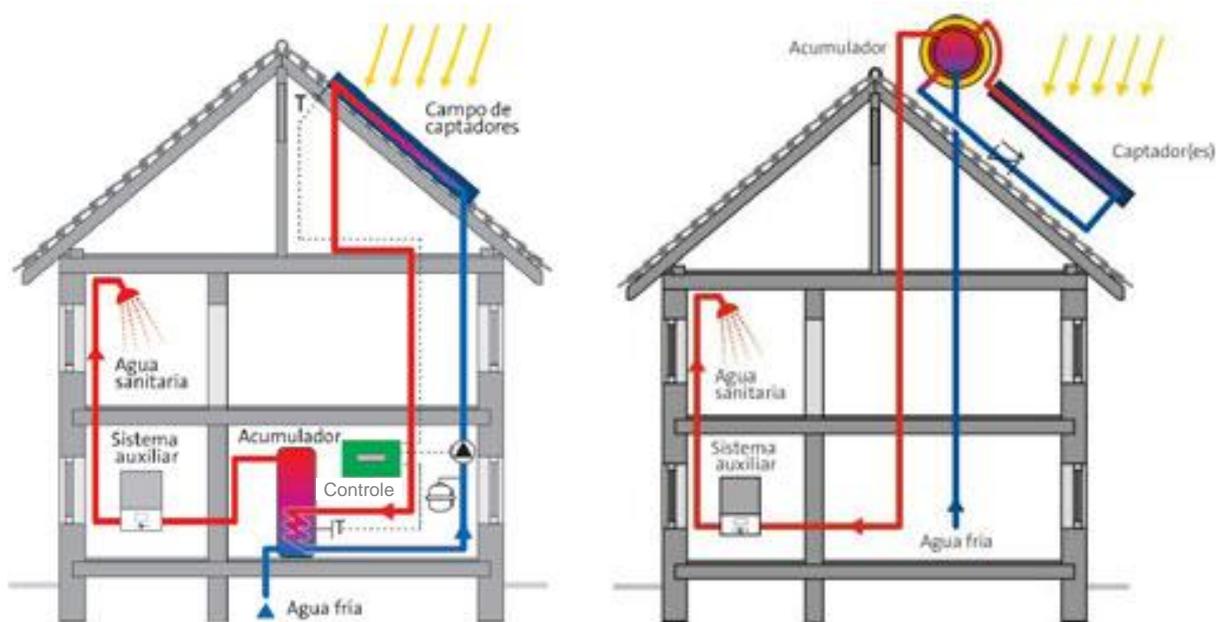


Ilustração 8: Esquema de funcionamento com (a) circulação forçada. e (b) natural, [Terra, 2013]

### 5.1.3. Sistemas termossifão ou circulação natural

Os sistemas termossifão não requerem o uso de bombas e sistemas de controle para o circuito de coletores solares (Ilustração 7(a)). O **movimento do fluido de transferência de calor** dentro do circuito de coletores **deve-se a menor densidade do fluido quente com relação ao frio**. Neste caso o tanque deve ser colocado em uma altura acima dos coletores para permitir a convecção por diferença de densidades. A força motriz será maior quanto maior seja a diferença de densidades, isso é, a diferença de temperaturas.

Considerando que estes sistemas funcionam sem bomba, são muito adequados para aqueles locais em que existam falhas ou total ausência de fornecimento elétrico. Os principais inconvenientes destes sistemas devem-se ao posicionamento do depósito no telhado acima dos coletores, o que implica ter um telhado com a suficiente resistência estrutural e pode ser considerado esteticamente inaceitável.

#### 5.1.4. Sistemas compactos

Especialmente populares são os **equipamentos domésticos compactos**, compostos geralmente por um depósito dentre 150 e 300 litros de capacidade e dois coletores de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> cada um. Estes equipamentos, disponíveis tanto com circuito aberto quanto fechado, podem fornecer 90% da necessidade de água quente anual para uma família de 4 pessoas, dependendo da radiação e do uso de água realizado.



(a) com coletores planos [Made in China, (A), 2013]      (b) com tubos de vácuo, [Made in China, (B), 2013]

Ilustração 9: Equipamentos compactos

## 5.2. Orientação e inclinação dos coletores

Os coletores devem estar localizado de modo que ao longo do período de utilização o equipamento solar aproveite dia a dia a radiação incidente o máximo possível. Assim, preferentemente se estarão **orientados ao Sul geográfico**, não ao Sul magnético (definido através de uma bússola). Para localizá-lo será observada, por exemplo, a direção da sombra projetada por uma haste vertical às doze horas ou meio dia solar. Na prática, desvios de 15% ao SE ou SW, com relação à orientação Sul preferente, não afetam o rendimento nem a energia térmica útil aportada pelo equipamento solar.

Além da orientação, o ângulo de **inclinação** formado pelos coletores com o plano horizontal é um fator importante na eficácia do equipamento solar. Os coletores deveriam inclinar-se, na medida do possível, de modo que os raios de Sol incidam perpendicularmente em sua superfície ao meio dia solar. O ângulo de inclinação exato dos coletores dependerá do uso do equipamento solar, mas sempre é próximo ( $\approx 10^\circ$ ) à latitude geográfica. Em uma cobertura inclinada costuma ser preferível utilizar a inclinação própria da cobertura, ainda que esta não seja a ideal, em benefício de uma maior integração estética com o edifício. A consequência direta será a necessidade de uma maior superfície de captação -maior número de coletores-, o que não tem porquê repercutir

negativamente no custo do sistema, considerando que instalar uma estrutura sobre um telhado inclinado para ter a inclinação ideal também tem uma repercussão econômica.

Em uma cobertura plana, sem sombras e sem limitações de tipo estético, normalmente poderá ser adotada a inclinação e orientação ideal, como em instalações em jardins ou similares. Outra possibilidade é a integração de painéis em pérgolas com o duplo objetivo de gerar energia e aproveitar um espaço sombreado.

### 5.3. Aquecimento solar

Os sistemas que combinam o aporte energético tanto para ACS, quanto para aquecimento, denominam-se **sistemas combinados ou combi** (*combi-systems*, em nomenclatura inglesa).

Estes sistemas combinados são basicamente os mesmos sistemas usados para ACS, mas se aumenta o tamanho do campo de coletores. Isto faz com que sistemas tipo termossifão não sejam muito apropriados, pois não permitem grandes áreas de captação.

Os sistemas combinados estão desenhados de maneira que na época de altos níveis de radiação possam aquecer completamente a água de uso sanitário, na primavera e no outono contribuem de forma importante à energia necessária para aquecimento e nas épocas de baixos níveis de radiação solar a principal responsável pelo aporte para aquecimento é uma fonte de energia auxiliar (combustíveis fósseis, biomassa, etc.).

Em comparação com os sistemas solares para ACS, os sistemas combinados são muito mais complexos por ser sistemas maiores e por interagir com mais subsistemas. Estas interações afetam profundamente o comportamento global de todo o sistema combinado. As maiores diferenças entre os esquemas gerais dos vários sistemas combinados radicam em como manejar a energia auxiliar e em sua relação com o tanque de armazenamento: se armazenar ou não esta energia auxiliar, o número de tanques de armazenamento, os algoritmos de controle, etc.

Para a melhor aplicação da energia solar no aquecimento o mais recomendável é dispor de um sistema de aquecimento através de **solo radiante**. O solo radiante é um sistema de aquecimento que utiliza um circuito hidráulico fechado cujos tubos circulam sob o solo, aquecendo o mesmo. Requerem temperaturas dentre 30 e 40°C, as quais costumam ser ‘facilmente’ atingidas com sistemas solares térmicos. O aquecimento radiante através do solo somente apresenta um inconveniente: que os tubos devem circular sob o solo. Desta forma, é necessário fazer a instalação durante a construção do edifício, ou durante uma reforma integral, pois do contrário a obra civil necessária faz com que a instalação não seja rentável.

#### Para saber +

Este sistema de aquecimento por solo radiante se baseia na mesma técnica já usada pelos romanos ou que ainda se utilizam nas “glórias” do planalto espanhol. Estes sistemas tradicionais consistem em canais situados sob o solo atravessados por uma massa de ar quente gerada através de uma espécie de forno desenvolvido para isso (“glória”).

Os emissores de baixa temperatura, diferentemente de um radiador convencional, dispõem de uma elevada superfície de intercâmbio, já que estão compostos por tubos de cobre com aletas de alumínio de alta superfície de intercâmbio unidas mecanicamente, que permitem transmitir o calor necessário através de convecção natural (**radiadores de baixa temperatura**) ou convecção forçada (**fan-coil**). Trabalham com temperaturas de alimentação baixas, abaixo de 50°C, o que os torna estuendos aliados de sistemas solares térmicos (além das caldeiras de condensação).



Refleta por um momento, quais são as outras vantagens dos emissores baixa temperatura?

As principais vantagens adicionais destes equipamentos são [Greenheiss, 2013]

-  Melhor sensação de conforto: já que a umidade relativa no inverno é mantida dentro de limites mais altos do que com um sistema de alta temperatura.
-  Melhora da eficiência energética: pela redução das perdas de calor na distribuição e nos geradores, que permitem um aumento do rendimento sazonal ou anual.
-  Maior longevidade de a instalação: as temperaturas mais baixas aumentam a vida dos materiais da instalação, especialmente dos plásticos.
-  Instalações mais seguras, já que trabalhar com temperaturas inferiores a 50°C reduz a temperatura superficial dos emissores, com o que o risco de queimaduras é eliminado.

Evidentemente, um sistema solar combinado pode ser acoplado a um sistema de radiadores convencionais de alta temperatura (acima de 65°C), mas sua capacidade de cobrir a demanda energética de aquecimento será muito menor.

## 6. Refrigeração e ar condicionado solar

Utilizar energia solar para sistemas de ar condicionado e refrigeração parece bastante lógico, considerando a simultaneidade do recurso, radiação solar e as necessidades de ar condicionado.

Existem basicamente duas tecnologias que permitem o aproveitamento da energia gerada em um sistema solar térmico para refrigeração e ar condicionado:

- **Sistemas térmicos de refrigeração** que resfriam a água de um **circuito fechado**, podendo, portanto, ser utilizado em qualquer equipamento de ar condicionado (**Ilustração 10**),

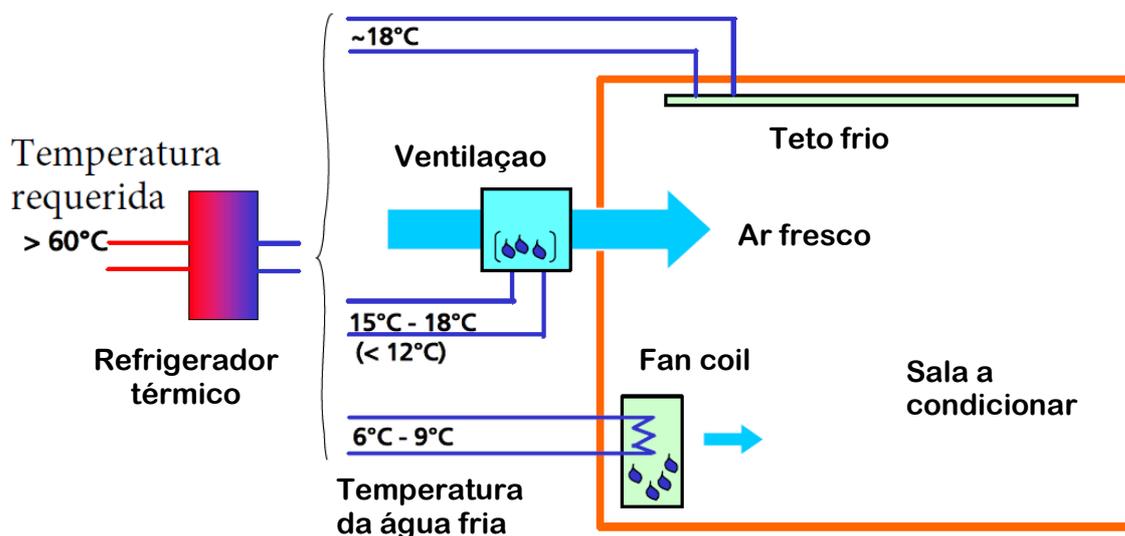


Ilustração 10: Esquema de um sistema de refrigeração de ciclo fechado com aporte de energia térmica [Henning&Wiemken, 2007]

- **Ciclos abertos** de refrigeração, ou sistemas refrigeradores por evaporação dessecante (*desiccant evaporative cooling systems, DEC*, em nomenclatura inglesa), que tratam diretamente o ar a condicionar (**Ilustração 11**).

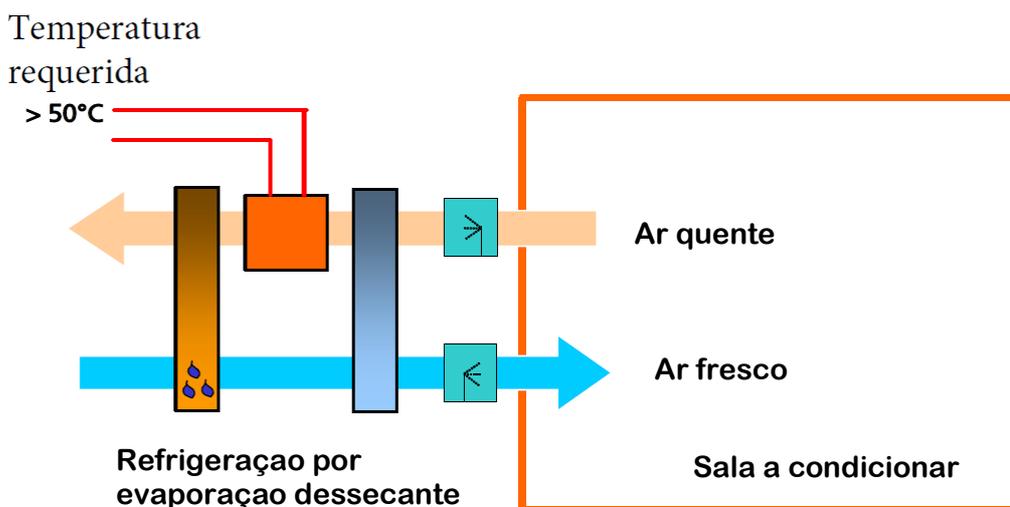


Ilustração 11: Esquema de um sistema de refrigeração de ciclo aberto com aporte de energia térmica [Henning&Wiemken, 2007]

## 6.1. Equipamentos térmicos de refrigeração em ciclo fechado

Os princípios básicos que regem os equipamentos de refrigeração térmicos são os seguintes [Rotartica, 2009]:

- Quando um líquido se evapora absorve calor e quando se condensa cede calor.
- A temperatura de vaporização de um líquido dá-se em função da pressão, de tal forma que quanto menor pressão, menor é a temperatura necessária para vaporizar um líquido.
- Existem pares de produtos químicos que são facilmente dissolúveis um no outro.

Dentre os pares de componentes químicos existe um, chamado refrigerante, que sofre os processos de evaporação/condensação, além de outro denominado absorvente.

Estes princípios também se aplicam aos sistemas de refrigeração convencionais com um ciclo mecânico de compressão de vapor. Nestes equipamentos, o refrigerante evaporado a baixa pressão provoca o resfriamento e logo é comprimido em um compressor mecânico a uma pressão maior, condensando-se a seguir (Ilustração 12 (b)).

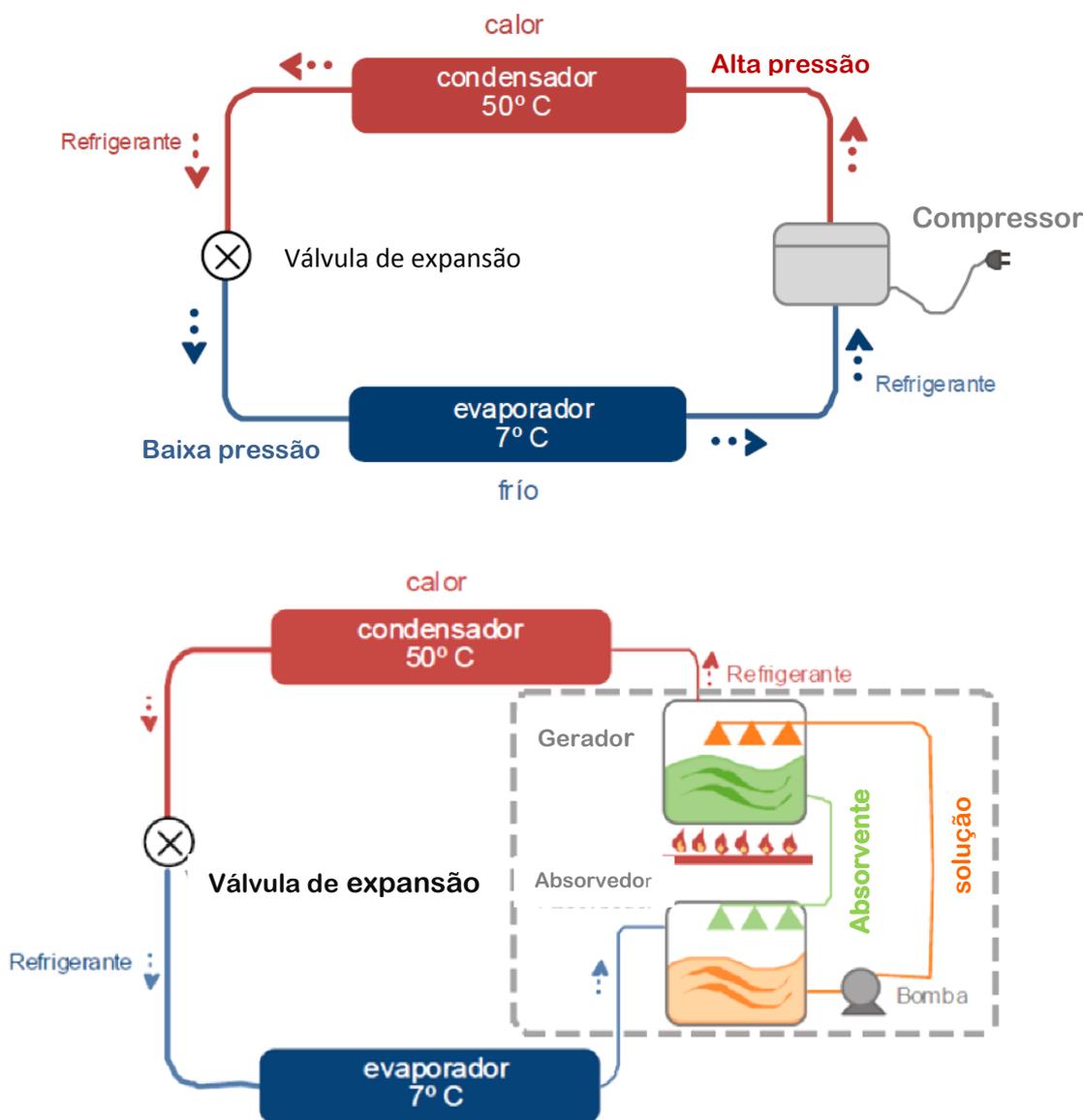


Ilustração 12: (a) Ciclo de compressão mecânica de vapor (b) Ciclo de absorção, [Rotartica, 2009]

Nas máquinas térmicas de refrigeração, utiliza-se o mesmo evaporador e condensador, mas o sorvente e o gerador térmico substituem a função do compressor, com uma bomba para proporcionar a mudança de pressão. No ciclo de sorção é possível utilizar qualquer fonte de energia térmica –combustão de combustíveis fósseis ou renováveis, calor residual-, sendo que no caso de um sistema solar térmico a água estará a uma temperatura entre 90°C e 120°C. Esta energia se aplica ao gerador, em que sob alta pressão o refrigerante se evapora e passa ao condensador para condensar-se e ceder calor. No seguinte passo, o refrigerante circula por uma válvula de expansão e passa a uma câmara de baixa pressão onde se evapora de novo sob baixa temperatura, para passar ao sorvedor, onde se dilui com o sorvente pobre em refrigerante que fez parte do princípio do ciclo.

Neste momento, a mescla de refrigerante-sorvente retorna ao gerador onde o ciclo é reiniciado. Na maioria dos sistemas, e para assegurar a redução conveniente da temperatura do sorvente, dissipando-se adequadamente o calor do condensador, é necessário instalar uma torre de refrigeração.

Fala-se de **Absorção** quando o sorvente é um líquido, e **Adsorção** quando é um sólido. A maioria das máquinas refrigerantes térmicas de sorção comerciais são de Absorção. Existe uma ampla gama de capacidades e características específicas, segundo as diferentes aplicações. As máquinas de absorção podem ser de **efeito simples** ou de **efeito duplo**, dependendo de se a energia térmica é fornecida uma ou duas vezes –em série- ao ciclo termodinâmico anteriormente descrito. Os ciclos de efeito simples requerem temperaturas da fonte térmica dentre 80°C e 100°C, de modo que estas máquinas estão geralmente acopladas a sistemas com coletores planos ou a vácuo. As máquinas de efeito duplo necessitam uma fonte térmica entre 140°C e 160°C, de modo que requerem sistemas solares de concentração.

## 6.2. Ciclos abertos de refrigeração solar

Enquanto os sistemas térmicos de refrigeração produzem água fria para refrigeração e ar condicionado, os ciclos abertos refrigeram e desumidificam diretamente o ar a condicionar. Qualquer sistema de ciclo aberto para refrigeração está baseado na combinação de um processo de resfriamento evaporativo e de um processo de desumidificação do ar graças à presença de um material higroscópico. Novamente este material pode ser líquido ou sólido. A maioria dos ciclos usados atualmente utilizam rodas dessecantes (*dessicant wheels*, em nomenclatura inglesa) segundo o processo que descrito a seguir [Henning & Wiemken, 2007]

- 1 - 2:** Desumidificação do ar por sorção, absorção quando o sorvente é um líquido; adsorção quando é um sólido, que é o mais comum. O calor gerado no processo de sorção é utilizado para aquecer o ar em sua passagem pela roda dessecante.
- 2 - 3:** Pré-resfriamento do ar graças ao intercambio de energia com uma contracorrente de ar procedente do espaço a condicionar.
- 3 - 4:** Resfriamento evaporativo por umidificação, no grau desejado, do ar a condicionar.
- 4 - 5:** Este aquecedor somente é utilizado quando o aquecimento no espaço a condicionar é necessário.
- 5 - 6:** Aquecimento leve do ar em sua passagem pelo ventilador que atua como bomba de impulsão ao recinto a condicionar.
- 6 - 7:** O ar se umidifica e aquece devido ao próprio uso do espaço a condicionar.
- 7 - 8:** O ar de retorno –linha azul- é resfriado por evaporação.
- 8 - 9:** O ar de retorno é pré-aquecido em um permutador ar-ar.
- 9 - 10:** Aporte de calor por meio de uma fonte de energia térmica, neste caso por um sistema solar térmico.
- 10 - 11:** A roda dessecante é recarregada com a água do ar quente.
- 11 - 12:** O ar seco e quente é expulso à atmosfera graças a um ventilador.

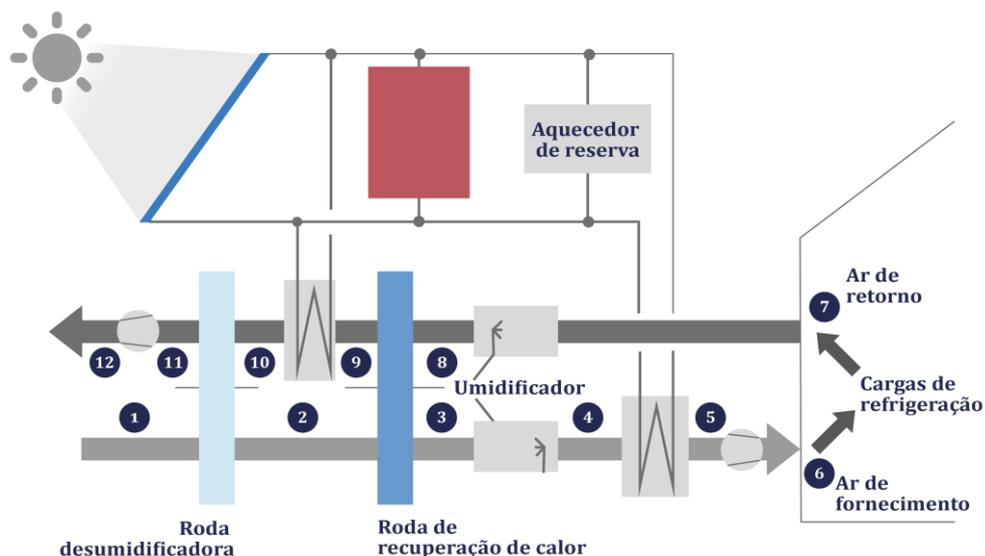


Ilustração 13: Ciclo padrão dessecativo usando uma roda dessecante

Este ciclo de condicionamento de ar não é aplicável a climas com níveis de umidade ambiental altos, porque a capacidade desumidificadora do ciclo é limitada.

### 6.3. Desenvolvimento nos países da América Latina e do Caribe

A pesar do altíssimo potencial, poucas são as iniciativas de desenvolvimento de sistemas de frio solar na América Latina e no Caribe.

*“...vemos a República Dominicana como uma excelente oportunidade de negocio por sua necessidade de soluções energéticas distribuídas e altamente eficientes. Assim, escolhemos a Total Energy Solutions e juntos esperamos crescer de uma forma sólida”* assim expressava Pedro Luís Rodríguez, em sua entrevista à revista Energias Renováveis em setembro de 2010 ([www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com), 2010) sua confiança no potencial mercado para as máquinas de absorção de Climatewell neste país Latino-americano. Nesse mesmo ano se estabeleceram filiais de Climatewell no Chile e na Colômbia.

Um convênio entre a Universidade Católica (UCA) e a Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional da União (UMA), ambas do Paraguai, a argentina Universidade Nacional de General Sarmiento, e com o apoio da Itaipu, permitiu lançar em 2011 um programa de formação de 40 horas denominado “Introdução à refrigeração solar por absorção”, cujo objetivo foi a fabricação de geladeiras alimentadas com painéis solares para refrigerar alimentos dos indígenas do Chaco (Paraguai). As máquinas refrigeradoras têm uma tecnologia muito simples em que se utilizam tubos de cobre para água, carvão ativado e metanol. As geladeiras podem preservar alimentos e fazer gelo para uso diverso. Parece que este programa de formação foi uma réplica de uma experiência argentina, desenvolvida no ano anterior com produtores de cabras, ensinando a fabricar este tipo de refrigeradores, com a perspectiva de encarar uma atividade micro empresarial para sua comercialização em uma segunda etapa.

## 7. Calor solar para processos industriais

De acordo com a estatística publicada pela Agência Internacional da Energia sobre dados de 2009, na América Latina o setor industrial possui o consumo energético mais importante, representando cerca de 34% do total, seguido muito de perto pelo setor de transporte (31%) e pelo residencial e terciário<sup>1</sup> (27%) [IEA, 2010]. As principais fontes de energia utilizadas na indústria foram biocombustíveis e resíduos (28% do total), gás e produtos petrolíferos (com 22% do total cada um), eletricidade (com 21%) e carvão e turba, com 6%.

O crescimento progressivo da demanda, bem como a dependência energética do exterior, justificam todos os esforços possíveis para fomentar a redução do gasto energético com combustíveis fósseis potencializando, principalmente, uma gestão energética mais eficiente e o uso de energias renováveis. A energia solar térmica pode e deve adquirir um papel relevante dentre as energias renováveis, já que permite a obtenção direta da energia térmica necessária para muitos processos industriais. Vários projetos financiados pela Comissão Europeia (projetos POSHIP, PROCESOL I e II) verificaram o enorme potencial de aplicação da energia solar térmica na indústria, bem como a viabilidade técnica e econômica de tais aplicações a curto (processos a baixa temperatura, i.e., a menos de 80°C), médio (processos a média temperatura, i.e., entre 80°C e 250°C) e longo prazo (processos a alta temperatura, i.e., a mais de 250°C).

### Para saber +

A **aposta internacional** pela difusão do uso da energia solar térmica na indústria, concretamente na indústria agrária, foi evidenciada pela primeira vez no ano 2000 com o desenvolvimento da Tarefa 29 sobre **Secagem Solar de Cultivos** sob a proteção da Agência Internacional da Energia [SHC, 2012a]. Posteriores tarefas continuaram este trabalho ampliando o quadro de atuação a todo tipo de processos. Assim se obteve a Tarefa 33/IV sobre **Calor Solar para Processos Industriais** (2003-2007, [SHC, 2012b]) ou a atual Tarefa 49/IV sobre **Integração de calor Solar em processos Industriais** (2012-2015, [SHC, 2012c])

A energia demandada em uma indústria pode ter diferentes formas, podendo ser agrupada em duas modalidades gerais:

- Energia elétrica: para motores, compressores, máquinas de frio e outros, e
- Energia térmica: processos metalúrgicos, aquecimento de fluidos e produção de vapor, principalmente. Esta energia térmica, tradicionalmente, costuma ser fornecida por caldeiras e, em alguns casos mais inovadores, pela recuperação de calor residual de outras fases do mesmo processo industrial.

<sup>1</sup>Inclui residencial, comercial e serviços públicos, agricultura, pesca e inspeção.

## 7.1. Chaves para a integração de plantas solares

Devido a os requerimentos próprios de qualquer indústria, o comum é que uma planta solar não forneça o total de suas necessidades energéticas, mas que, junto com uma fonte de energia convencional, faça parte do sistema geral de fornecimento energético da indústria. Normalmente, os atuais sistemas convencionais aportam energia térmica –seja em forma de vapor ou de água quente- sem considerar muito o nível final de temperatura requerido pelo processo. Assim, muitos sistemas proporcionam vapor a 150°C-180°C, quando o processo necessita temperaturas abaixo dos 100°C. Quando parte da energia térmica necessária para dito processo é fornecida por uma usina térmica, é imprescindível considerar os níveis de temperatura do processo e otimizar os fluxos de energia envolvidos. Isto é realmente crítico quando o processo ao que se acopla a usina térmica é um processo industrial. Tentar integrar uma usina térmica a um processo industrial que não tenha sido otimizado não tem, portanto, qualquer sentido.

### Importante

A **integração** de uma usina térmica em um processo é um grande desafio tanto para o engenheiro de processos quanto para o especialista solar, devendo-se considerar vários aspectos, dentre os quais se destacam

-  a **temperatura** e eficácia do processo,
-  o **meio** de transferência de calor, e
-  o **perfil de consumo**.

### 7.1.1. Nível de temperatura do processo

Assim como se distinguem os diferentes sistemas solares térmicos segundo o nível térmico proporcionado, os processos industriais podem ser classificados segundo o nível de temperatura requerido (baixa, média e alta temperatura), de forma que este nível de temperatura determina o sistema solar térmico apropriado.

Os **processos industriais abaixo de 250°C** (a *baixa e média temperatura*) são, atualmente, economicamente rentáveis e contam com vários exemplos reais de instalações solares térmicas integradas. Sob este limite de temperaturas, é possível distinguir quatro setores industriais adequados para a integração de calor solar. De acordo com a denominação da Tabela 1, trata-se de:

- Alimentação, bebidas e tabaco: produtos laticínios, conservas vegetais e frutais, preparados da carne, produtos de padarias, secagem de produtos, destilarias, etc.
- Têxtil e couro: tingimentos, curtido, lavanderias, etc.
- Indústria química: cosméticos, detergentes, fármacos, etc.
- Borracha e matérias plásticas

Estes setores compartilham processos em que se necessita baixa/média temperatura (Tabela 1) como a esterilização e pasteurização, secagem, hidrolisado, destilação e evaporação, limpeza e lavagem, etc.

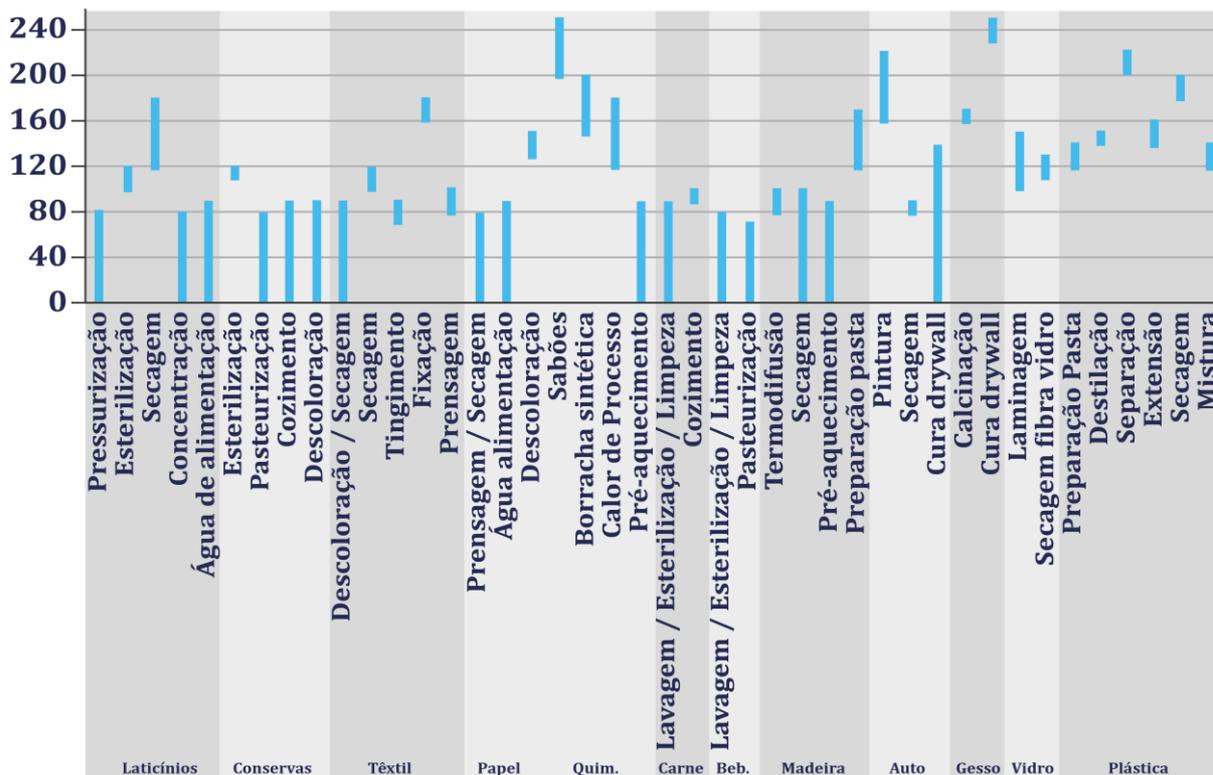


Tabela 1: Nível de temperatura requerido para diferentes processos industriais segundo setores, [Schweiger et al., 2000].



Observando a Tabela 1 responda a seguinte pergunta: todos os processos de secagem requerem a mesma gama de temperaturas de operação?

Na Tabela 1 é possível observar facilmente que não, que dependendo do setor industrial ao que se aplique o processo concreto são requeridos distintos níveis térmicos. Assim, por exemplo, os processos de secagem a indústria de laticínios requerem entre 120°C e 180°C, no âmbito têxtil, entre 100°C e 120°C, na secagem de madeira entre 30 e 100°C, etc. E cada um destes níveis térmicos é conseguido com diferentes sistemas solares.

Os **processos industriais a alta temperatura (acima de 400°C)**, como os de média e baixa temperatura, são processos suscetíveis de ser tratados através de calor de processo solar. Ainda que sua viabilidade técnica e econômica se encontrem em fase de pesquisa, foram desenvolvidos com sucesso numerosos projetos a escala pré-industrial (dezenas ou centenas de kW). Cabe destacar que a tecnologia solar térmica necessária para abordar estes processos a escala industrial já existe e está sendo comercializada em outras aplicações como a geração de eletricidade. No caso da geração de calor solar para processos industriais é necessário desenvolver dispositivos, protótipos e instalações específicas para cada tipo de processo, adequando os receptores às especificações e requerimentos do sistema de maneira que se possa demonstrar em cada caso sua viabilidade tecnológica.

Os principais setores industriais que por suas características e altos requerimentos energéticos, podem ser identificados como suscetíveis de ser tratados através de calor de processo solar de alta temperatura são aqueles que, de modo geral, implicam processos de síntese, obtenção e tratamento de materiais, resíduos ou produtos químicos a alta temperatura, tais como:

- Indústria metalúrgica
- Indústria química.
- Indústria de cerâmica.
- Produção de cimento, cal e gesso
- Fabricação de vidro.
- Tratamento de resíduos a alta temperatura

#### Para saber +

Um estudo financiado pela Oficina Federal Suíça de Energia (BFE) e realizado pelo Instituto Paul Scherrer e pelo ETH (Swiss Federal Institute of Technology de Zurich), ambos da Suíça, demonstrou a viabilidade técnica do processo de produção de cal de elevada pureza em um forno solar de alto fluxo (10kW). As estimativas econômicas de uma planta de calcinação de maior tamanho (25MWth), usando um sistema solar com receptor central, indicam que o custo da cal solar produzida oscilaria entre 128 e 157\$/t, [Meier, 2005], aproximadamente duas vezes o atual valor da cal convencional produzida com petróleo como fonte de energia.

### 7.1.2. Meio de transferência do fluxo de energia

Uma vez determinado o nível de temperatura requerido, deve-se considerar a possível sinergia entre os meios de transferência de calor no processo industrial e o utilizado no sistema solar. Assim, por exemplo, se o processo industrial requer ar quente para secagem, sinterizado, etc., o mais adequado na maioria dos casos é que o fluido aquecido no sistema solar seja também ar. Se, pelo contrário, trata-se de um processo de limpeza ou de cozimento de alimentos, o meio de transferência comum utilizado em ambos sistemas, o industrial e o solar, será líquido. O meio de transferência em um sistema solar determina, principalmente, o desenho do receptor. Assim quando se trabalha com gases/ar o receptor costuma ser algum tipo de matriz volumétrica, enquanto que quando se trabalha com líquidos, o receptor costuma ter uma configuração tubular. Sem embargo, por questões econômicas e de desenho, existem muitos casos em que os meios de transferência de calor no processo industrial e no sistema solar são totalmente distintos.

### 7.1.3. Perfil de consumo

Por último, no momento de otimizar a integração de um sistema solar, é necessário considerar a variação temporal ou o perfil de consumo do processo industrial e sua coincidência com níveis de radiação solar altos.

É importante ressaltar que os perfis de consumo de um processo industrial costumam ser muito diferentes dos perfis aplicados para cálculos de instalações solares térmicas em outro tipo de integrações, como as de consumo residencial ou ACS. Ainda que em muitos casos exista a opção de armazenamento térmico de energia, os processos industriais mais interessantes para acoplar um aporte solar são aqueles, por exemplo, com altos consumos energéticos térmicos no verão. Assim, a média e baixa temperatura são utilizadas nas conservas de vegetais, na fabricação e embalagens de sucos, etc.

## 7.2. Exemplos de instalações solares em países da ALC

### 7.2.1. Secagem de frutas e hortaliças em Nicarágua

“A secagem solar é uma técnica de preservação da comida praticado durante milhares de anos”. Assim começa a guia prática de secagem solar das frutas em **Totogalpa**, Nicarágua, editada pelo Grupo Fénix e pelas Mulheres Solares, de Nicarágua.

As mulheres são também as beneficiárias e gestoras do projeto de “Secador solar para a diversificação do processo produtivo da planta processadora de frutas e hortaliças no Trópico Seco de **Matagalpa**, Nicarágua”. Com este projeto foi construído, em 2011, um sistema de secagem com uma capacidade de cerca de 30m<sup>2</sup> de área de secagem. O sistema está composto por 20 coletores solares térmicos, com um área total de 40m<sup>2</sup>, e duas câmaras de desidratação com 60 bandejas de malha metálica de aço inoxidável, cada uma.



Ilustração 14: Esquema do processamento e secagem de frutas e hortaliças

O equipamento consegue uma redução de custos importante, diante do sistema convencional baseado no gás liquefeito. De fato, essa redução de custos permite um maior aproveitamento do recurso já que “antes perdíamos nossa colheita porque o produto amadurecia, agora podemos vende-la no mercado e armazena-la sem problemas”.

([www.energias-renovables.com/articulo/energia-solar-para-secar-frutas-y-hortalizas](http://www.energias-renovables.com/articulo/energia-solar-para-secar-frutas-y-hortalizas))

Em **Cinco Pinos**, 30 m<sup>2</sup> de área solar alimentam a 6 câmaras de secagem (25 kg com 10 bandejas de aço inoxidável, cada uma), 150kg de fruta fresca. Apesar de ser uma comunidade rural distante, também conta com secadoras para madeira e grãos básicos, pois conta com um centro de capacitação para jovens das comunidades próximas ([www.cona.at](http://www.cona.at), 2012).

**Para saber +**

Com o mesmo tipo de sistema solar de Cinco Pinos, existem instalações para secagem de fruta em El Salvador, Guatemala e Cuba. Também existem instalações na América Latina e no Caribe de secagem de café e madeira. ([www.cona.at](http://www.cona.at), 2012).

### 7.2.2. Secagem de café no Peru

O projeto leva o nome de *Intikallana* que, em quéchua, significa “*torrador solar*”.

O sistema utiliza um concentrador solar de foco pontual com um refletor Scheffler (em honra a seu inventor) que é um disco parabólico formado por pequenos espelhos planos (Ilustração 15).

O desenvolvimento e ajuste da instalação foi realizado cargo pelo Grupo de Apoio ao setor Rural (GRUPO PUCP) e instalou-se em Huero, distrito de Convención no departamento de Cuzco, Peru.



Ilustração 15: Ajuste de um dispositivo solar para secagem de café, no Peru (<http://www.energias-renovables.com>)

**Para saber +**

Muitos países utilizam o mesmo tipo de concentrador solar (Índia, Afeganistão, Egito, Quênia, Coréia do Norte, etc.) como fonte energética para cozinhas. Dentre os países onde se utiliza este sistema se encontram México, Brasil, Cuba e Bolívia ([http://solarcooking.wikia.com/wiki/Scheffler\\_Communitie\\_Kititem](http://solarcooking.wikia.com/wiki/Scheffler_Communitie_Kititem))

### 7.2.3. Indústria de mineração no Chile

Operativa desde novembro de 2012, a planta de propriedade da Mineração El Tesoro (do grupo Antofagasta Minerals) foi a primeira usina térmica de concentração a entrar em funcionamento de

toda América do Sul. Trata-se de uma planta com 1280 coletores cilíndrico parabólicos PT1 (Ilustração 16) da Abengoa Solar, capazes de produzir 14MWth utilizados, principalmente, para o aquecimento das soluções na planta de eletrodeposição. A planta incorpora armazenamento de energia térmica, o que permite fornecer energia térmica durante os períodos nublados e após o pôr do sol.

Esta planta solar permite substituir 55% do diesel utilizado tradicionalmente.



Ilustração 16: campo de coletores cilíndrico parabólicos da Mineração El Tesoro (<http://www.abengoasolar.com>)

## 8. Tecnologia de foco linear: coletores Cilíndrico parabólicos e Fresnel

Os sistemas de foco linear são aqueles que reorientam a radiação solar (direta), através de um sistema de concentração por espelhos, a um receptor linear situado na linha focal do sistema desta concentração. O fluido que circula pelo interior do receptor é aquecido transformando, assim, a radiação solar em energia térmica.

### 8.1. Componentes de coletores cilíndrico parabólicos

Os coletores cilíndrico parabólicos (CCP) são aqueles cujo sistema de concentração tem a seção transversal de uma parábola e um foco linear em que se localiza o receptor (Ilustração ).

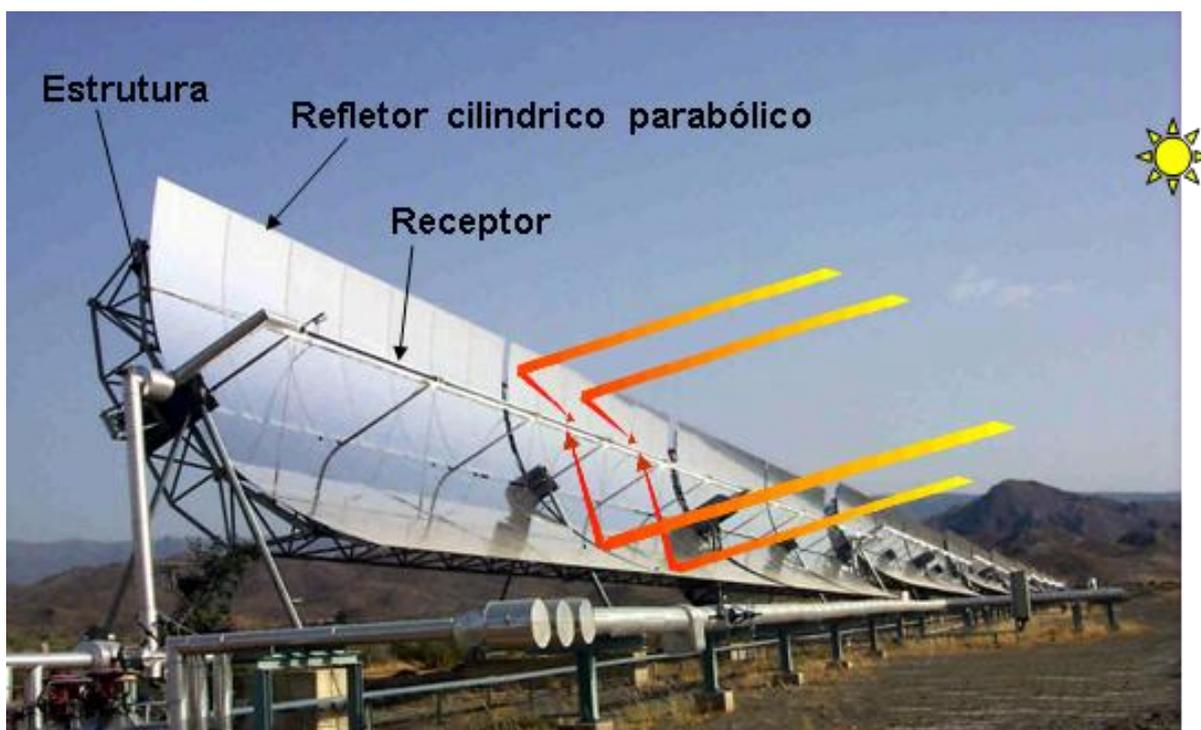
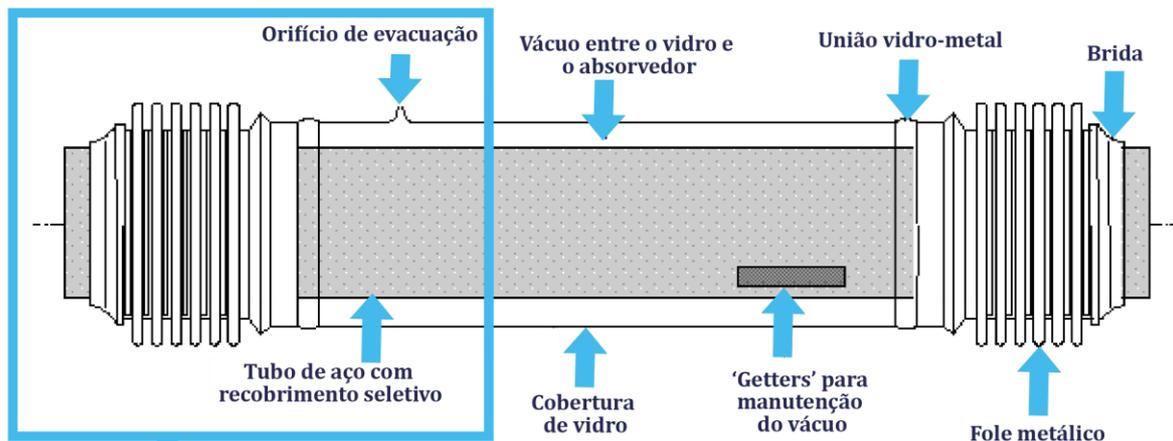


Ilustração 17: Princípio de funcionamento e componentes de um CCP.

O concentrador parabólico mais usado atualmente está formado por **espelhos de vidro** de 3,5mm de espessura, com uma fina capa refletora de prata em seu lado posterior, e curvados a alta temperatura para que a baixa temperatura possam ter a forma da parábola que se espera. O concentrador não está formado por uma única peça de vidro, mas por várias delas que, conjuntamente, formam a parábola refletora.

O **receptor** (Ilustração 18) é um dos elementos fundamentais de todo CCP, já que dele depende em grande medida o rendimento global do coletor. O tubo absorvedor de um CCP possui dois tubos: um interior metálico (de modo que circula o fluido aquecido) e outro exterior de cristal (cobertura).



**Ilustração 18: Esquema geral e foto parcial do receptor de um captador solar cilíndrico parabólico.**

O tubo metálico ou absorvedor tem um recobrimento seletivo com uma elevada absorvidade (>90%) em todo o espectro solar e uma baixa emissividade no espectro infravermelho (<30%), o que proporciona um elevado rendimento térmico. Há diferentes tipos de recobrimentos seletivos. Os mais acessíveis estão compostos por uma película de cromo, níquel ou cobalto negro, que possuem uma boa absorvidade e uma emissividade moderada. O único inconveniente é que não podem trabalhar a temperaturas superiores a 300°C, porque se degradam rapidamente e sua emissividade aumenta. Para temperaturas superiores (até 550°C) deve-se recorrer a recobrimentos seletivos obtidos por sputtering, PVD (Physical Vapour Deposition) ou sol-gel, que conseguem uma absorvidade de 95% e uma emissividade de 15% e, inclusive, menor que 300°C. O principal problema dos recobrimentos através de PVD ou sputtering é que a maioria se degrada em contato com o ar quando estão aquecidos, de modo que requerem um alto vácuo (10<sup>-8</sup> bar) na câmara localizada entre o tubo metálico interior e a cobertura de cristal.

### Para saber +

Para absorber as escassas moléculas das diferentes substâncias que, com o passar do tempo, podem ir penetrando no espaço anular existente entre o absorvente e a cobertura de vidro, colocam-se peças pequenas, com forma redonda ou plana, chamadas **getters**.

A **cobertura de vidro**, que envolve o tubo interior metálico, tem uma dupla missão: proteger o recobrimento seletivo das variações meteorológicas, e reduzir as perdas térmicas por convecção no tubo absorvedor. O tubo de cristal que conforma a cobertura de vidro costuma receber um tratamento anti-reflexivo em seus dois lados (interior e exterior), para aumentar sua transmissibilidade e o rendimento óptico do coletor.



Observe por um momento a **Ilustração 18**: para serve o fole metálico?

Efetivamente, as dilatações térmicas do tubo metálico e da cobertura de vidro são muito diferentes entre si, de modo que deve ser introduzido um fole metálico para absorver a maior dilatação do tubo metálico ou absorvente.

### Importante

O **tipo de fluido** que circula pelo receptor dos coletores ou fluido de trabalho depende da temperatura que se deseja alcançar.

Quando as temperaturas desejadas são moderadas ( $<175^{\circ}\text{C}$ ) a utilização de **água desmineralizada** como fluido de trabalho não representa grandes problemas, já que a pressão de trabalho não é excessiva. Porém, utiliza-se **óleo sintético** nas aplicações em que se desejam temperaturas mais altas ( $125^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$ ). A explicação deste fato estriba em que para temperaturas altas os tubos estariam submetidos a elevadas pressões quando se utiliza a água como fluido de trabalho, porque para evitar que se evapore a água é preciso mantê-la o tempo todo a uma pressão superior a de saturação correspondente à temperatura máxima alcançada nos coletores solares.

### Exemplo

Imaginemos que utilizamos água e por meio de coletores cilíndrico parabólicos a aquecemos até  $315^{\circ}\text{C}$ . Sabendo que a água sob pressão atmosférica evapora a  $100^{\circ}\text{C}$ , se não aumentarmos a pressão no circuito teremos vapor nos coletores a essa temperatura de  $315^{\circ}\text{C}$ . A pressão em que o circuito teria que trabalhar para seguir possuindo água líquida seria de cerca de 100 bar ( $\sim 100$  atmosferas). Esta condição de trabalho implica circuitos muito robustos e preparados para tais pressões. Sem embargo, quando utilizamos óleo no campo de coletores e logo um permutador de calor com água, somente será necessária uma pressão de menos de 20 bares no circuito de coletores. Trabalhar sob menores pressões possibilita usar materiais mais econômicos para os tubos e simplifica a instalação e suas medidas de segurança.

Para poder concentrar a radiação solar sobre o tubo absorvente, o coletor deve acompanhar o Sol durante o dia, necessitando um **sistema de acompanhamento solar** que vai mudando a posição do coletor, conforme muda a posição aparente do Sol no céu. Os coletores cilíndrico parabólicos podem ter acompanhamento em um ou dois eixos. Quando o acompanhamento é feito em um eixo, este pode estar orientado Norte-Sul ou Leste-Oeste. Contudo, em princípio qualquer orientação é possível.

O sistema de acompanhamento solar possui uma *unidade motriz* e um *controle local* que a governa. A unidade motriz é a que gira o coletor em torno do seu eixo quando e no sentido ordenado pelo controle local. A unidade motriz pode ser mecânica ou hidráulica. As unidades motrizes mecânicas são apropriadas para coletores de tamanho pequeno ou médio, enquanto os coletores de grande tamanho (~6m de largura de abertura) requerem unidades motrizes mais potentes e é necessário recorrer a unidades de tipo hidráulico.

Os coletores cilíndrico parabólicos necessitam uma **estrutura metálica** que confira rigidez ao conjunto de elementos que os compõem, ao mesmo tempo que atua como interfase com a cimentação do coletor.

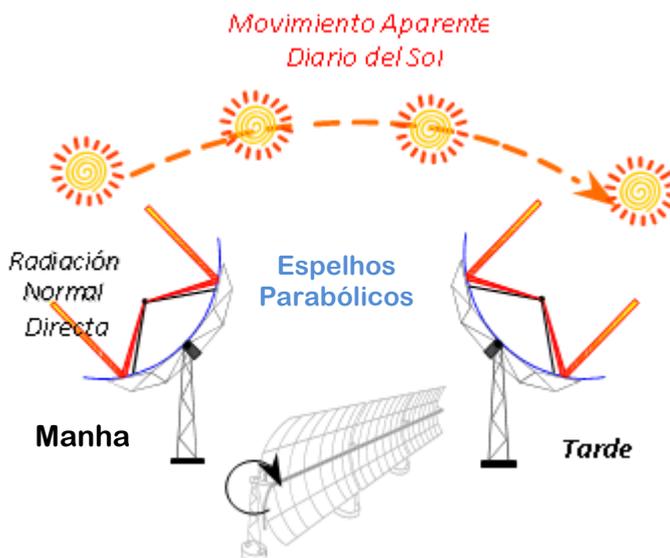


Ilustração 19: Rotação do coletor sobre seu eixo (eixo orientado N-S)

## 8.2. Concentradores lineares tipo Fresnel

Estes concentradores solares têm um certo carácter híbrido entre os coletores cilíndrico parabólicos e os sistemas de receptor central, e foram criados a fim de conseguir uma tecnologia que permitisse reduzir o custo da energia de origem solar térmica. Considerando que o grau de concentração que permitem obter estes sistemas é semelhante ao dos coletores cilíndrico parabólicos, suas temperaturas de trabalho também são similares. Não obstante, o rendimento dos concentradores lineares Fresnel é menor porque aproveitam uma menor fração da radiação solar direta. Este inconveniente é, ao menos na teoria, compensado pelo menor custo de investimento devido principalmente a:

- Espelhos e estruturas de suporte mais leves e econômicas.
- Melhor utilização do terreno (60%-70%), diante do 33% dos CCP e sistemas de torre.

Os concentradores lineares Fresnel foram concebidos pensando principalmente em utilizar a água como fluido de trabalho para a geração direta de vapor no tubo receptor.

### 8.3. Aplicações

A **produção de vapor** é a aplicação mais comum nestes tipos de coletores. O vapor pode ser utilizado para alimentar um **processo industrial** ou para alimentar uma turbina e **produzir eletricidade**. No primer caso, costuma-se trabalhar com vapor de água saturado a uma temperatura da gama de 200°C, enquanto a produção de eletricidade, sua aplicação mais comum, requer vapor de água superaquecido a cerca de 400°C e 100 barras de pressão.

Para produzir vapor de água através de um sistema solar existem duas *alternativas* básicas [Ajona, 1997]:

- *Procedimento indireto*, chamado assim porque, no campo de coletores, um fluido em fase líquida é aquecido e logo produz-se o vapor de água em um dispositivo adicional.
- *Produzir o vapor de água diretamente* nos coletores.

Até agora o primer procedimento, o indireto, foi o único aplicado comercialmente. As opções indiretas que temos são fundamentalmente duas:

**Evaporação súbita ou 'flash'**. A água circula através do campo de coletores, a uma pressão suficiente para evitar sua ebulição, produzindo-se o vapor por flash ao atravessar uma válvula de estrangulamento em um separador (Ilustração (a)). A qualidade do vapor produzida (massa de vapor produzida com relação ao fluxo mássico total) é normalmente inferior a 10%. A utilização de água como fluido de transferência de calor

- 👍 simplifica a construção do sistema de *flash*, já que é um sistema de circuito aberto
- 👍 a água é um esplêndido meio de transporte de energia.
- 👎 a válvula de *flash* produz uma grande queda de pressão com o conseguinte consumo eléctrico e aumento do preço da bomba
- 👎 a temperatura de trabalho dos coletores é muito superior a do vapor que se pretende obter, de modo que as perdas térmicas dos coletores são grandes

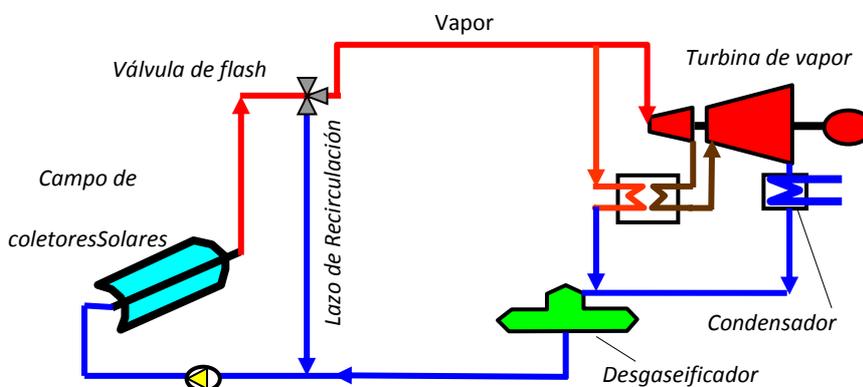


**Refleta por um momento: qual a influencia das maiores perdas térmicas no rendimento global dos coletores?**

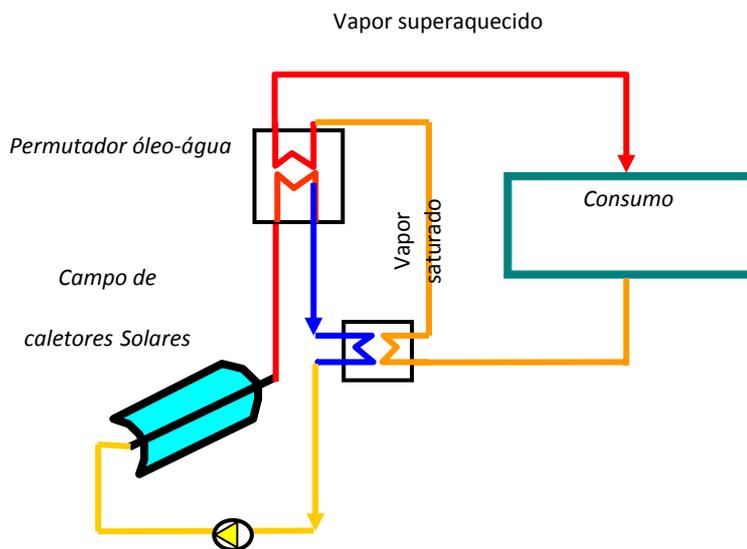
Efetivamente, as maiores perdas reduzem o rendimento global do coletor.

**Caldeira com permutador.** Ainda que se possa utilizar a água como fluido que circula pelo campo de coletores, normalmente se utilizam óleos térmicos naturais ou sintéticos de baixa pressão de vapor para evitar problemas de congelação e ebulição. Na Ilustração 20(b) se mostra um esquema típico deste tipo de sistemas. Quando a aplicação é a produção de eletricidade, uma boa eficiência do ciclo térmico de conversão exige que o vapor seja reaquecido em um permutador óleo/vapor. Este é o procedimento da maior parte das aplicações de produção de vapor, tanto para processos de aquecimento industrial, quanto de geração de eletricidade. Como principais expoentes da problemática associada à utilização de óleos como fluidos de transferência de calor, convém ressaltar que sua fuga pode produzir incêndios, são mais caros, com piores características de transferência energética e produzem maiores perdas de carga, especialmente a baixas temperaturas (devido a sua elevada viscosidade).

Ilustração 20: geração de vapor com coletores solares cilíndrico parabólicos



(a) por evaporação súbita ou 'flash'



(b) com uma caldeira com permutador.

## 8.4. Plantas de coletores de foco linear

Segundo o visto na epígrafe anterior, as plantas de coletores de foco linear –como qualquer usina térmica- necessitam uma série de subsistemas adicionais que conectem o campo de coletores à aplicação correspondente (em um processo industrial ou bloco de potência). Adicionalmente, se pode agregar um sistema de armazenamento (ver capítulo 10).

Um campo de coletores cilíndrico parabólicos ou Fresnel é uma associação tanto em série quanto em paralelo deste tipo de coletores (Ilustração 21).

O número de filas conectadas em paralelo depende da potência térmica nominal do campo solar, sendo maior quanto maior seja esta. Por sua parte, o número de coletores conectados em série dentro de cada fila depende do incremento de temperatura –ou salto de entalpia- que o fluido de trabalho deve experimentar no campo de coletores. Quanto maior seja este salto de temperatura, ou de entalpia, maior será o número de coletores conectados em série dentro de cada fila.

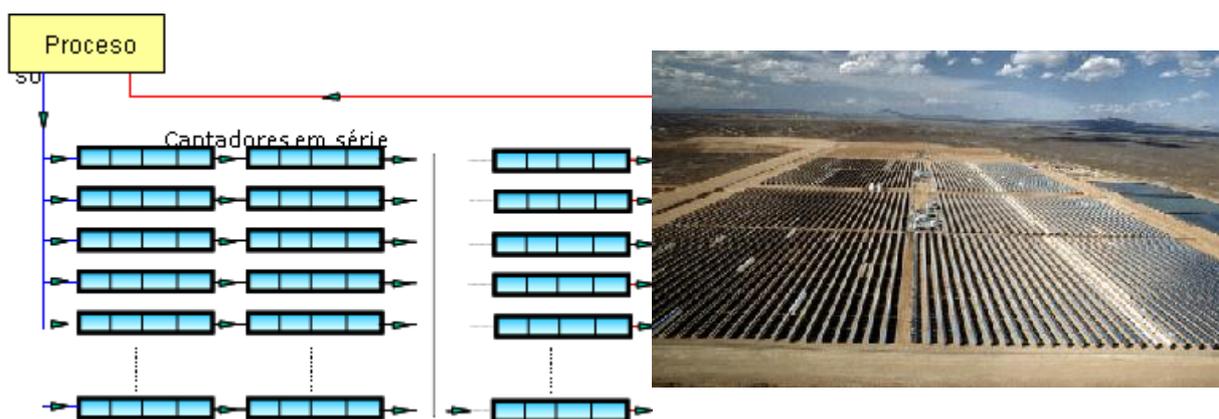


Ilustração 21: Esquema e foto aérea de um campo típico de coletores cilíndrico parabólicos

### 8.4.1. Anteprojeto do campo solar

Graças ao anteprojeto do campo solar é possível determinar o número de coletores necessários para uma aplicação concreta. É o primeiro passo necessário para o desenho do campo solar de uma planta, em que também deve-se incluir os seguintes estudos:

- a Modelização deste anteprojeto ou primeiro desenho de campo e a simulação de seu comportamento térmico ao longo de um ano. Isto permite otimizar o desenho prévio e determinar a produção anual,
- outros estudos relacionados com o local em que se montará a planta dentre os quais se encontram os estudos geológicos e topográficos do terreno, a

disponibilidade, ou não, de água (rios, lagos, mar), a proximidade de linhas elétricas e/ou de gás, etc.

Para a determinação do número de coletores necessários e a configuração destes no campo, isso é, para calcular quantos coletores são necessários por fila e quantas filas são necessárias, é preciso fixar as condições do **ponto de desenho do sistema**, que dependem:

- Das condições marcadas pelo *processo industrial* ao que se acople o campo solar.
  - Potência térmica demandada ao campo solar
  - Temperatura do fluido na entrada do campo solar.
  - Temperatura do fluido na saída do campo solar.
- As condições exigidas ao *campo solar* que incluem
  - Tipo de coletor e especificações técnicas.
  - Orientação do eixo do coletor ou das filas do campo
  - Fluido de trabalho e suas propriedades termo-físicas.
  - Fluxo mássico por fila de coletores.
- Curva de rendimento do coletor a ser utilizada
- Os valores climáticos na localidade e no momento (dia e hora) do desenho.



Quais variáveis climáticas devem ser conhecidas da localidade da potencial planta de captadores de foco linear?

Para conhecer a disponibilidade de energia solar e considerando que são sistemas de concentração, é preciso saber qual é a radiação direta estimada ou avaliada para o momento (dia e hora) de referência ou desenho. Do mesmo modo, para poder avaliar as perdas térmicas dos coletores e, portanto, seu rendimento, deve-se conhecer a temperatura ambiente estimada no momento do desenho. Normalmente, costuma-se utilizar como momento de desenho o meio dia solar no solstício de verão.

## 9. Tecnologia de foco pontual: centrais de Receptor central e Discos parabólicos

Em aplicações que requerem **altas temperaturas (superiores a 400°C)** é necessário aumentar o fluxo energético incidente sobre o receptor, bem como reduzir as perdas energéticas ao exterior, o que se consegue utilizando concentradores de foco pontual.

### 9.1. Sistemas de receptor central ou centrais de torre

Em um Sistema de Receptor Central, existem quatro componentes principais:

- O campo solar
- O receptor
- O sistema de aproveitamento da energia térmica
- O sistema de armazenamento (opcional)

Vejamos as principais características de cada um destes componentes, exceto do último, que será tratado no capítulo 10.

#### 9.1.1. O Campo Solar

Está composto por muitos dispositivos chamados **helióstatos** (Ilustração 22, (a)), e cada um está formado por uma superfície refletora suportada por uma **estrutura** e que coleta e reflete sobre um ponto a radiação solar direta que incide sobre ela. A radiação solar refletida por todos os helióstatos dirige-se a um ponto comum (de onde vem o nome de sistema: receptor central), e para que isto ocorra é necessário que os helióstatos estejam dotados de um **sistema de acompanhamento solar em dois eixos**, de modo que adotem a cada instante a posição adequada para que a radiação solar refletida dirija-se ao ponto desejado, que é o receptor.

As **superfícies refletoras** mais usuais em helióstatos estão compostas por espelhos retangulares de vidro grosso ( $\approx 2,5$  mm), que chegam a ocupar uma superfície total que pode variar entre  $70\text{m}^2$  e  $150\text{m}^2$ . Ademais, a olho nu parece que a superfície refletora de um helióstato é plana, mas na realidade possui uma certa curvatura que é maior quanto mais próxima esteja do receptor.

A posição da superfície refletora muda fisicamente de posição graças a um **mecanismo de acionamento** (Ilustração 22, (b)). Existem muitos tipos de mecanismos de acionamento, mas basicamente consistem em dois motores –para poder ter movimento em dois eixos– acionados de forma mecânica ou hidráulica.



Ilustração 22: (a) Vista de um heliostato típico (GM-100);(b) Mecanismo de acionamento (SENER)

Cada heliostato tem um **controle local** que está em comunicação com o controle central de todo o campo solar, de modo que o controle central dá as ordens de posicionamento oportunas aos controles locais dos diferentes heliostatos, para que adotem a posição correta. A posição correta é verificada graças a sensores de posição

Os heliostatos são colocados em torno da torre que sustenta o receptor, rodeando-a completamente (disposição circular) ou colocados somente na parte Norte da torre, no hemisfério Norte, e ao Sul, no hemisfério Sul.



Por que o campo de heliostatos, quando não é circular, está apenas de um lado (Norte ou Sul) da torre?

Segundo estejamos posicionados no hemisfério norte ou sul, o sentido do movimento diurno do Sol será visto pelos heliostatos (e por qualquer observador) de distinta maneira. No hemisfério norte os heliostatos ‘vêm’ o Sol em direção Sul, de modo que têm que estar situados ao Norte da torre para facilitar que encarem o Sol. No hemisfério Sul, os heliostatos vêm o Sol em direção Norte e, assim, devem estar situados no Sul para encarar facilmente o Sol.

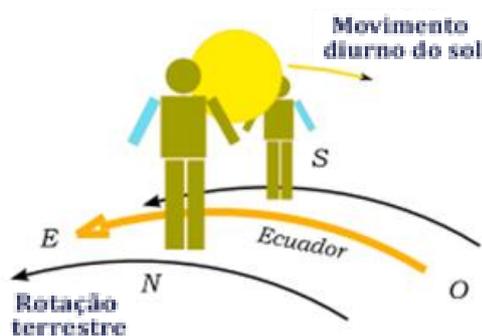


Ilustração 23: Movimento aparente do Sol dos dois hemisférios terrestres

### 9.1.2. O receptor

O Receptor é o lugar em que se concentra a radiação solar refletida por todos os heliostatos que compõem o campo solar, transformando-a em energia térmica para ser usada em processos

posteriores. Este processo geralmente resulta em altas temperaturas e altos níveis de fluxo incidente, de modo que deve ser realizado com as menores perdas possíveis, por radiação ou convecção, da energia absorvida previamente, com o menor consumo eléctrico, e evitando a perda ou degradação do fluido de transferência. Para evitar problemas de sombras e bloqueio dos raios refletidos pelos diversos helióstatos, o receptor se localiza sempre no alto de uma **torre**. Esta torre deve tão alta quanto o tamanho do campo solar.

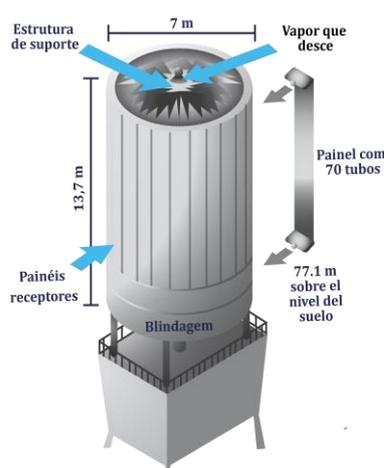
Os receptores podem ser classificados de acordo com a existência ou não de absorvedor, do tipo de absorvedor de que se trate, do fluido de trabalho e da configuração geral, existindo uma grande variedade de opções de desenho.

Os primeiros receptores testados foram de **água/vapor**, já que neles o fluido de trabalho era água que se convertia em vapor saturado ou superaquecido, conforme circulava pelos **tubos** que compunham o receptor. Outro tipo de receptores são os de **sais fundidos**. Seu aspecto é parecido ao dos receptores de água/vapor, com a diferença de que o fluido de trabalho é uma mescla de sais de sódio e potássio, com um ponto de fusão entre 225°C e 275 °C.

Os **receptores volumétricos de ar** estão constituídos por uma parede ou camada de material poroso através da qual circula uma corrente de ar aquecida ao atravessá-la. O material de que está fabricada a parede ou camada porosa do receptor costuma ser cerâmico ou de fios metálicos. Nos receptores volumétricos, a temperatura de saída do fluido de trabalho está na gama 600-1300°C, dependendo do desenho. O fluxo de radiação solar sobre o receptor é da ordem de 300–500 kW/m<sup>2</sup>. O ar quente que sai deste tipo de receptores pode ser utilizado para produzir vapor e gerar eletricidade com uma turbina de vapor, ou diretamente por qualquer processo industrial que requeira energia térmica nesta gama de temperaturas.

Por último, também existem receptores em que a radiação concentrada incide diretamente sobre um **jato de partículas** (normalmente areia) aquecendo direta e imediatamente estas partículas.

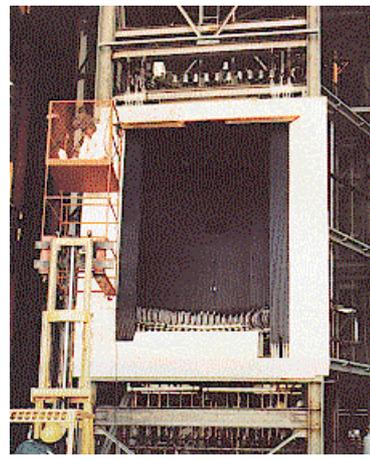
#### Ilustração 24: Receptores tubulares



(a) Esquema



(b) foto de um externo;



(c) foto de um de cavidade

### 9.1.3. O sistema de aproveitamento da energia térmica

É onde se injeta a energia térmica fornecida pelo receptor. Considerando que os sistemas de receptor central apresentam um maior interesse comercial quando trabalham a temperaturas acima de 500°C, a aplicação comercial mais interessante para eles é a geração de eletricidade. Neste caso, a energia térmica fornecida pelo receptor é utilizada para alimentar um ciclo de potência.

#### **Importante**

A temperatura do fluido de trabalho no receptor determina o tipo de ciclo termodinâmico a utilizar para gerar eletricidade com usinas térmicas. Assim, se a temperatura é de até 400°C, utiliza-se um ciclo Rankine, enquanto para maiores temperaturas é possível utilizar um ciclo Brayton.

## 9.2. Sistemas de discos parabólicos

Um disco parabólico (**Ilustração 25 (a)**) consiste em um concentrador esférico com curvatura parabólica que concentra e reflete a radiação solar direta sobre um foco pontual em que a radiação solar se converte em energia térmica. O comum é, portanto, que o concentrador disponha de um sistema de acompanhamento solar em dois eixos, ainda que existam desenhos em que se utilizava um sistema de acompanhamento em montagem polar.

A superfície côncava do **concentrador** está coberta por espelhos de vidro de segunda superfície com sua correspondente curvatura parabólica, por espelhos delgados ou por polímeros metalizados de primeira superfície suportados por uma estrutura de fibra de vidro ou de membrana tensionada

No foco do concentrador se localiza o receptor que, para este tipo de sistemas, costuma ser um **motor Stirling**. Em um motor Stirling (**Ilustração 25 (b)**), a compressão e expansão alternada de um gás (normalmente hélio, hidrogênio, nitrogênio ou simplesmente ar) ao retirar/aportar energia térmica provoca o deslocamento de pistões, e é esse deslocamento que produz a geração de energia elétrica. A energia térmica é a que aporta a radiação solar concentrada e o sumidouro de energia é o próprio ambiente. Normalmente, são utilizados dois métodos para a transferência da radiação solar ao gás de trabalho. No primeiro, ilumina-se diretamente um painel de tubos e por seu interior circula o gás que costuma ser hélio, hidrogênio ou ar. No segundo método, utiliza-se o conceito de tubo de calor ou heat pipe, vaporizando-se um metal líquido (normalmente sódio) que logo se condensa na superfície dos tubos pelos quais circula o gás de trabalho e reflui novamente ao absorvedor. Existem diferentes tipos de motor Stirling, dependendo do número de pistões a mover e de sua configuração.

Os sistemas disco/Stirling demonstraram a maior eficiência de conversão da radiação solar em energia elétrica com valores máximos de 30 % e até 25 % de média diária em unidades de 7 a 25 kW. Devido à curvatura parabólica do concentrador e à baixa relação distância focal/diâmetro ( $f/D = 0,6$ ), pode-se conseguir altas relações de concentração, acima de 3.000. Isto permite alcançar altas temperaturas de operação, entre 650 e 800°C, ensejando eficiências no motor Stirling de 30 a 40%.

Com a tecnologia atual, um sistema disco-Stirling de 5 kWe requer um disco de 5,5 m de diâmetro, e tem uma eficiência pico de 30%.

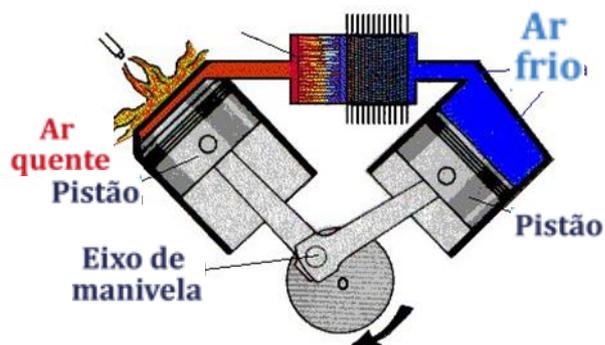


Ilustração 25: (a) foto de um disco parabólico e

(b) esquema de um motor Stirling

(<http://www.soegik.com/que-é-um-motor-stirling-e-como-construirlo/>)

Uma das principais vantagens destes sistemas é sua grande modularidade, já que a potência elétrica total da planta pode ser multiplicada instalando várias unidades de disco-Stirling.

**Para saber +**

O motor Stirling foi patenteado em 1816 pelo reverendo escocês Robert Stirling e sua primeira aplicação com energia solar foi realizada no ano 1872 por John Ericsson. O motor Stirling é, em teoria, o dispositivo mais eficiente para converter energia térmica em trabalho mecânico.

## 10. Armazenamento térmico

Ainda que existam muitas formas de armazenar energia (armazenamento eletroquímico –em baterias-, químico –com hidrogênio-, mecânico –em volantes de inércia, bombeando água-, etc.) o armazenamento térmico de energia é o que melhor encaixa acoplado a sistemas solares térmicos, porque as entradas e saídas principais do sistema estão em forma de energia térmica.

A utilização de sistemas de armazenamento térmico de energia em sistemas solares surge das características intrínsecas da radiação solar, que é intermitente e variável e, inclusive, a vezes imprevisível e de a dificuldade de fazer coincidir a disponibilidade energética com o requerimento de consumo

### Exemplo

Pense em dois exemplos em que se produz um desfase temporal entre a disponibilidade da radiação solar (recurso energético) e o consumo.

- 1 água quente sanitária em moradias: os chuveiros, por exemplo, costumam ser usados na primeira ou na última hora do dia, que é quando os níveis de radiação solar são mais baixos (o máximo de radiação sempre ocorre no meio dia solar)
- 2 produção de eletricidade: depende do país e da época do ano. Costuma haver um pico de consumo no princípio da noite quando, evidentemente, há pouca radiação disponível

### 10.1. Armazenamento em calor sensível

A energia térmica pode ser armazenada em forma de energia sensível, isso é, fazendo um material experimentar uma **mudança de temperatura**.

### Importante

A quantidade de energia armazenada é diretamente proporcional a essa mudança de temperatura e a uma propriedade específica do material que sofre tal mudança de temperatura, chamada capacidade calorífica.

#### 10.1.1. Materiais de armazenamento sensível

Os materiais que podem ser utilizados como meio de armazenamento térmico sensível podem ser um líquido, um sólido ou uma combinação de ambos (sistemas duais).

Os **materiais líquidos** mais adequados, citados em ordem ascendente de temperatura de armazenamento, são a água, óleos naturais ou sintéticos, sais fundidos, metais líquidos e lavas vítreas derretidas.

A água é um estupendo meio de armazenamento para baixas temperaturas (abaixo de 100°C), de modo que se costuma utilizar em sistemas para água quente sanitária e aquecimento.

Para temperaturas de até 300°C podem ser utilizados **óleos minerais ou sintéticos** sob pressão atmosférica. Têm uma grande vantagem, que é sua alta capacidade calorífica volumétrica, isso é, a quantidade de energia que podem armazenar por unidade de volume com um grau de salto de temperatura (Tabela 2). Sem embargo, tem duas desvantagens importantes: seu relativo alto custo e que podem ser inflamáveis em contato com ar.

Os **sais de nitrato** -sódico, potássico, ou uma combinação de ambos, são líquidos a partir dos 240°C, dependendo do sal, podendo trabalhar a temperaturas de quase 600°C sem degradar-se. Nesta gama de temperaturas estes sais fundidos são usados como meio de armazenamento. Trata-se de materiais relativamente econômicos ainda que, por ser sais, sejam bastante corrosivos, e considerando que se solidificam a temperaturas maiores do que a temperatura ambiente, toda o circuito e sistemas em que estão confinados devem possuir um sistema de energia auxiliar que se ative quando as temperaturas baixem o suficiente para que exista risco de solidificação dos sais.

Os **materiais sólidos** mais utilizados, citados em ordem ascendente de temperatura de trabalho do armazenamento, são o concreto, rochas, metais (ferro), areia e refratários (Tabela 2).

Por sua natureza sólida, estes meios armazenam/cedem energia graças a um fluido intermediário de transferência, que pode ser ou não o mesmo que circula pelo campo solar. De forma geral, pode-se dizer que são os materiais de armazenamento com menor custo específico e podem ser usados acoplados a sistemas tanto de baixa quanto de média-alta temperatura de trabalho.

**Tabela 2: Propriedades de materiais suscetíveis de ser usados como meios de armazenamento térmico**

Meio	Temperatura		Densidade	Condutividade	Calor
	Mínima	Máxima	Média	Térmica	Específico
	° C	° C	Kg / m <sup>3</sup>	Média	Médio
<b>Líquido</b>					
Água	0	100	988	0,64	4,17
Óleo mineral	0	300	770	0,12	2,6
Óleo sintético	20	400	900	0,11	2,3
Óleo - Silicone	80	400	900	0,10	2,1
Sais (nitritos)	250	500	1825	0,57	1,5
Sais (nitratos)	250	565	1870	0,52	1,6
<b>Sólido</b>					
Areia-rocha-óleo	-	300	1700	1	1,30
Concreto armado	-	400	2200	1,5	0,85
NaCl	200	500	2160	7	0,85
Ferro fundido	200	400	7200	37	0,56

Os **meios duais** mais usados incluem a combinação de água subterrânea com areia, pedregulhos e rochas porosas em aquíferos naturais e com pedregulhos em estanques (aquíferos artificiais). Temperaturas maiores aconselham utilizar combinações sais/rochas, em que a maior parte da massa térmica se localiza no material sólido, consideravelmente mais barato.

### 10.1.2. Configurações de armazenamento sensível

O armazenamento em apenas um **tanque** é a configuração mais simples de todas (Ilustração 26(a)). O tanque deve estar termicamente isolado do exterior para evitar que a energia acumulada se perda ao ambiente. Em apenas um tanque o meio de armazenamento, zona quente e zona fria, estão separados por uma zona de transição chamada termoclina.



Refleta por um momento, para o bom funcionamento do tanque de armazenamento é conveniente que a zona termoclina ocupe um grande espaço?

Efetivamente, quanto menor seja a zona ocupada pela termoclina, ou zona de transição entre meio frio e quente, melhor. Quanto menor seja a zona termoclina, menor mescla se produz com o meio frio, dispondo assim da energia térmica em suas melhores condições. Ademais, permite que a temperatura de entrada ao campo solar –seja do tipo que seja– seja a menor possível, de modo que o rendimento dos coletores será o maior possível.

Se um tanque tem uma termoclina pequena, diz-se que o tanque tem uma boa estratificação. Manter uma boa estratificação não é fácil e a maioria dos desenhos de tanques termoclina, além do meio de armazenamento que utilizam, diferenciam-se na forma de injetar o fluido –de armazenamento ou de transferência– no tanque para evitar romper a estratificação (Ilustração 26(b)).

Para altas temperaturas, em que se utilizam óleos e sais fundidos, costuma-se ter um preenchimento sólido.

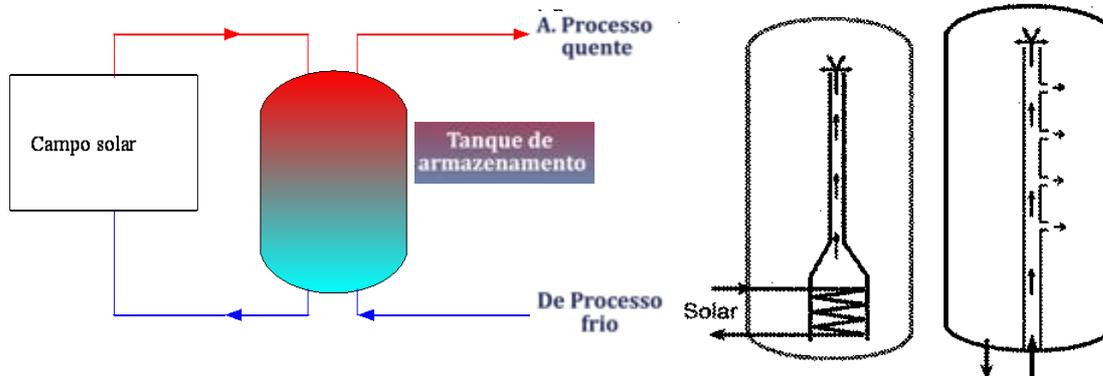
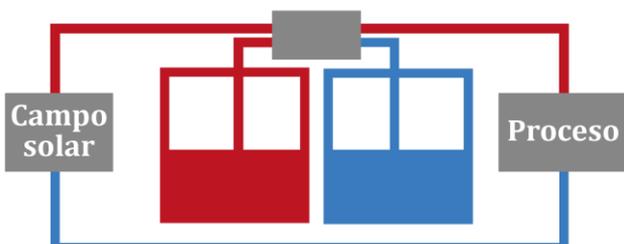
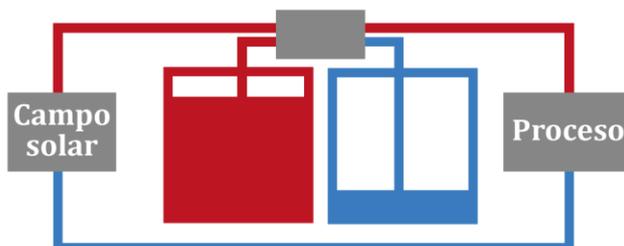


Ilustração 26: tanque termoclino: (a) esquema de acoplamento e (b) diferentes configurações de entradas de fluido em tanques de água [IEA-Task32, 2005]

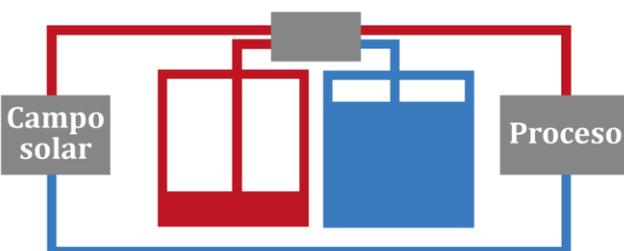
A forma de evitar problemas com a estratificação é separar o meio de armazenamento quente separado do frio. Tem-se, assim, um **sistema de duplo tanque**.



O campo solar proporciona suficiente energia para alimentar o processo ou a demanda determinada e carregar o armazenamento. O líquido no tanque que está frio passa através de um permutador aquecendo-se e vertendo-se ao tanque chamado quente. Assim, enquanto o tanque frio se esvazia, o tanque quente se enche



A figura mostra a situação em que o tanque quente está totalmente cheio, i.e., o sistema de armazenamento está totalmente carregado



Quando o campo solar não é capaz de fornecer energia (suficiente) ao processo em concreto, é o sistema de armazenamento que a fornece. Agora o fluido quente é levado ao permutador e resfriado. Conforme se esvazia o tanque aquece, ao mesmo tempo em que se enche o tanque frio.

Para plantas em que são necessárias capacidades de armazenamento muito grandes, pode-se utilizar vários sistemas de duplo tanque associados em paralelo entre si. Este é o caso da planta Solana, nos Estados Unidos [Abengoa, 2013]

## 10.2. Armazenamento em calor latente

Quando se armazena energia **trocando de fase** um material, diz-se que se armazena energia em forma de calor latente.

A transição de fase pode ser entre sólido e líquido (fusão/solidificação), entre líquido e vapor (vaporização/condensação), entre sólido e vapor (sublimação) ou de sólido a sólido (ao mudar sua fase cristalina). Devido as grandes mudanças no volume sofridas quando uma das fases com as que trabalhar é vapor, as transições sólido-vapor e líquido-vapor não costumam ser consideradas pela complexidade que conferem ao desenho do sistema de armazenamento.

### Importante

A quantidade de energia armazenada é diretamente proporcional à energia da mudança de fase

Diferentemente do que ocorre com o armazenamento em sensível, o processo de armazenar energia latente é produzido a temperatura quase constante.

### 10.2.1. Materiais para armazenamento em latente

Os materiais utilizados para armazenar energia mudando seu estado se denominam materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials, PCM*, em nomenclatura inglesa).

Existe uma grande variedade de materiais de mudança de fase a utilizar (**Ilustração 27**) dependendo, principalmente, da temperatura de trabalho.

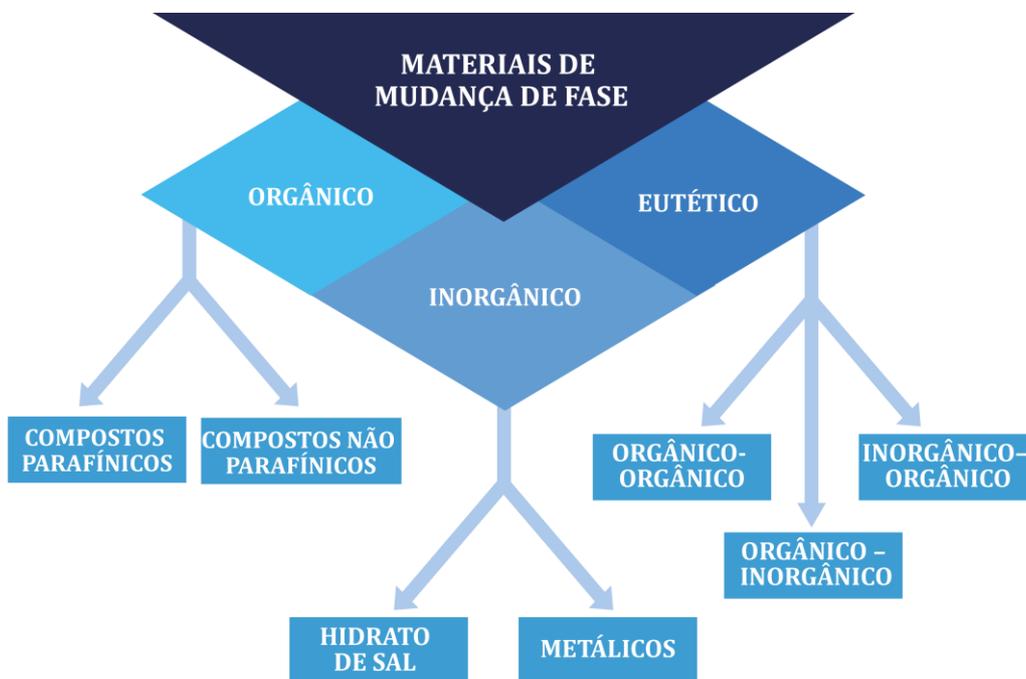


Ilustração 27: Classificação de PCMs [Sharma, 2009]

### 10.2.2. Configurações de armazenamento sensível

Salvo os materiais metálicos, os PCMs utilizados em sistemas de armazenamento latente têm condutividades térmicas baixas e mudanças de volume importantes ao fundir-se. Isto faz com que o desenho do módulo de armazenamento latente seja complexo, permitindo uma boa transferência de calor devido ao próprio desenho e apesar da baixa condutividade térmica do PCM. A seguir, citam-se algumas técnicas utilizadas para melhorar a transferência de energia em materiais com baixa condutividade térmica que mudam de fase:

Empacotamento do PCM em uma matriz com alta condutividade térmica, podendo ser uma espuma metálica ou conformando um compósito ou material composto



Encapsulamento do PCM em pequenos volumes, aumentando assim a área de intercâmbio de energia com o fluido de transferência (<http://www.pcmproducts.net/>)



Utilizando superfícies longas que distribuam o calor facilmente



**Ilustração 28:** Alguns dos mecanismos até agora propostos para obter boas taxas de transferência de energia, trabalhando com materiais com baixa condutividade térmica

### 10.3. Armazenamento termoquímico.

O armazenamento termoquímico está baseado na energia absorvida e cedida quando se rompem e formam ligações moleculares em uma reação química completamente reversível. Neste caso, a energia armazenada depende da quantidade de material e da energia associada à reação química.

A reação química pode ser a decomposição de um composto em seus elementos constituintes. Assim, a média-alta temperatura ocorre a decomposição de carbonato cálcico em óxido cálcico e anidrido carbônico gasoso, e a baixa temperatura poderia ocorrer a desidratação de um sal sólido

em vapor de água e em um sal anidro; ou a concentração de uma dissolução. Ademais, a capacidade de armazenar energia com este conceito é muito interessante, mas ainda seria necessário um grande esforço em desenvolvimento de tecnologia.

## 10.4. Aplicações

Os sistemas de armazenamento térmico em plantas solares térmicas substituem a fonte solar de energia nos momentos em que não está disponível ou não possui os níveis desejados. Isto significa que os sistemas de armazenamento térmico para plantas solares térmicas podem ser utilizados para:

- suavizar a interrupção/atenuação momentânea de radiação solar direta devido a passagem de nuvens (Amortização)
- deslocamento do momento de fornecimento energético em um dia (Deslocamento)
- ampliar o período de fornecimento energético (Extensão)
- otimização da produção anual (Sazonal)

O sistema com **amortização** realiza um armazenamento de curta duração, isso é, menor que o equivalente a uma hora de produção. Seu efeito sobre a eficiência global do sistema solar é, portanto, pequeno. Quando utilizado em instalações solares de economia de combustível conectadas em paralelo com as fontes convencionais evitam funcionamentos parcializados com mudanças bruscas, e contribuem ao fornecimento energético somente durante as horas de sol.

Ao sistema com **deslocamento** diário trasladam parte ou toda a energia fornecida das horas de sol às horas de maior consumo ou maior rentabilidade (horas pico). Este tipo de armazenamento realmente não aumenta o tamanho do campo solar necessário, considerando que simplesmente atua como 'condensador' do sistema solar, possibilitando a descarga em um tempo posterior ao de geração. Tem um tamanho que costuma rondar as 3-6 horas de carga pico.

O sistema com **extensão** do período de fornecimento utiliza um armazenamento que permite ao sistema solar cobrir as necessidades do sistema durante as horas, não solo de sol, sino durante parte de a noite e em dias nublados durante os quais os níveis de radiação são inferiores a os necessários para cobrir a correspondente demanda. Exige tamanhos maiores do campo de coletores que os correspondentes ao sistema sem armazenamento. As capacidades típicas costumam ser de 6 a 24 horas.

O sistema de nivelamento anual destina-se a máxima utilização da energia solar, com a conseguinte minimização de seu tamanho e custo ao armazenar o excesso de energia produzido durante as estações nas quais a carga é pequena e/ou o nível de radiação é elevado. É conhecido como **armazenamento sazonal**.

## 11. Situação Mundial

Neste capítulo se apresenta a situação da energia solar térmica com os dados disponíveis em 2012, data da primeira edição deste texto. Ainda que os dados concretos devam ser atualizados, da análise destes resultados podem ser extraída uma série de observações que entendemos interessantes para compreender melhor o desenvolvimento e promoção deste tipo de energia renovável.

### 11.1. Sistemas solares para baixa temperatura

Os sistemas solares térmicos são cada vez mais populares em um número cada vez maior de países. Como consequência, o mercado solar térmico mundial cresceu de forma contínua desde os 90. Segundo a estatística publicada em 2012 pelo *Programa Solar Heating and Cooling*, da Agência Internacional da Energia ([Weiss, 2012]), a finais de 2010 havia uma capacidade total instalada operativa de 195.8 GWth, o que corresponde a 279.7 milhões de metros quadrados de coletores, nos 55 países considerados pela estatística (correspondem a 61% da população mundial).

A maior parte desta capacidade em operação foi instalada na China (117.6GWth) e na Europa (36.0 GWth), que em conjunto representa 78% da total instalada. O resto se divide entre Estados Unidos e Canadá (com 16.0 GWth). Assim –excluindo a China- (com 9.4 GWth), a Austrália e a Nova Zelândia (6.0 GWth), os Países da América Latina e do Caribe (5.5 GWth), alguns países da região do Mediterrâneo e do Norte da África (4.4 GWth), bem como alguns países subsaarianos –como a Namíbia, a África do Sul e Zimbábue -(con0.8GWth).

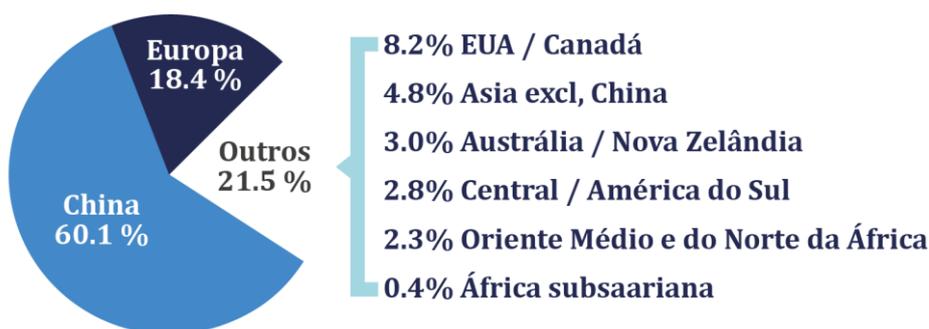


Ilustração 29: Porcentagem, por regiões, da potência instalada e em operação a finais de 2010 para sistemas térmicos de baixa temperatura [Weiss, 2012]

Esta capacidade total operativa se divide, segundo a tecnologia de coletor solar utilizada, em 111GWth de tubos de vácuo, 62.1 GWth de coletores de placa plana, 21.5GWth de coletores de água sem cobertura e 1.3GWth de coletores de ar.

Em termos de capacidade instalada operativa por cada 1000 habitantes, Chipre (575 kWth/1000 hab), Israel (394 kWth/1000hab) e Áustria (337 kWth/1000hab) são os países líderes. Dentre os países da América Latina e do Caribe se destaca Barbados (323kWth/1000hab), seguido de longe pelo Brasil (17kWth/1000hab) e pelo México (5KWth/1000hab).

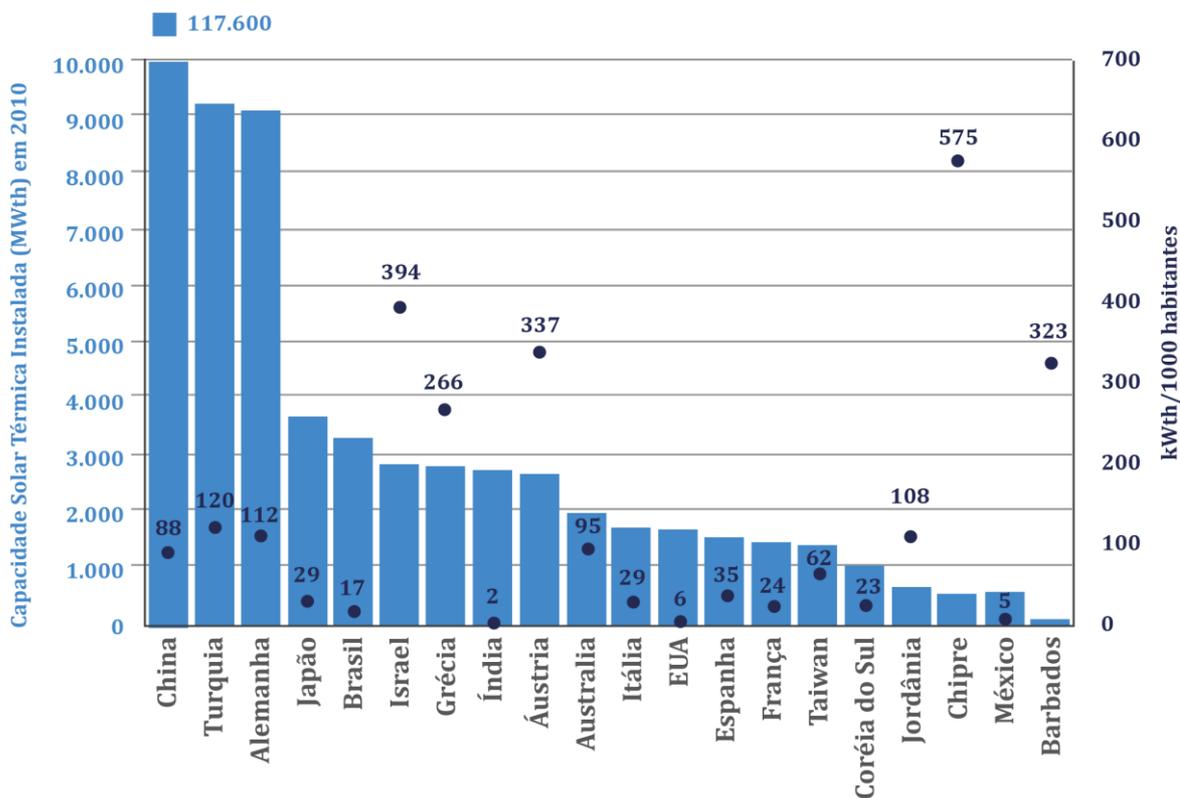


Ilustração 30: Potência instalada operativa a finais de 2010 por país em termos absolutos e por cada 100 habitantes (elaboração própria com dados de [Weiss, 2012])



Reflita por um momento observando os dados do gráfico da Ilustração : a disponibilidade de radiação solar é o parâmetro determinante para uma boa implementação dos sistemas solares nestes países?

É certo que países como Chipre e Israel têm níveis de radiação muito atrativos, contudo, em terceiro lugar no ranking de potência instalada por cada 1000 habitantes aparece a Áustria, um país com níveis de radiação bastante medíocres. A Áustria, com seus 337kWth/100hab possui entre 10 e 20 vezes mais potência instalada do que os países vizinhos com recursos solares muito melhores, como é o caso da Espanha (35kWth/1000hab) ou Itália (29kWth/1000hab). É evidente que esta imensa diferença não

é devida a barreiras tecnológicas importantes ou condições objetivas, mas a uma adequada promoção do mercado solar e um adequado quadro político. Os preconceitos podem, além disso, exercer um papel relevante ao ignorar que a energia solar térmica de baixa temperatura é, atualmente, uma tecnologia fiável e desenvolvida.

## 11.2. Sistemas solares para média e alta temperatura

A nível mundial, há cerca de 2.9 GWe instalados com sistemas de concentração solar para produção elétrica (Ilustração 31). Em um futuro próximo e, considerando que estão atualmente em construção, haverá mais 37 plantas, o que representará um aporte de quase 2,6 GWe instalados.



Ilustração 31: Mapa de usinas térmicas de concentração no mundo  
[<http://social.csptodae.com/tracker/projects>]

Tabela 3: Situação, em 2012, de usinas térmicas de produção elétrica (elaboração própria a partir de dados de [<http://social.csptodae.com/tracker/projects>])

Estado	Potência total MWe	Número de Plantas	Potência máxima por planta (MWe)	Potência mínima por planta (MWe)
Planning	4215,8	43	400	2,8
Desenvolvimento	2839,5	32	800	1
Construção	2590,7	37	280	1
Operação	2814,2	83	100	1

### 11.3. Barreiras ao grande desenvolvimento da energia solar térmica

A energia solar térmica pode proporcionar uma contribuição substancial à demanda de energia mundial, de uma maneira sustentável e acessível economicamente. Para 2050 se estima que, por exemplo, a União Europeia poderia fornecer 50% da demanda de energia a baixa temperatura, sempre e quando o consumo de energia térmica de baixa temperatura fosse reduzido com medidas de economia e racionalização efetivas. Entretanto, a energia solar, de modo geral, e particularmente a de baixa temperatura, aparecem como esquecidas e abandonadas pelos responsáveis políticos e as políticas para sua promoção costumam estar muito menos desenvolvidas, tanto em tempo<sup>2</sup> como em alcance.

A energia solar térmica de baixa temperatura geralmente é vista como uma tecnologia simples e elementar (*'low tech'* em sua aceção inglesa). Contudo, deixando de lado tecnologias renováveis tradicionais como a biomassa e a hidráulica, a energia solar térmica de baixa temperatura é a segunda fonte energética renovável depois da eólica, estando a fotovoltaica muito atrás (Ilustração 32).

<sup>2</sup> Sirva de exemplo a Espanha, onde as medidas de promoção à produção de energia elétrica com renováveis apareceram pela primeira vez em 1998, considerando as tecnologias eólica, biomassa, cogeração e fotovoltaica, e apenas no ano 2002 a energia térmica foi promovida com um investimento muito inferior ao necessário para seu desenvolvimento real.

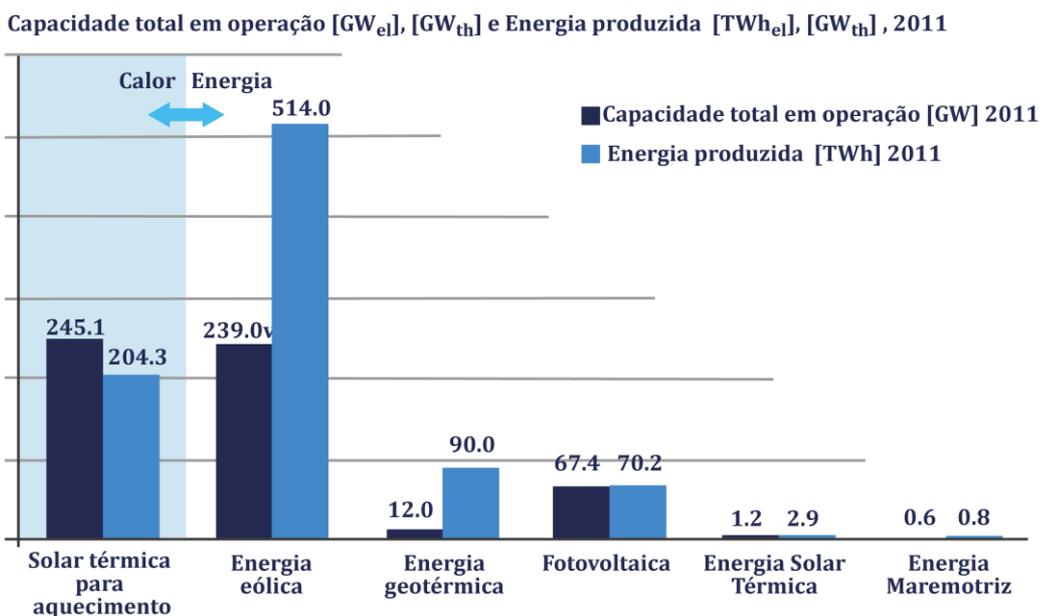


Ilustração 32: Capacidade total em operação em 2011 e energia gerada anualmente [Weiss, 2012]

Ao longo do curso foram mencionados exemplos e aplicações que são fiáveis e economicamente acessíveis. Entretanto, existem ainda muitas barreiras que impedem a difusão da energia solar. Com relação às diferenças entre a energia solar térmica de baixa temperatura e a de média-alta temperatura, de modo geral é possível afirmar que:

**A falta de conhecimento e sensibilização do usuário final** é uma das barreiras. Nas regiões em que a energia solar térmica é usada, a sensibilização da população é alta: amigos e vizinhos têm sistemas solares térmicos para ACS, por exemplo, e sabem que terão, inclusive em dias nublados, água quente disponível. A falta de conhecimento ou a desconfiança com relação aos sistemas solares térmicos é uma das principais causas pelas quais estes sistemas não são escolhidos para sistemas de ACS e aquecimento em regiões onde ainda não existe um mercado desenvolvido.

Com relação à energia solar térmica de baixa temperatura, a **falta de conhecimentos de arquitetos e engenheiros** é um grande problema. Os profissionais do setor da construção, incluindo os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, exercem um papel primordial no momento de escolher qual sistema implementar nos edifícios e indústrias. Se estes profissionais não têm formação suficiente em sistemas de energia solar térmica, não se sentirão cómodos recomendando-os, chegando inclusive a não aconselhá-los a seus futuros potenciais usuários. Neste sentido, a **falta de formação e educação regulamentada** pode resultar em uma instalação projetada inadequadamente, que não funcione corretamente, fomentando, assim, de forma indireta, uma má imagem da tecnologia. Isto é também aplicável à energia solar térmica de média-alta temperatura, já que os engenheiros em sua formação não costumam estudar este tipo de sistemas, apenas de forma marginal e voluntária, enquanto outros sistemas mais convencionais de geração elétrica são obrigatórios. Portanto, é recomendável que a energia solar térmica seja incluída nos planos gerais de formação e capacitação dos correspondentes profissionais. Desta forma, pelo menos para baixa temperatura os arquitetos e engenheiros verão os sistemas solares como uma opção padrão entre as possíveis no momento de projetar um edifício.

Isto é muito importante porque os sistemas de baixa temperatura têm um custo muito menor quando considerados desde o princípio no desenho do edifício (novas construções), do que quando devem ser incorporadas posteriormente (edifícios reformados). Isto nos leva a outra grande barreira que é a generalizada, mas **equivocada, ideia de que a energia solar térmica é cara**. Os sistemas de baixa temperatura têm preços entre 6.5 e 21 c\$/KWh na Europa, sendo muito menores em China. Isto significa que, em muitos casos, os sistemas solares térmicos de baixa temperatura são competitivos com sistemas convencionais. Esta forma de mostrar o custo, i.e., utilizando c\$/KWh costuma ser utilizada amplamente para sistemas convencionais, considerando que o principal gasto energético é o associado ao próprio combustível. No entanto, quando se fala de renováveis, de modo geral, e de solar térmica para baixa temperatura, especificamente, o custo do combustível é zero (a energia solar é completamente grátis), mas a investimento inicial para a instalação não. Considerando a investimento inicial para estes sistemas e a energia que proporcionam durante sua vida estimada (20 anos para os sistemas antigos, 25 anos para os sistemas modernos), é possível fazer uma estimativa do custo da energia gerada em termos de \$/KWh e então se pode ver como é competitiva a energia solar térmica. Do mesmo modo, o custo de energia das novas plantas solares térmicas de produção elétrica são comparados com o custo de energia de plantas convencionais já amortizadas de gás e carvão, levando a uma comparação inadequada e um pouco injusta. Como referencia do custo de energia produzida por usinas térmicas é possível utilizar os dados das plantas SEGS da Califórnia, plantas que funcionam desde os anos 80. Segundo Marc Ulrich, vice-presidente de Operações de Energia e Comércio de Southern California Edison (SCE), titular do contrato de compra de energia (PPA) para as nove plantas SEGS, *"...arredondando, SCE paga às plantas SEGS 6c\$/KWh: atualmente paga 5.57c\$/KWh no período de inverno. No próximo mês de junho entraremos em período de verão e os preços mudarão outra vez"*<sup>3</sup> (Muirhead, 2013)

Resumidamente, existem diferentes formas de pagar o fornecimento de energia e, como ocorre com as renováveis, que demandam um importante investimento inicial, podem levar a uma ideia errônea de que a energia de origem solar é cara.



**Refleta por um momento: existe alguma vantagem adicional na forma de pagar a energia gerada por um sistema solar?**

Efetivamente. Inclusive seria possível argumentar de maneira razoável que esta forma de pagar a energia é uma vantagem, considerando que o preço é fixado desde o princípio e não depende da variabilidade e flutuações do mercado como ocorre com o preço de combustíveis convencionais.

Uma característica do mercado solar térmico é o forte desequilíbrio entre poucos países líderes, com mercados completamente desenvolvidos, e uma grande maioria de países com um desenvolvimento de mercado muito lento. Este desequilíbrio parece perpetuar-se no tempo. Isso se deve a que quando um país alcança um adequado nível de desenvolvimento comercial em energia solar, o crescimento do mesmo se auto-mantém, inclusive com um mínimo de apoio político -é o caso da

<sup>3</sup> *"...SEGS are getting paid about 6 cents a kilowatt hour, for energy they deliver to SCE. I rounded it up: it's current rates are 5.57 cents, during the winter period. Next month in June we'll go into summer period and prices will change again."*

Grécia, por exemplo-. Por outro lado, nos países onde apenas existe demanda de sistemas solares, se estabelece um círculo vicioso que inibe o crescimento do mercado. Neste sentido, o **apoio político** pode ajudar substancialmente a romper esse círculo vicioso, promovendo e mantendo um crescimento do mercado solar até que este adquira um volume crítico que lhe permita crescer sem tal apoio público. Este apoio público deve ser fiável e com uma projeção a médio-longo prazo:

- O apoio público com *projeção a médio-longo prazo e com objetivos claramente definidos* é um requisito indispensável para manter a confiança de fabricantes, fornecedores e promotores, para que estes façam os investimentos necessários para o crescimento do mercado solar. A falta de continuidade e coerência nos apoios públicos deve ser evitada, portanto, a todo custo.
- Este apoio público deve estar *bem desenhado e bem implementado*. Deve-se considerar que a energia solar térmica tem um componente local muito importante, favorecendo o desenvolvimento local de uma forma sustentável. Trata-se de tecnologias que criam trabalho, tanto para pequenas e médias empresas, quanto para grandes empresas. A maioria dos trabalhos gerados são de instalação e manutenção, que costumam ter um componente local muito importante.

Para ter resultados efetivos é necessário que **as medidas para paliar todas estas barreiras sejam adotadas de forma simultânea**: campanhas de informação a usuários finais e instaladores assegurarão que os sistemas instalados sejam usados mais eficientemente, mas se estes sistemas estiverem desenhados inadequadamente, devido a uma deficiente formação do desenhador, a imagem da solar térmica será prejudica, por exemplo.

Diante do exposto anteriormente com relação à maturidade de algumas tecnologias solares térmicas, não se deve pensar que não existe gama de manobra para a extensão a aplicações novas e/ou emergentes -processos industriais e refrigeração, por exemplo-, bem como para a otimização e melhora tanto de processos quanto de produtos. As **atividades de Pesquisa e Desenvolvimento**, portanto, são importantes e prioritárias em um cenário de geração de energia sustentável.

## Bibliografía

- Abengoa (2013),  
[http://www.abengoasolar.com/web/es/nuestras\\_plantas/plantas\\_en\\_construccion/estados\\_unidos/#seccion\\_1](http://www.abengoasolar.com/web/es/nuestras_plantas/plantas_en_construccion/estados_unidos/#seccion_1)
- Ajona, J.I. (1997), Tecnología de Captadores Cilindro Parabólicos para Producción de Electricidad: la Experiencia Californiana traída al Mediterráneo' Curso: 'Sistemas Solares Fototérmicos: Tecnología y Aplicaciones', organizado por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT, Madrid (España), Mayo 1997.
- British Petroleum (2006) Quantifying Energy. BP Statistical Review of World Energy June 2006. Disponible en <http://www.bp.com>
- Costa Novella, E. (1986) Ingeniería Química (Volumen-4): Transmisión de Calor'. Alhambra Universidad.
- GreenHeiss, (2013), Emisores de baja temperatura, <http://www.greenheiss.com/>, consultada en Junio 2013
- Henning, H-M. and Wiemken, E., (2007), Solar Cooling, ISES Solar World Congress 2007, Beijing, China.
- <http://www.energias-renovables.com/articulo/heladeras-solares-para-indigenas>, consultada en Junio 2013
- IEA-Task32, (2005), Thermal energy storage for solar and low energy buildidngs (Hadorn Ed.)
- Internacional Energy Agency, 'Key world energy statistics', 2010, ([http://www.iea.org/stats/balancetable.asp?COUNTRY\\_CODE=21](http://www.iea.org/stats/balancetable.asp?COUNTRY_CODE=21))
- Kreith, F.; Kreider, J.F. (1978) Principles of Solar Engineering" McGraw-Hill Co.
- Made in China, (A), (2013), [http://es.made-in-china.com/co\\_fivestarsolar/product\\_Solar-Thermal-Water-Heater-300L-Pressurized-Solar-Energy-Heating-System\\_euuunrhog.html](http://es.made-in-china.com/co_fivestarsolar/product_Solar-Thermal-Water-Heater-300L-Pressurized-Solar-Energy-Heating-System_euuunrhog.html), consultado en Junio 2013
- Made in China, (B), (2013), [http://es.made-in-china.com/co\\_hnsunbowsolar/product\\_Vacuum-Tubes-Solar-Water-Heater\\_hhhihnosy.html](http://es.made-in-china.com/co_hnsunbowsolar/product_Vacuum-Tubes-Solar-Water-Heater_hhhihnosy.html), consultada en Junio 2013
- Meier et al, (2005) Economic evaluation of the industrial solar production of lime. Energy Conversion and Management 46, p. 905–926.
- Muirhead, (2013) SEGS experience suggests that CSP will age gracefully", CSP Today, <http://social.csptoday.com>

Rabl, (1985), Active Solar Collectors and Their applications, Oxford University Press.

Rohsenow, Harnett, Ganic Editores (1985) Handbook of Heat Transfer Fundamentals'. 2ª Edición. McGraw-Hill Book Company.

Rotartica, (2009), Línea solar térmica.

Schweiger et al, (2000), The potential of solar heat in industrial processes. A state of art review in Spain and Portugal. EuroSun 2000. Copenhagen.

Sharma et al (2009), Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 13, p. 318-345.

SHC, 2012a, <http://task29.iea-shc.org/>, consultada en Junio 2013

SHC, 2012b, <http://task33.iea-shc.org/>, consultada en Junio 2013

SHC, 2012c, <http://task49.iea-shc.org/>, consultada en Junio 2013

Siegel, R.; Howel, J.R. (1972) Thermal Radiation Heat Transfer' McGraw-Hill, Inc.

Swet, C.J. (1990). "Energy Storage for Solar Systems: Overview" in "Solar Collectors, Energy Storage and Materials" Edited by F. de Winter, MIT Press.

Terra, (2013), <http://www.terra.org/categorias/articulos/guia-practica-de-una-instalacion-de-energia-solar-termica>, consultada en Junio 2013

Weiss, Mauthner, 2012 "Solar Heat Worldwide. Markets and Contribution to Energy Supply 2010", 2012 Edition

## Índice de figuras

### Tabelas/ Ilustrações

Ilustração 1: Balanço energético em um coletor solar térmico.....	9
Ilustração 2: Temperaturas proporcionadas por diferentes sistemas solares térmicos .....	12
Ilustração 3: Esquemas gerais de coletores solar térmicos com cobertura .....	14
Ilustração 4: Esquemas de tubos de vácuo.....	15
Ilustração 5: Esquema de funcionamento e vista ampliada de um coletor CPC .....	16
Ilustração 6: Métodos mais comuns para concentrar a radiação solar direta. ....	17
Ilustração 7: Esquemas gerais da configurações típicas de sistemas solares térmicos de baixa temperatura [Rabl, 1985] .....	21
Ilustração 8: Esquema de funcionamento com (a) circulação forçada. e (b) natural, [Terra, 2013]....	22
Ilustração 9: Equipamentos compactos.....	23
Ilustração 10: Esquema de um sistema de refrigeração de ciclo fechado com aporte de energia térmica [Henning&Wiemken, 2007].....	26
Ilustração 11: Esquema de um sistema de refrigeração de ciclo aberto com aporte de energia térmica [Henning&Wiemken, 2007].....	27
Ilustração 12: (a) Ciclo de compressão mecânica de vapor (b) Ciclo de absorção, [Rotartica, 2009] .	28
Ilustração 13: Ciclo padrão dessecativo usando uma roda dessecante .....	30
Tabela 1: Nível de temperatura requerido para diferentes processos industriais segundo setores, [Schweiger et al., 2000]. .....	33
Ilustração 14: Esquema do processamento e secagem de frutas e hortaliças.....	35
Ilustração 15: Ajuste de um dispositivo solar para secagem de café, no Peru ( <a href="http://www.energias-renovables.com">http://www.energias-renovables.com</a> ) .....	36
Ilustração 16: campo de coletores cilíndrico parabólicos da Mineração El Tesoro ( <a href="http://www.abengosolar.com">http://www.abengosolar.com</a> ).....	37
Ilustração 17: Princípio de funcionamento e componentes de um CCP. ....	38
Ilustração 18: Esquema geral e foto parcial do receptor de um captador solar cilíndrico parabólico.	39
Ilustração 19: Rotação do coletor sobre seu eixo (eixo orientado N-S) .....	41
Ilustração 20: geração de vapor com coletores solares cilíndrico parabólicos .....	43
Ilustração 21: Esquema e foto aérea de um campo típico de coletores cilíndrico parabólicos .....	44
Ilustração 22: (a) Vista de um helióstato típico (GM-100);(b) Mecanismo de acionamento (SENER) .	47

Ilustração 23: Movimento aparente do Sol dos dois hemisférios terrestres .....	47
Ilustração 24: Receptores tubulares .....	48
Ilustração 25: (a) foto de um disco parabólico e (b) esquema de um motor Stirling .....	50
Tabela 2: Propriedades de materiais suscetíveis de ser usados como meios de armazenamento térmico.....	52
Ilustração 26: tanque termoclino: (a) esquema de acoplamento e (b) diferentes configurações de entradas de fluido em tanques de água [IEA-Task32, 2005] .....	53
Ilustração 27: Classificação de PCMs [Sharma, 2009].....	55
Ilustração 28: Alguns dos mecanismos até agora propostos para obter boas taxas de transferência de energia, trabalhando com materiais com baixa condutividade térmica .....	56
Ilustração 29: Porcentagem, por regiões, da potência instalada e em operação a finais de 2010 para sistemas térmicos de baixa temperatura [Weiss, 2012].....	58
Ilustração 30: Potência instalada operativa a finais de 2010 por país em termos absolutos e por cada 100 habitantes (elaboração própria com dados de [Weiss, 2012]).....	59
Ilustração 31: Mapa de usinas térmicas de concentração no mundo [http://social.csptodae.com/tracker/projects] .....	60
Tabela 3: Situação, em 2012, de usinas térmicas de produção elétrica (elaboração própria a partir de dados de [http://social.csptodae.com/tracker/projects] .....	61
Ilustração 32: Capacidade total em operação em 2011 e energia gerada anualmente [Weiss, 2012] .....	62

*BR: Autor: Rojas, E. (2013). Energía Solar Térmica*