

ENERGIA SOLAR

Energias Renováveis

Miguel Centeno Brito



"Adoração de Aten", painel de baixo relevo em calcário encontrado em escavações do túmulo do faraó Akhenaton, em 1891, hoje exposto no Museu de Arqueologia do Cairo.

No painel, o faraó Akhenaton, da XVIII dinastia (1370 AC), e a sua rainha Nefertiti adoram o deus Aten, representado por um disco luminoso cujos raios solares iluminam as mãos do faraó.



Templo dedicado a Quetzalcoatl, em Chichén Itzá, cidade Maia na Península de Yucatan, dos finais do século X.

Nos equinócios, ao pôr-do-sol, o sol ilumina a pirâmide de forma gradual, criando a imagem de uma serpente que desce a escadaria principal até ao chão.



Templo de Konarak dedicado a Surya, deus-sol, construído em 1278 DC, hoje quase em ruínas, em Orissa, Índia.

O templo foi concebido como uma carruagem puxada por seis cavalos através dos céus. A carruagem está assente em 24 rodas, cada uma com mais de três metros de diâmetro e cujos raios funcionam como relógios solares, indicando com precisão a hora local.



"New Light on Rome 2000", instalação de Peter Erskine, com prismas, espelhos e radiação solar no Mercado de Trajano, na Casa Real de Rodes, na Porta di San Sebastiano, e no Criptoportico de Nero. Os arcos romanos transformam-se em arco-íris.

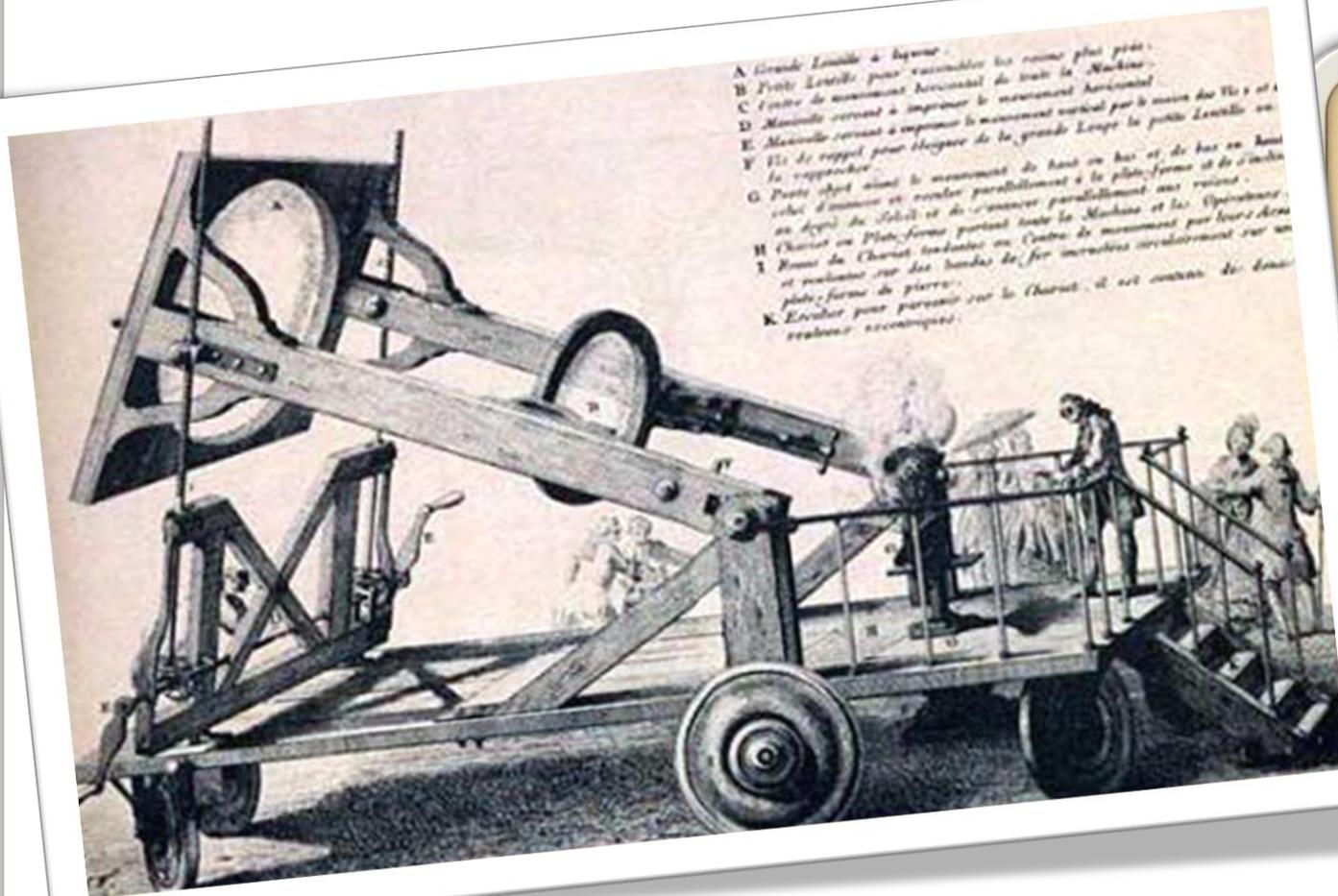


200 AC: Arquimedes sozinho contra a armada de Siracusa



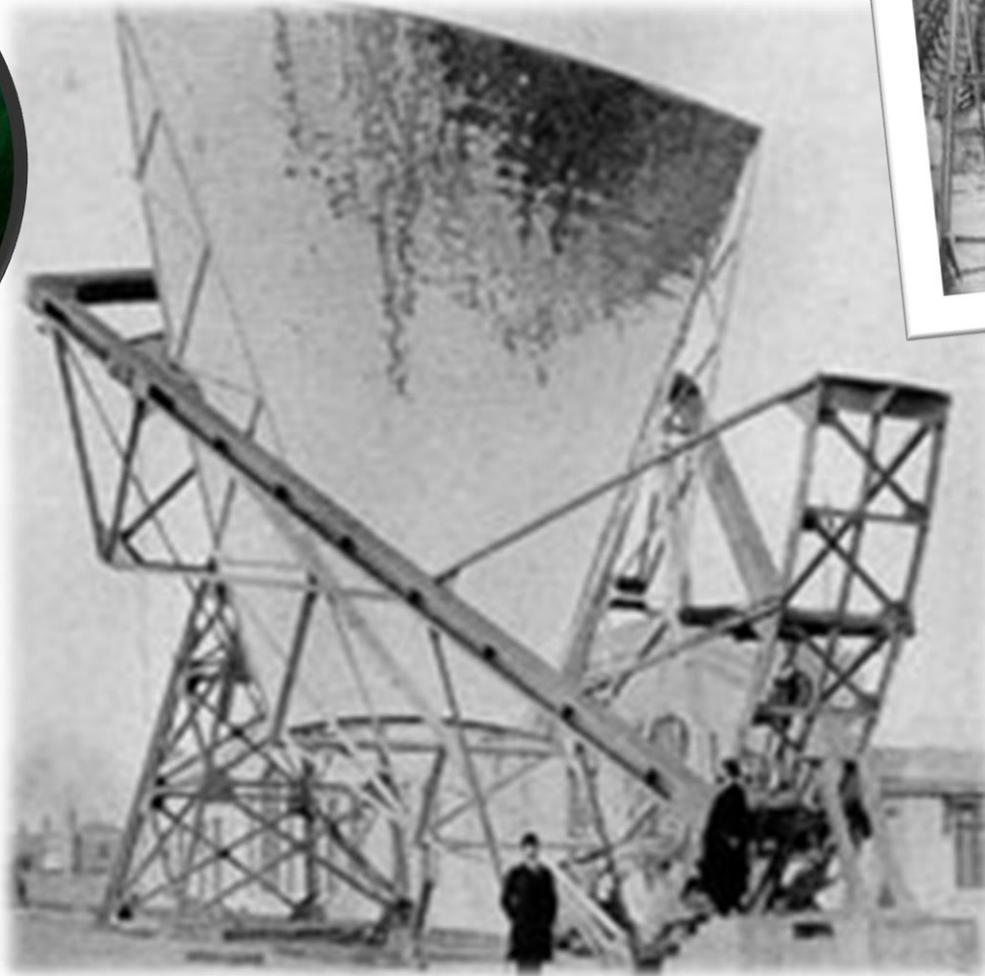
Código Justiniano define "Direitos de Sol" para garantir que os edifícios não podiam ser privados de radiação nas fachadas orientadas a Sul.

1700 DC: Lavoisier constrói um **forno solar** capaz de atingir 1700°C para demonstrar que o diamante é apenas outra forma cristalográfica do carbono



Pirelióforo Padre Gomes Himalya (1868-1933)

Grand Prix Exposição de St Louis, 1904



APLICAÇÕES ENERGIA SOLAR

Radiação solar = energia electromagnética

Utilização **directa** da energia solar sem transformação
e.g. iluminação de espaços interiores edifícios.

Aproveitamento da energia solar sob outras formas de energia:

- térmica, sob a forma de **calor**
- fotovoltaica, sob a forma de **electricidade**

APLICAÇÕES ENERGIA SOLAR

Radiação solar = energia electromagnética

Utilização **directa** da energia solar sem transformação
e.g. iluminação de espaços interiores



1 garrafa ~ 1 lâmpada de 40 a 60 W

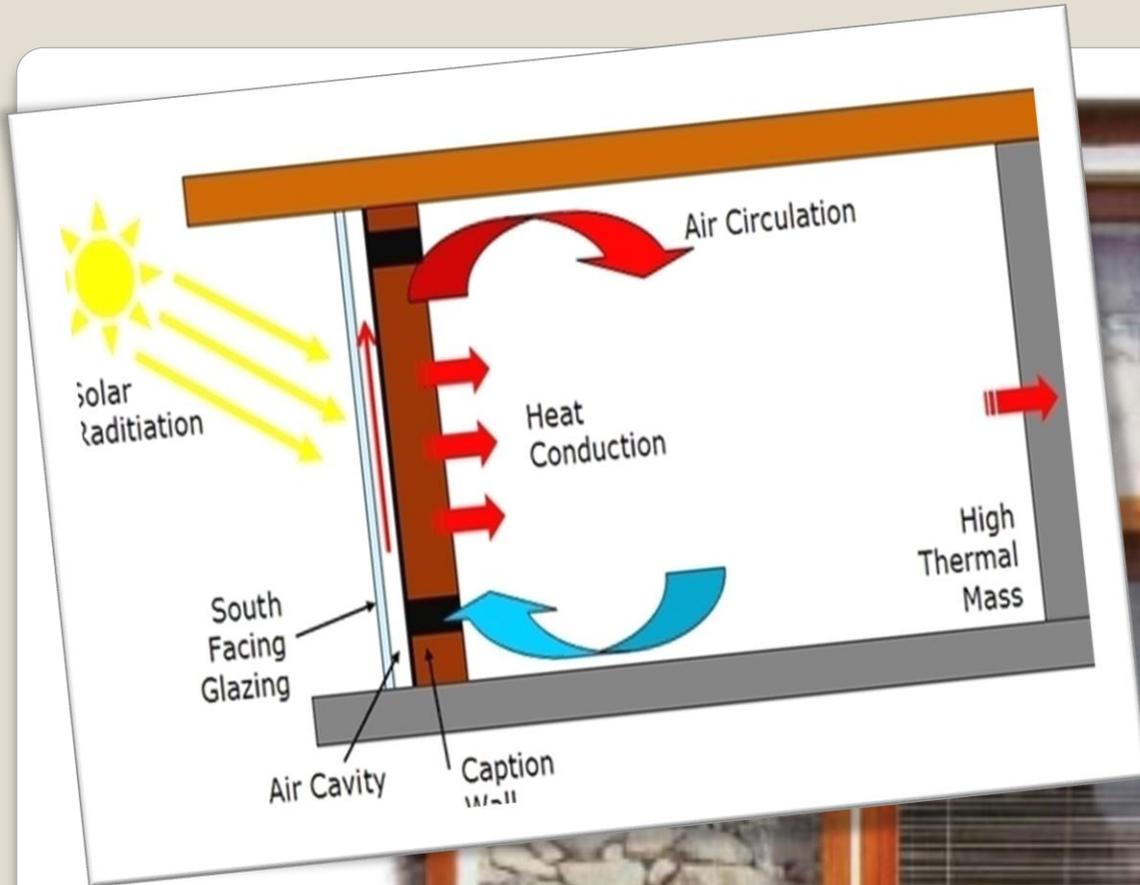


APLICAÇÕES ENERGIA SOLAR

Radiação solar = energia electromagnética

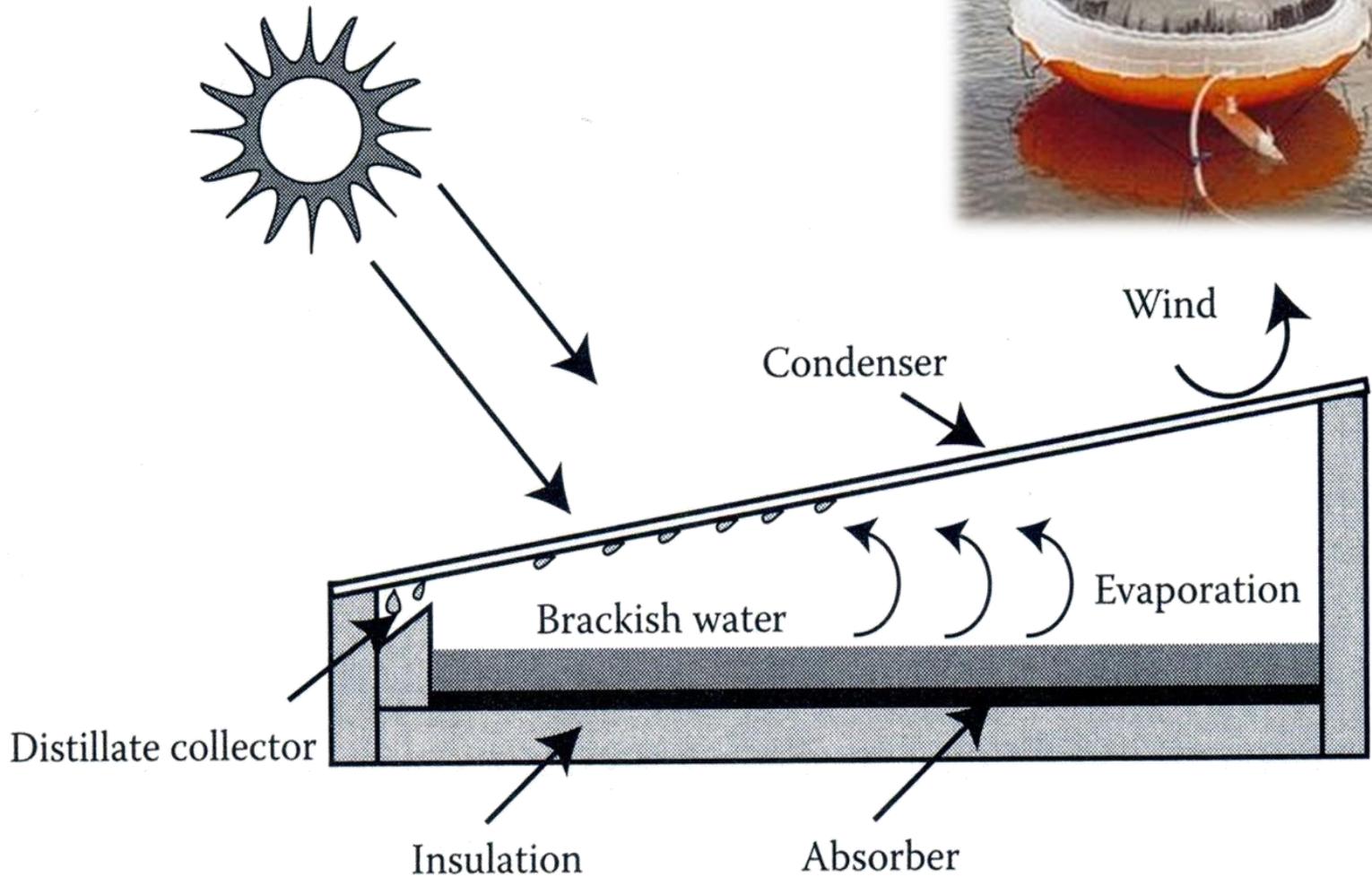
Utilização **directa** da energia solar sem transformação
e.g. iluminação de espaços interiores edifícios

Energia solar **passiva** (calor):
Planeamento e construção dos edifícios para aproveitamento da energia solar
e.g. fachadas a sul (hemisfério norte)
 palas horizontais nas janelas
 árvores de folha caduca para sombreamento



Dessalinização

Destilador solar





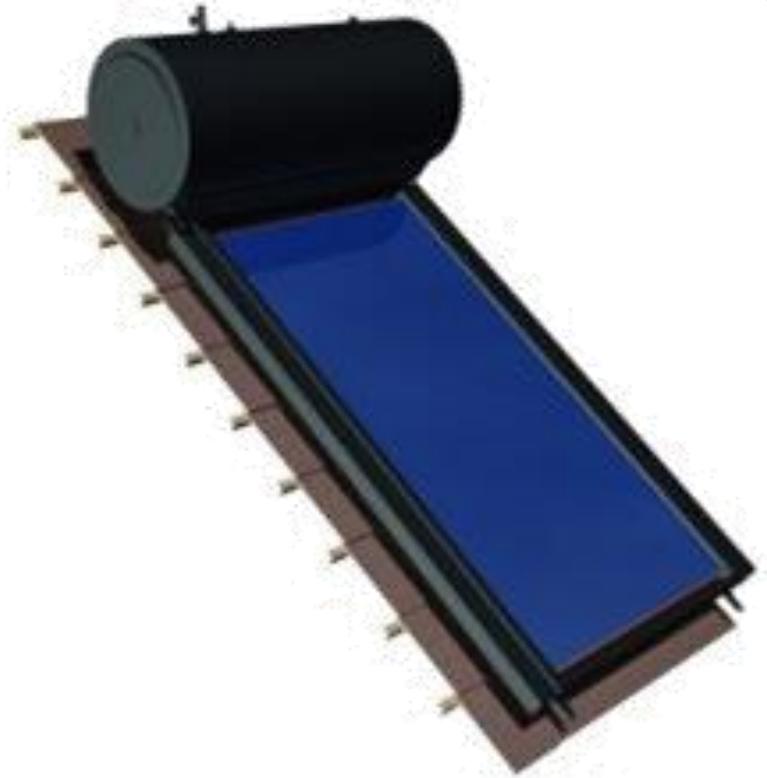
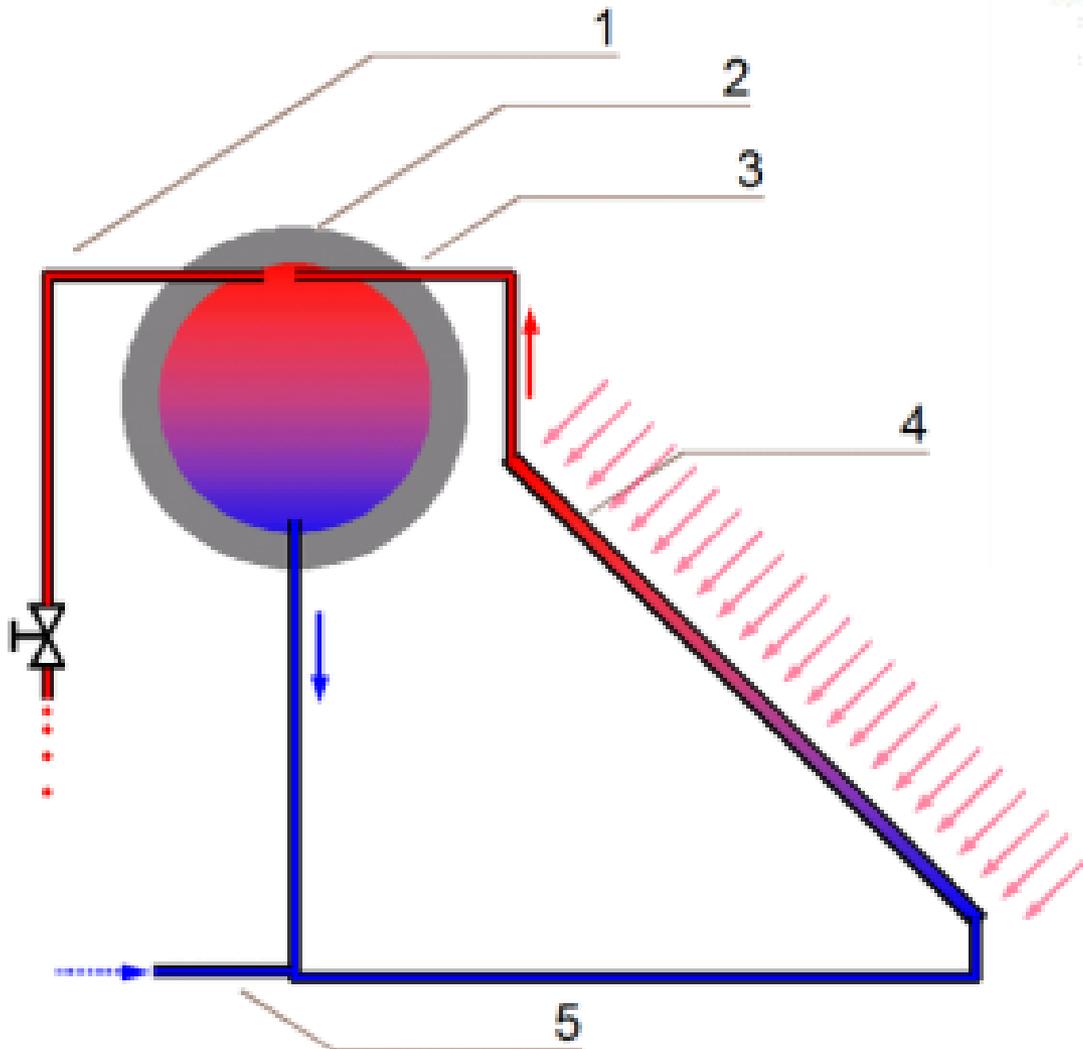
N: 1

1

Secador solar

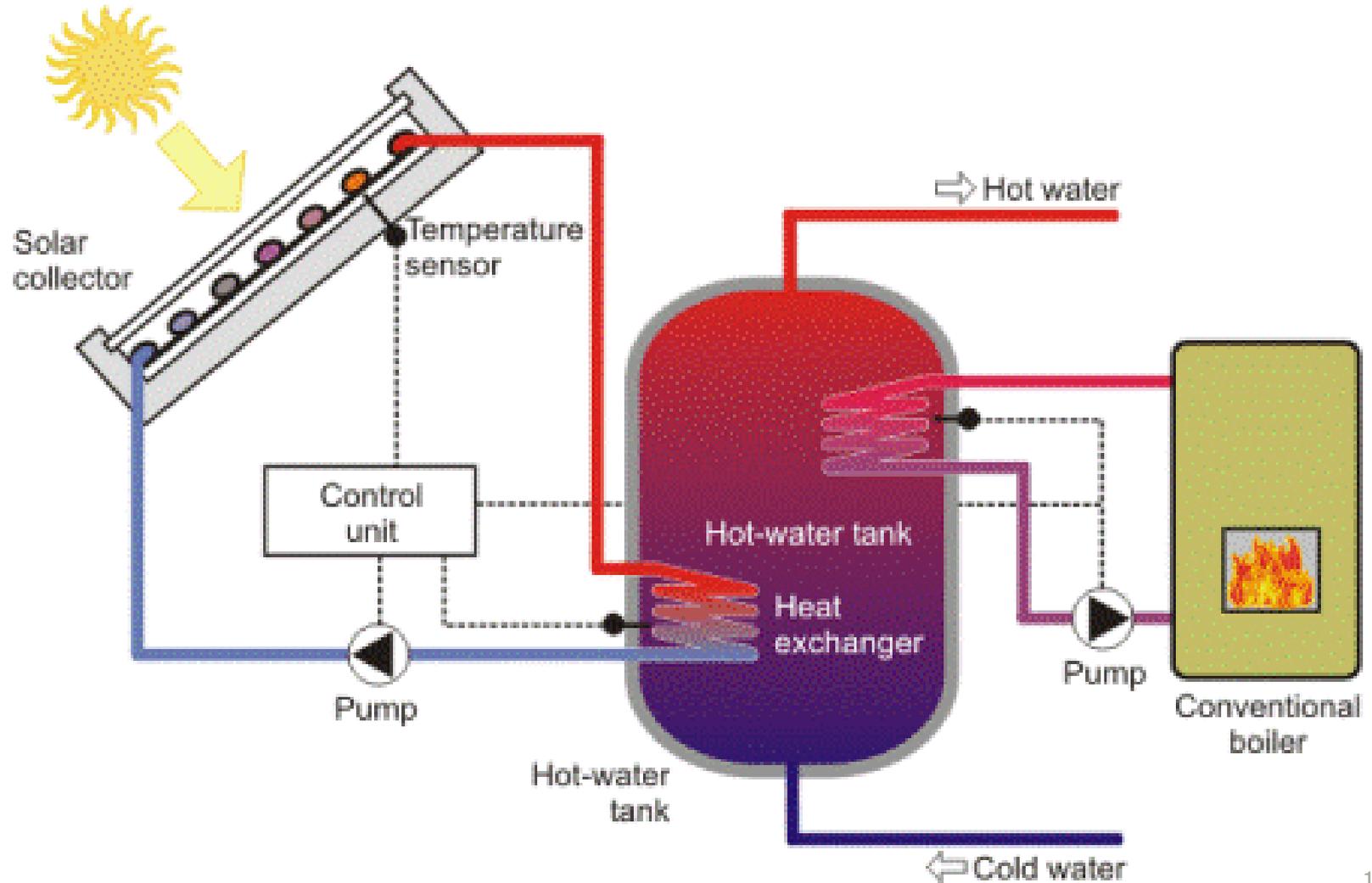
Produção de água quente solar

Painel solar térmico com termosifão



Produção de água quente solar

Painel solar térmico com bomba de circulação



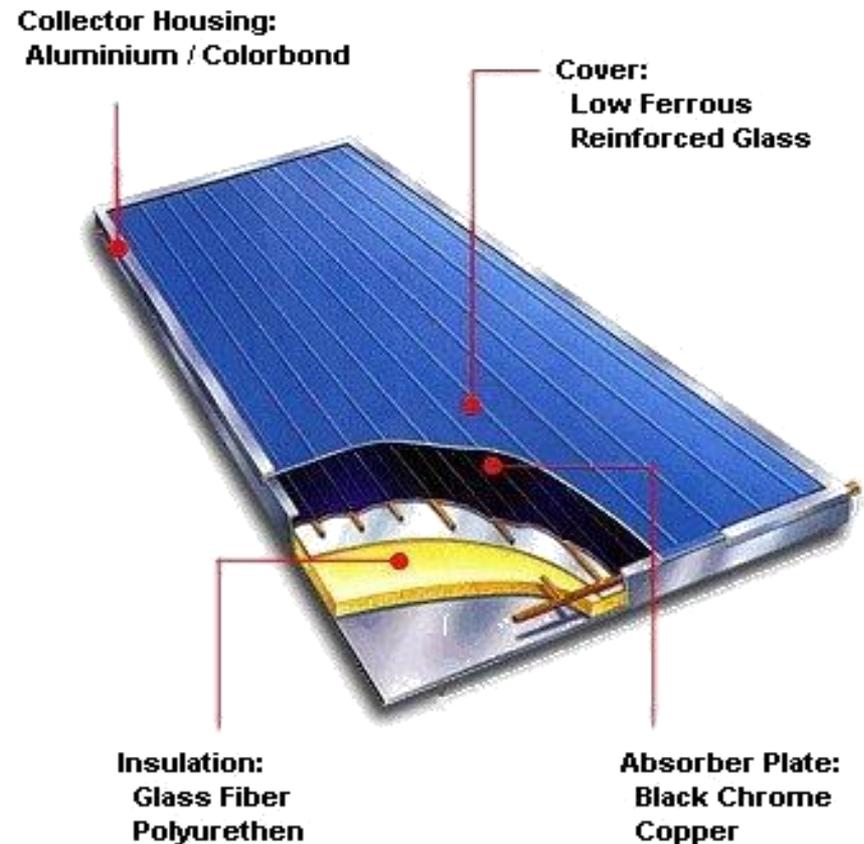
Produção de água quente solar

Painel solar térmico

$$Q = mC(T_o - T_i)$$

$$[J] = [kg] \left[\frac{J}{kg K} \right] [K]$$

Para aquecermos uma dada massa de um fluido (e.g. água), com uma dada **capacidade térmica** C , de uma temperatura T_i para uma temperatura T_o precisamos da energia Q .



Produção de água quente solar

Painel solar térmico

Eficiência do painel solar:

$$\eta = F_R \tau \alpha - F_R U_L \frac{T_{abs} - T_{amb}}{I}$$

Fracção da radiação incidente absorvida

τ transmissividade do vidro
 α absorção do colector
 F_R coeficiente empírico

Perdas calor por radiação e convecção

U_L coeficiente transferência calor
 T_{abs} temperatura absorsor
 T_{amb} temperatura exterior
 F_R coeficiente empírico

Produção de água quente solar

Painel solar térmico

Eficiência do painel solar:

$$\eta = F_R \tau \alpha - F_R U_L \frac{T_{in} - T_{amb}}{I}$$

Fracção da radiação incidente absorvida

τ transmissividade do vidro
 α absorção do colector
 F_R coeficiente empírico

Perdas calor por radiação e convecção

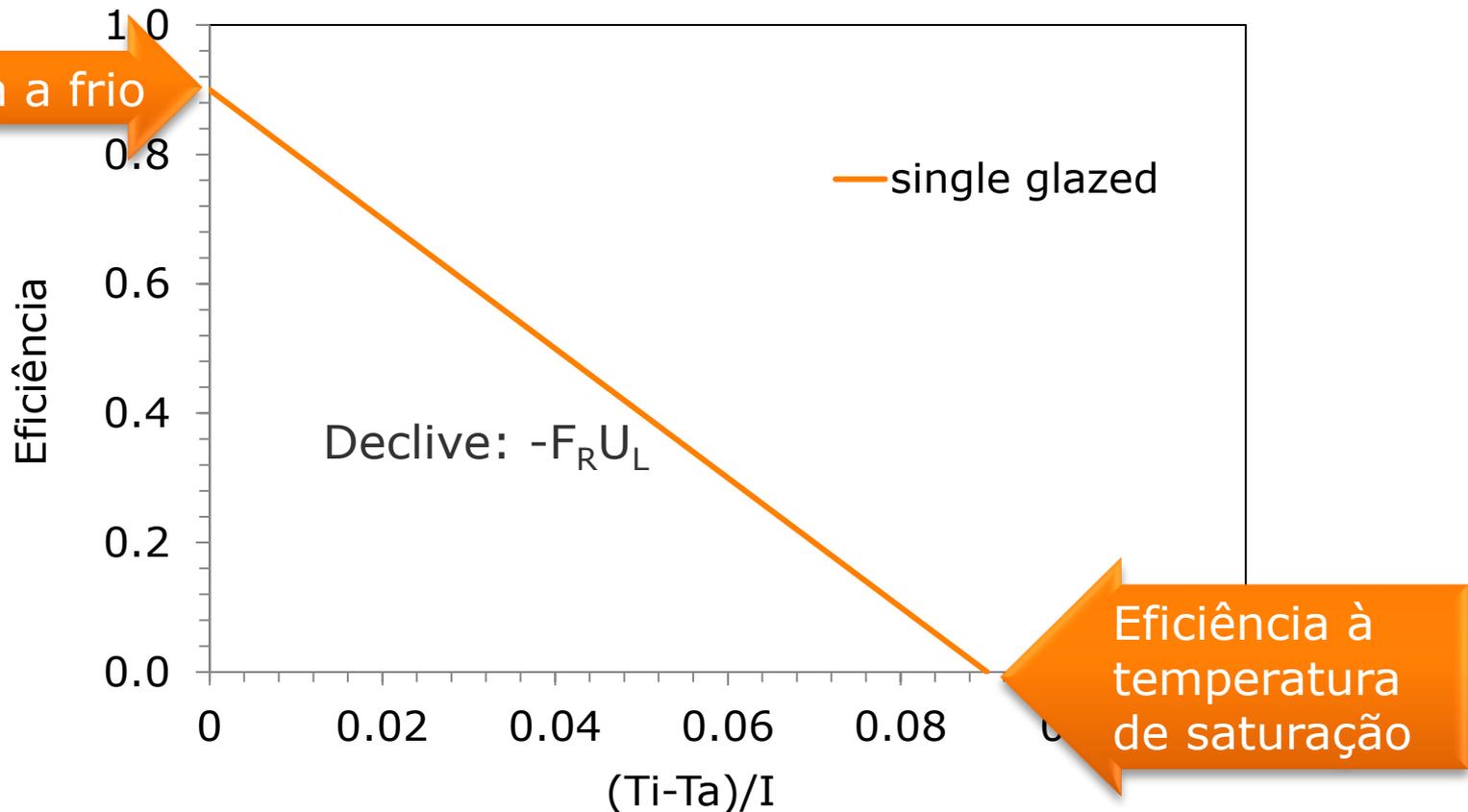
" U_L " coeficiente transferência calor
 T_{in} temperatura fluido à entrada
 T_{amb} temperatura exterior
 F_R coeficiente empírico

Produção de água quente solar

Painel solar térmico

Eficiência do painel solar:

$$\eta = F_R \tau \alpha - F_R U_L \frac{T_{in} - T_{amb}}{I}$$

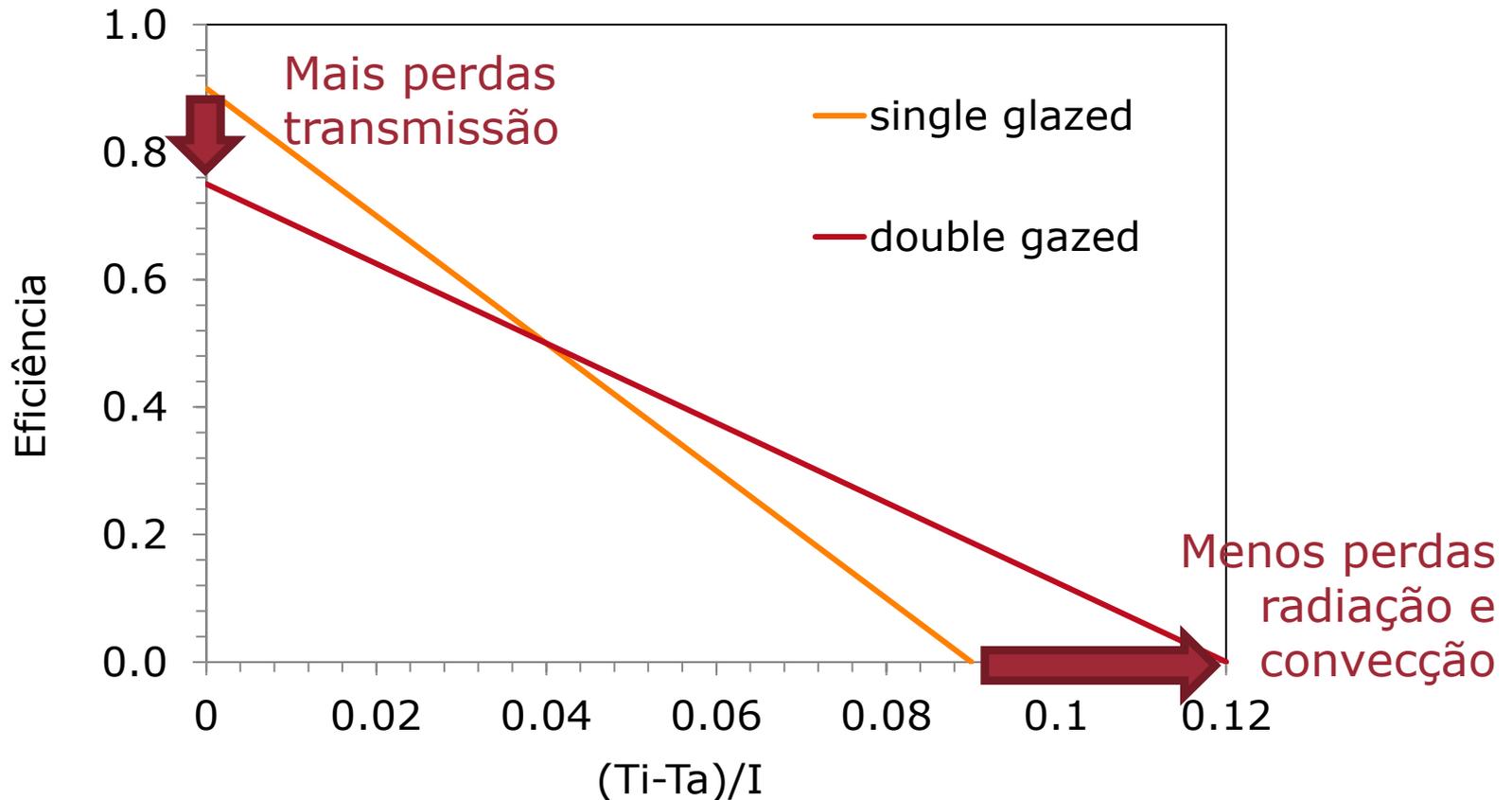


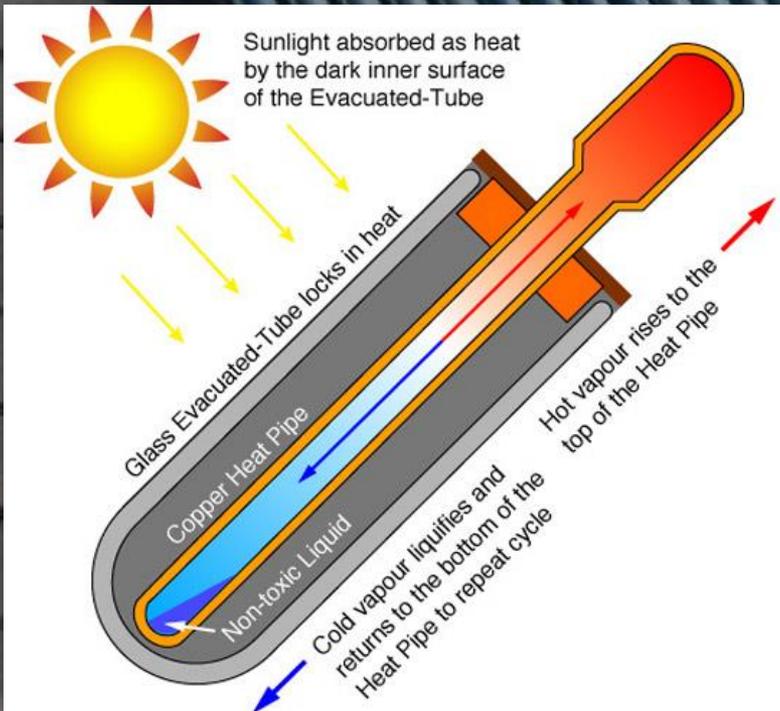
Produção de água quente solar

Painel solar térmico

Eficiência do painel solar:

$$\eta = F_R \tau \alpha - F_R U_L \frac{T_{in} - T_{amb}}{I}$$



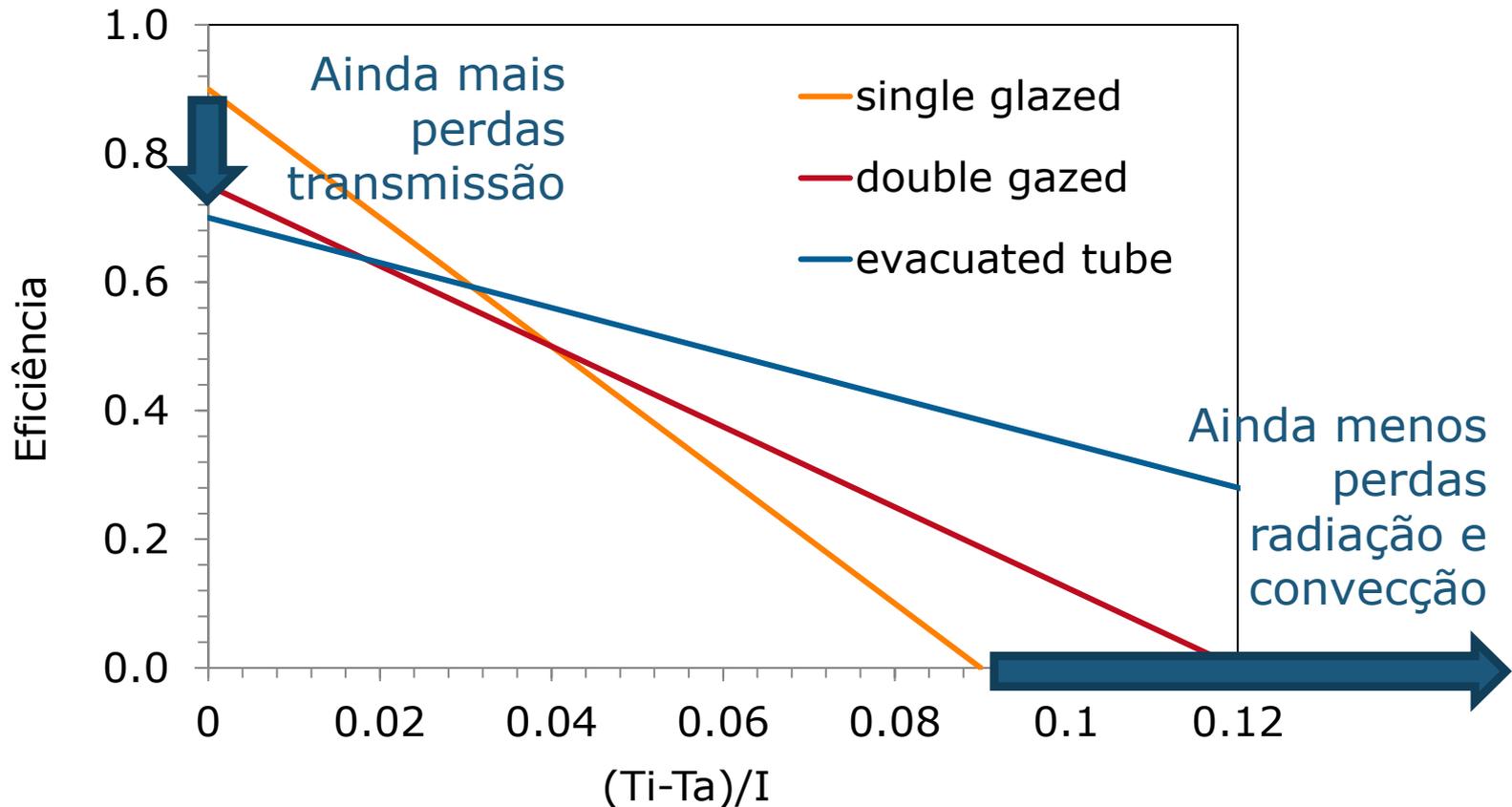


Produção de água quente solar

Painel solar térmico

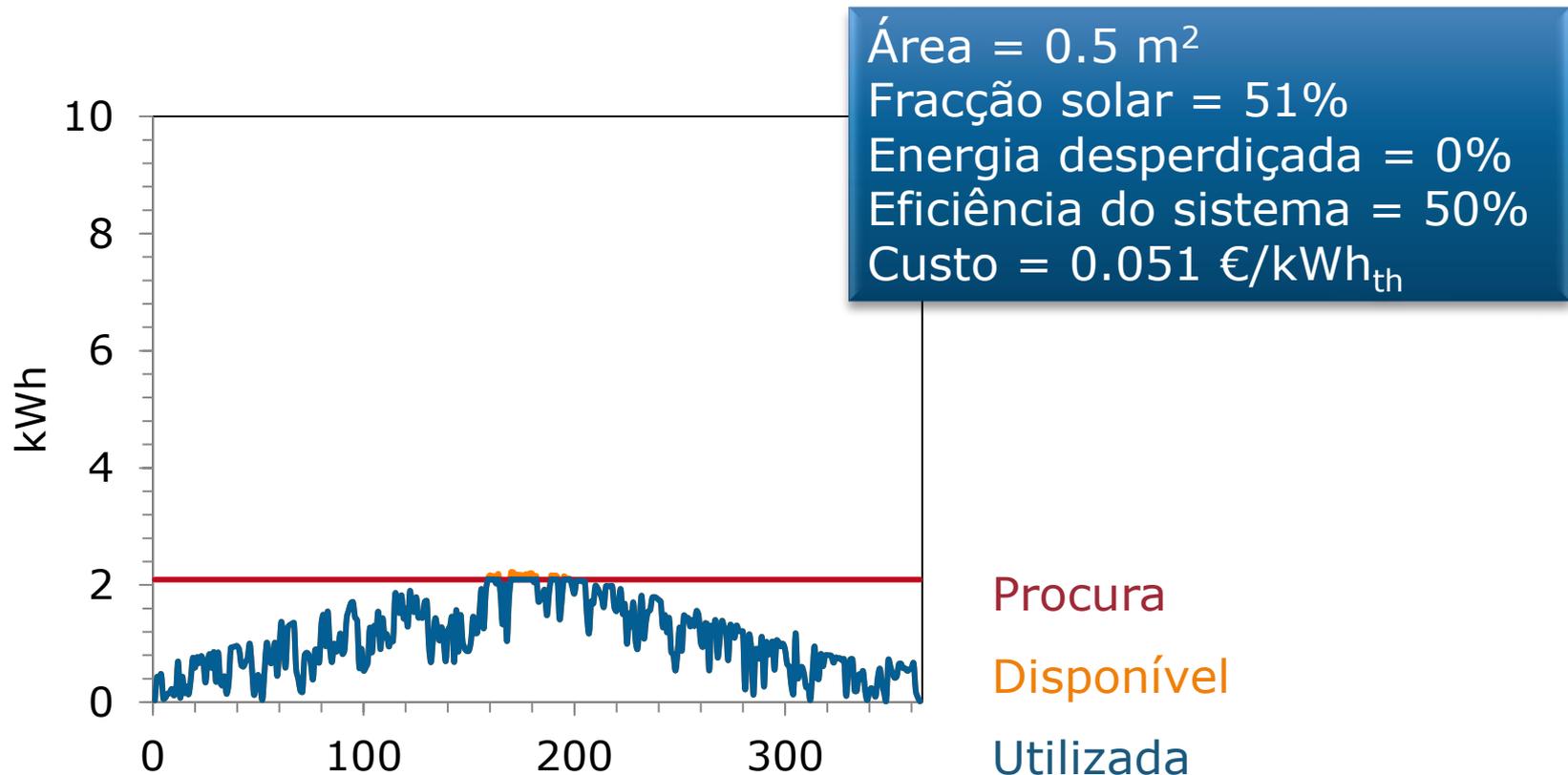
Eficiência do painel solar:

$$\eta = F_R \tau \alpha - F_R U_L \frac{T_{in} - T_{amb}}{I}$$



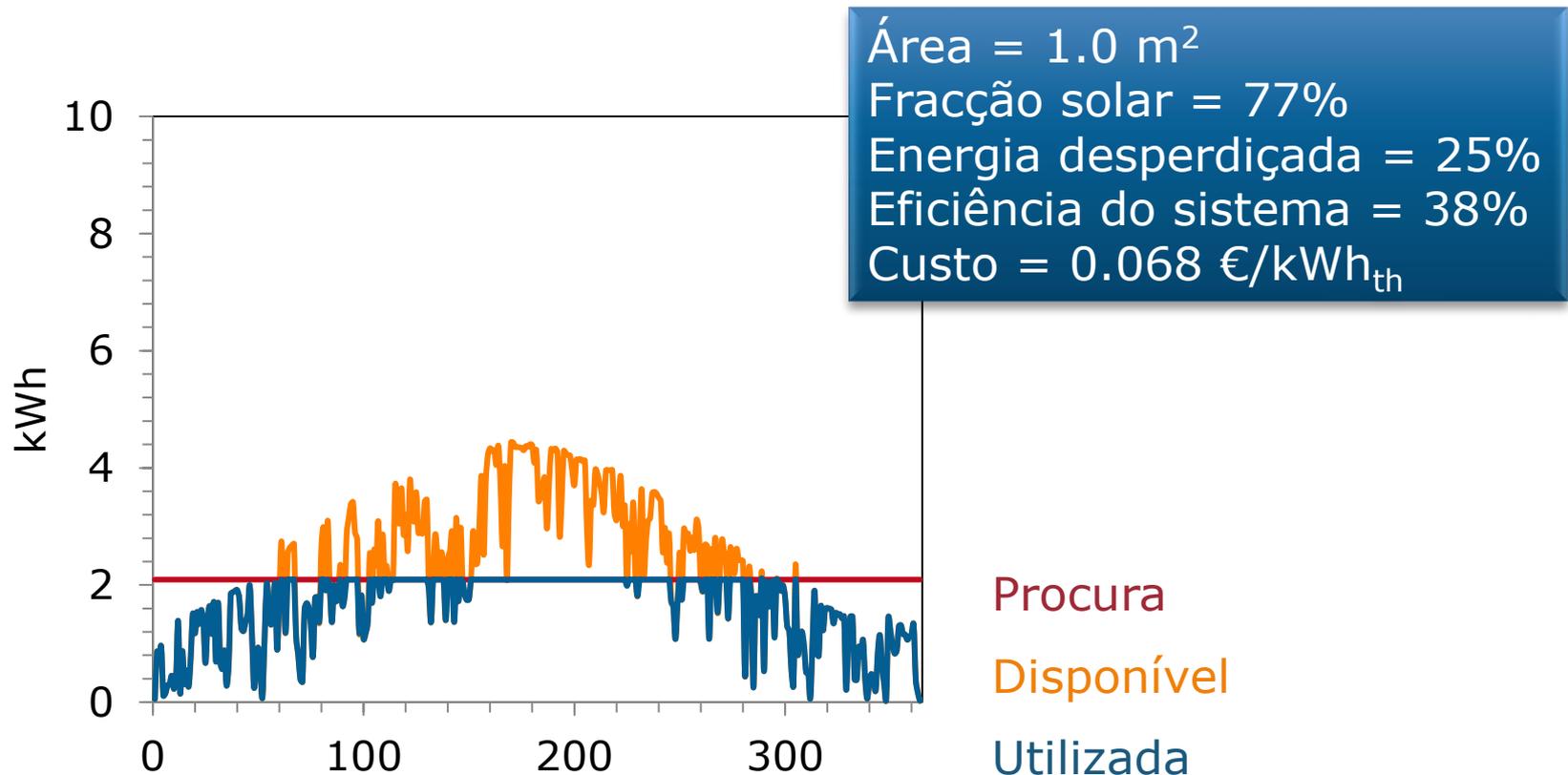
A eficiência depende da procura!

Considere-se uma dada exposição solar, uma eficiência de conversão média de 50% e uma procura típica (60 litros/dia @ 45°C)



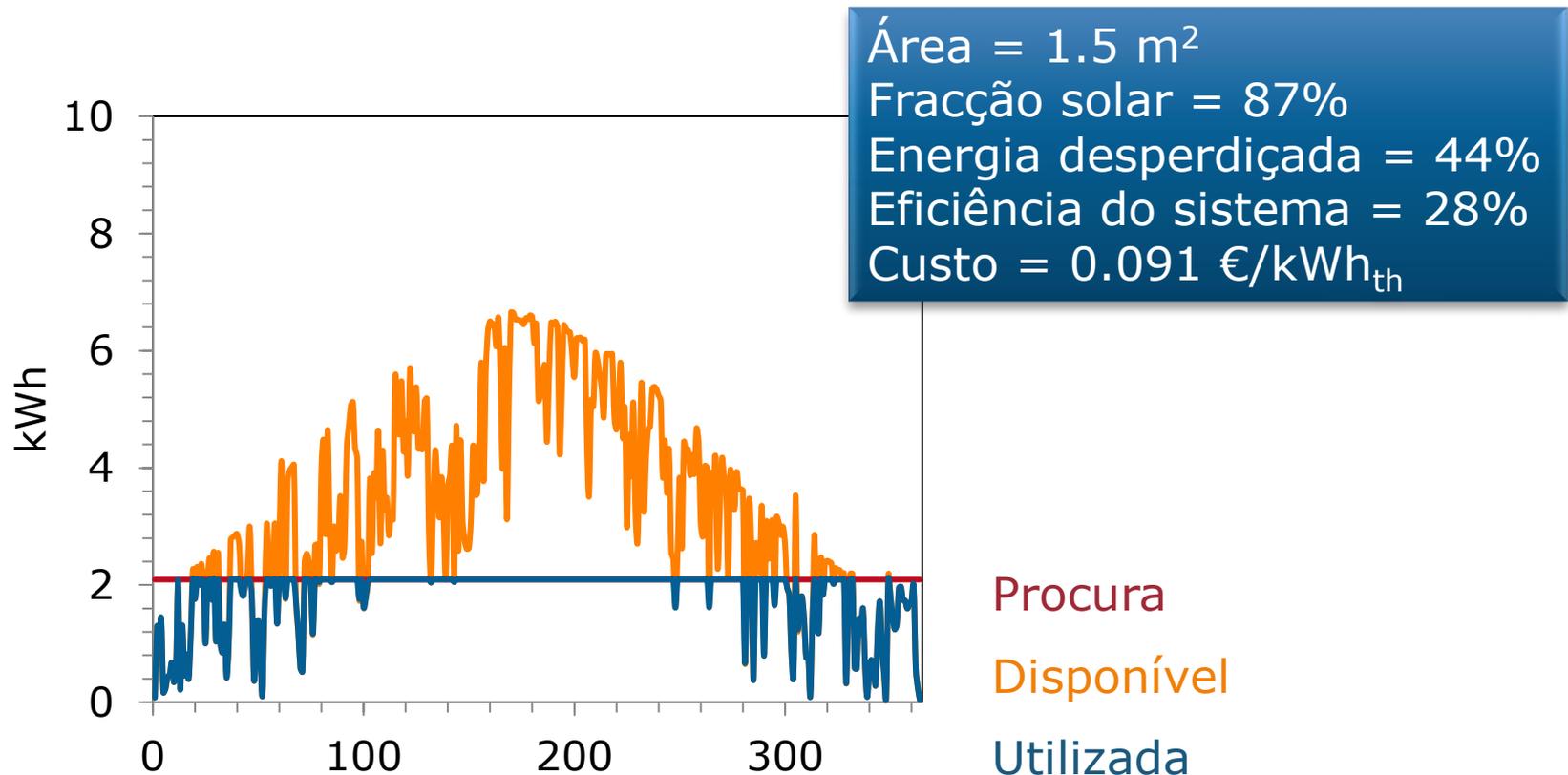
A eficiência depende da procura!

Considere-se uma dada exposição solar, uma eficiência de conversão média de 50% e uma procura típica (60 litros/dia @ 45°C)



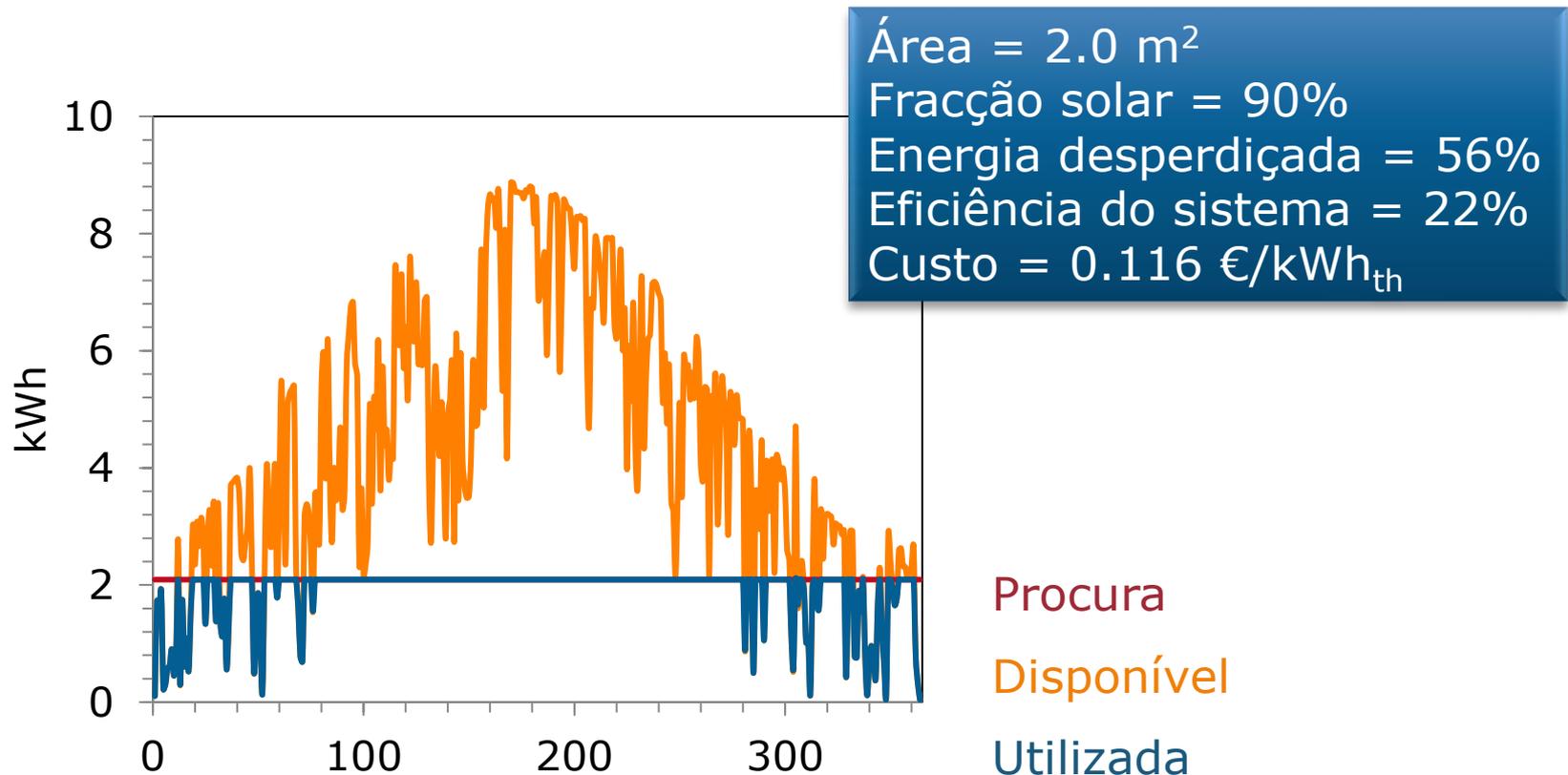
A eficiência depende da procura!

Considere-se uma dada exposição solar, uma eficiência de conversão média de 50% e uma procura típica (60 litros/dia @ 45°C)



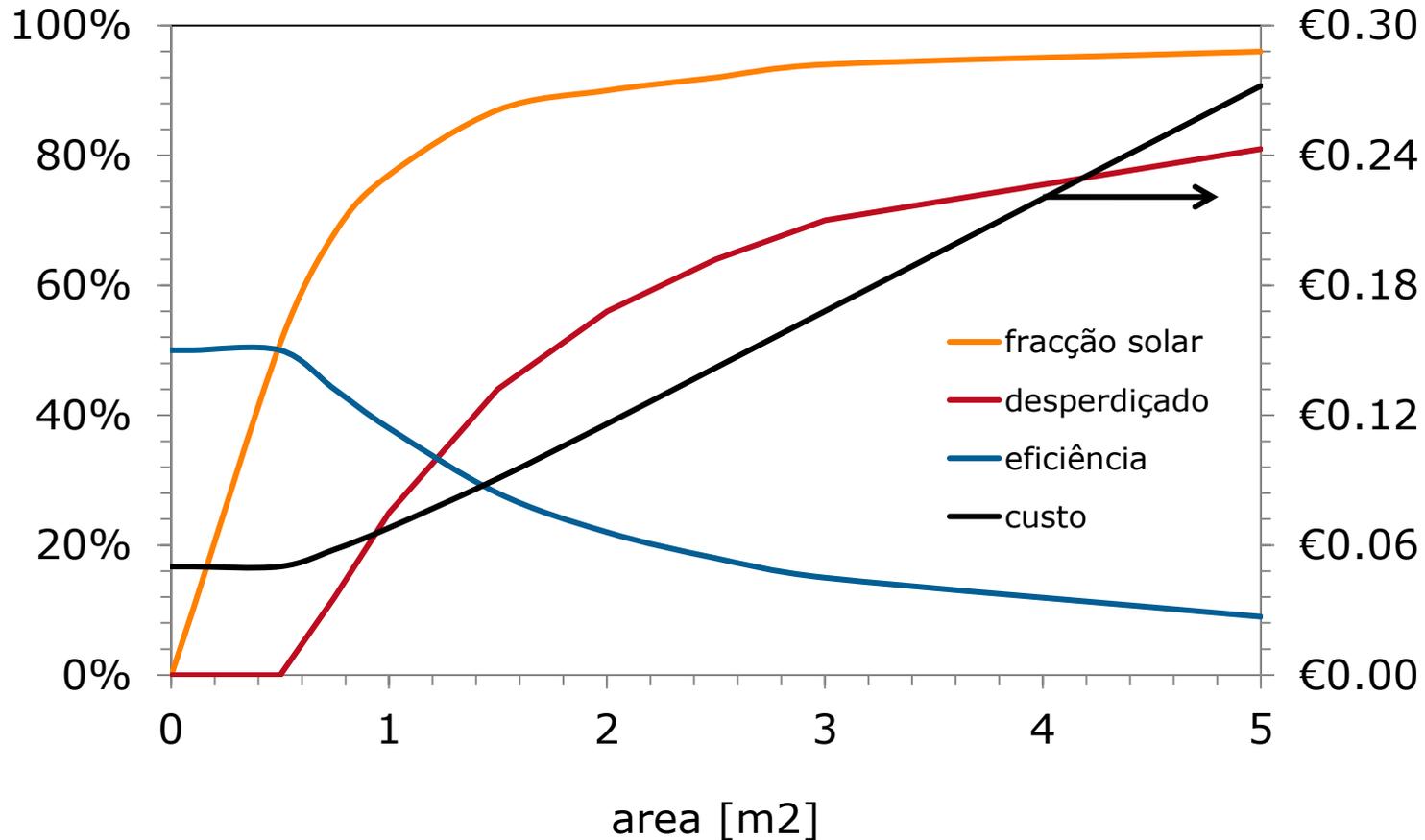
A eficiência depende da procura!

Considere-se uma dada exposição solar, uma eficiência de conversão média de 50% e uma procura típica (60 litros/dia @ 45°C)



A eficiência depende da procura!

Quanto maior o sistema maior a **fracção solar** mas
... mais energia se desperdiça
... menor a eficiência global
... maior o custo da energia utilizada



A stylized sun with a yellow background and a circular center. The center is filled with horizontal stripes in various colors: blue, white, yellow, white, red, white, green, white, blue, white, brown, white, purple, white, and orange. The sun is set against a white background.

Global Market Development
and Trends 2021
Detailed Market Figures 2020

SOLAR HEAT WORLD WIDE

Edition 2022

<https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>

Energia solar térmica cresce, mas “devagar”.

Global solar thermal capacity in operation and annual energy yields 2000-2021

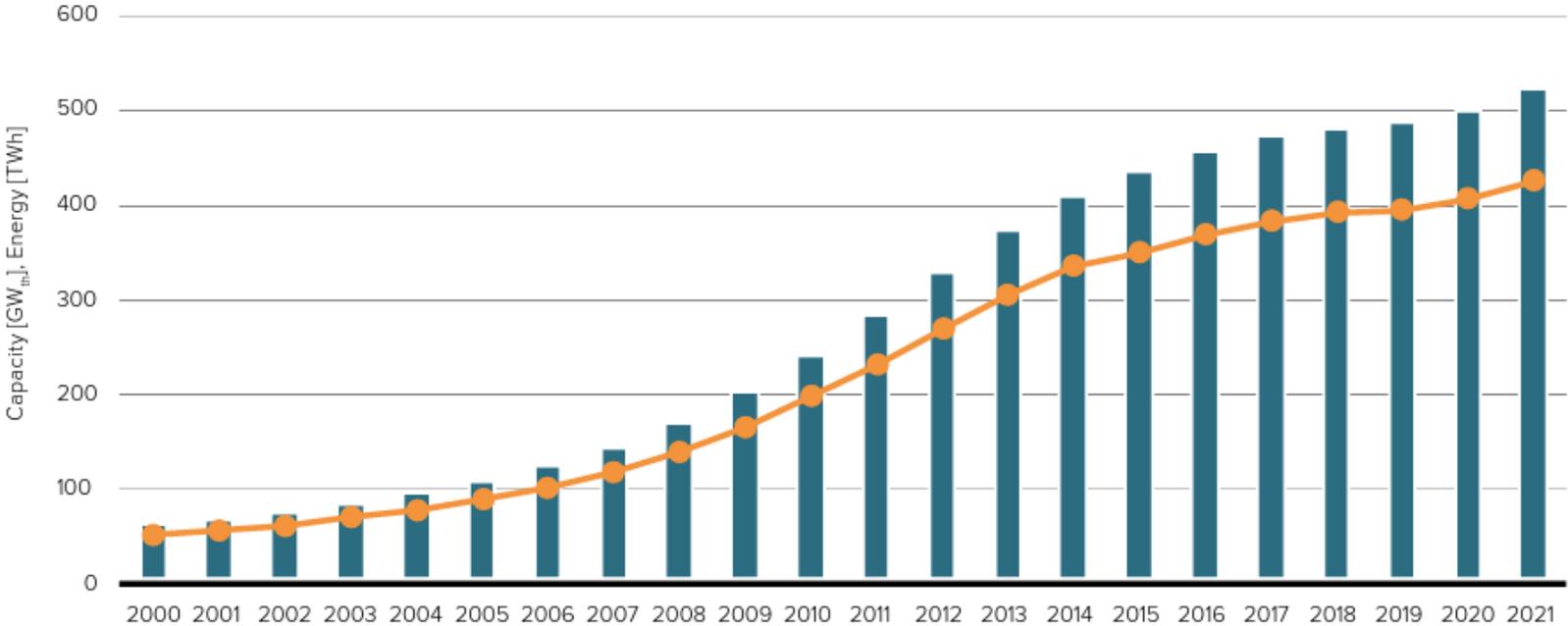


Figure 2: Global solar thermal capacity in operation and annual energy 2000-2021

- Global solar thermal capacity in operation [GW_{th}]
- Global solar thermal energy yield [TWh]

Pico de 2012 reflete competitividade do solar fotovoltaico!

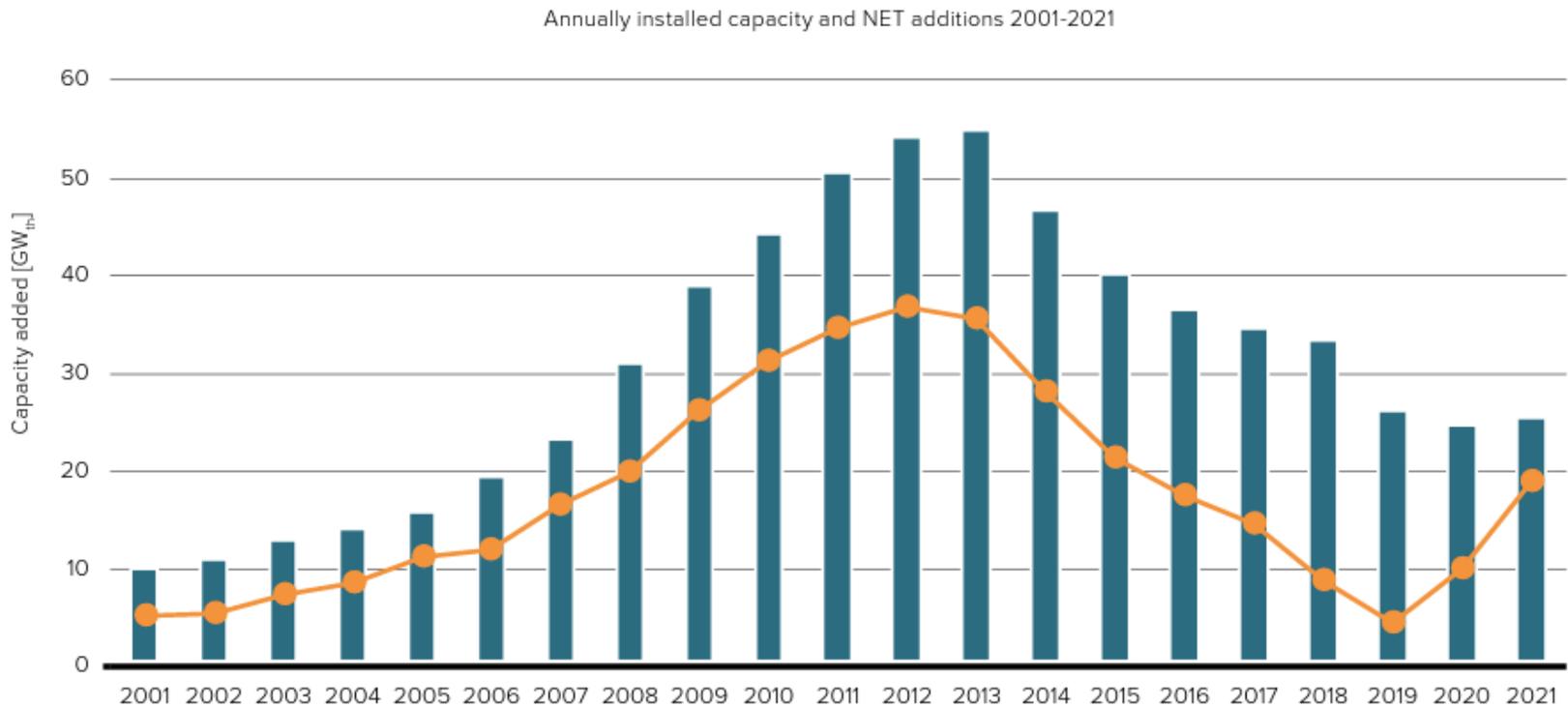


Figure 4: Annual installed collector capacities and the net additions

- Annually installed capacity of water collectors [GW_{th}]
- Water collectors NET additions [GW_{th}]

Mercado chinês determina tendências

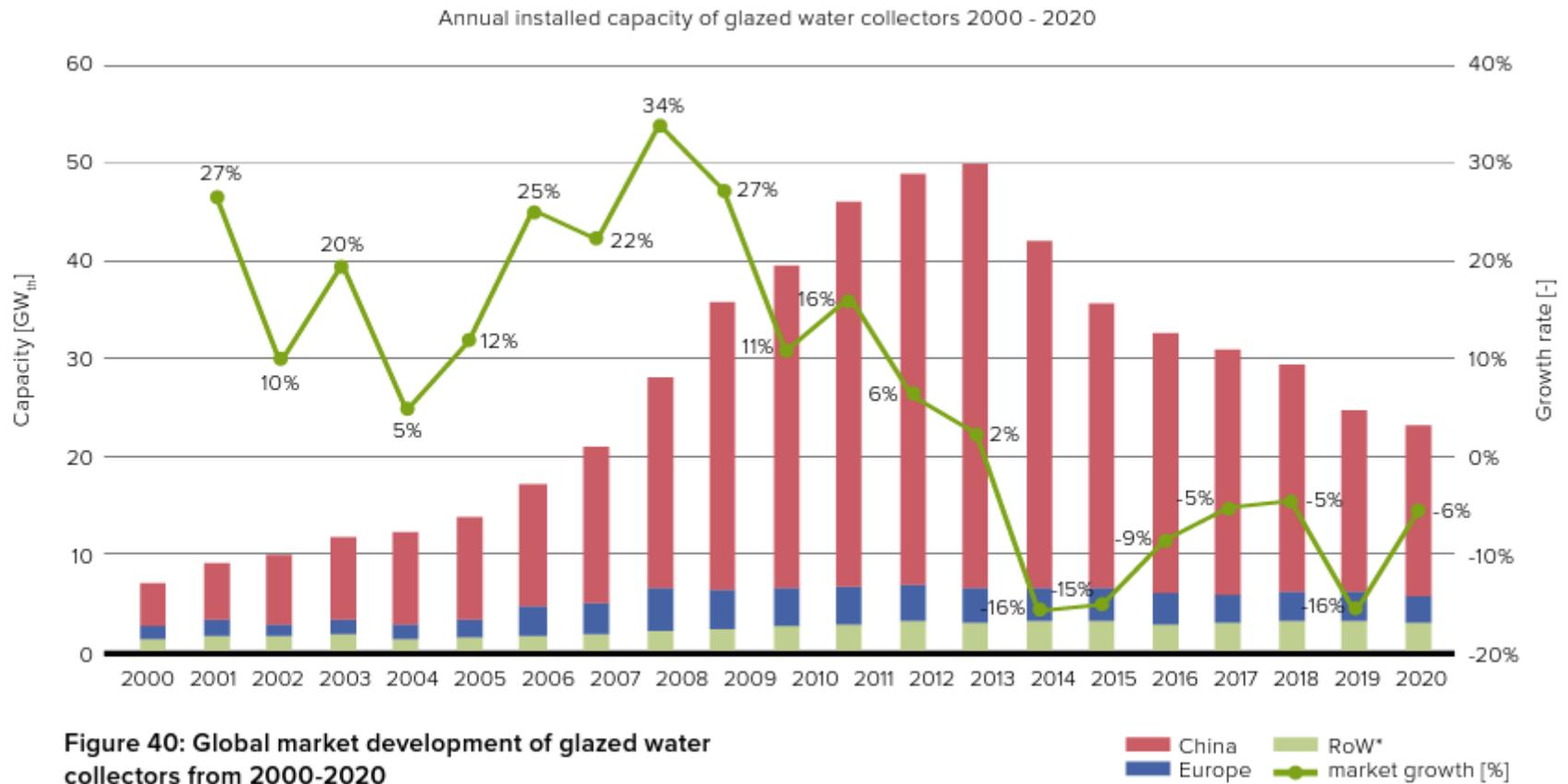


Figure 40: Global market development of glazed water collectors from 2000-2020

$\frac{3}{4}$ dos sistemas solares térmicos instalados no mundo estão na China.

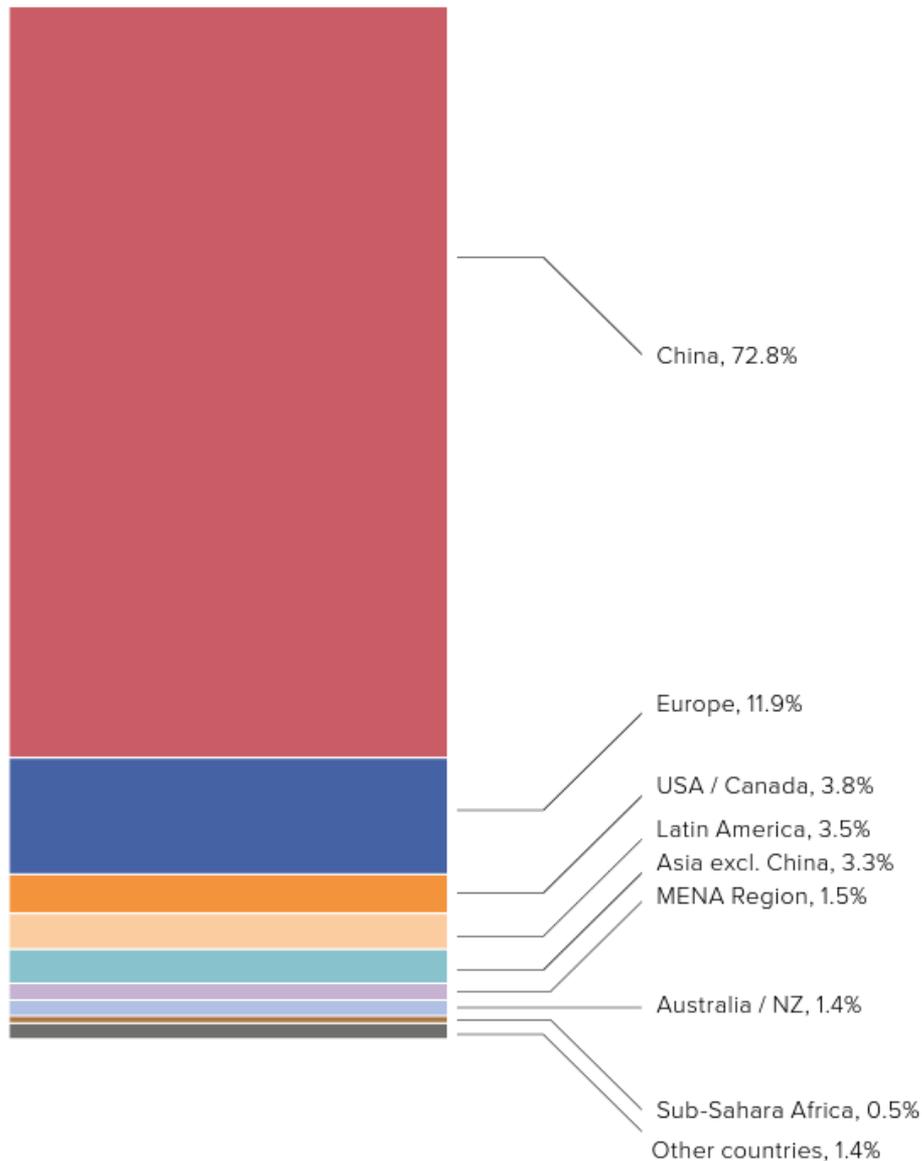
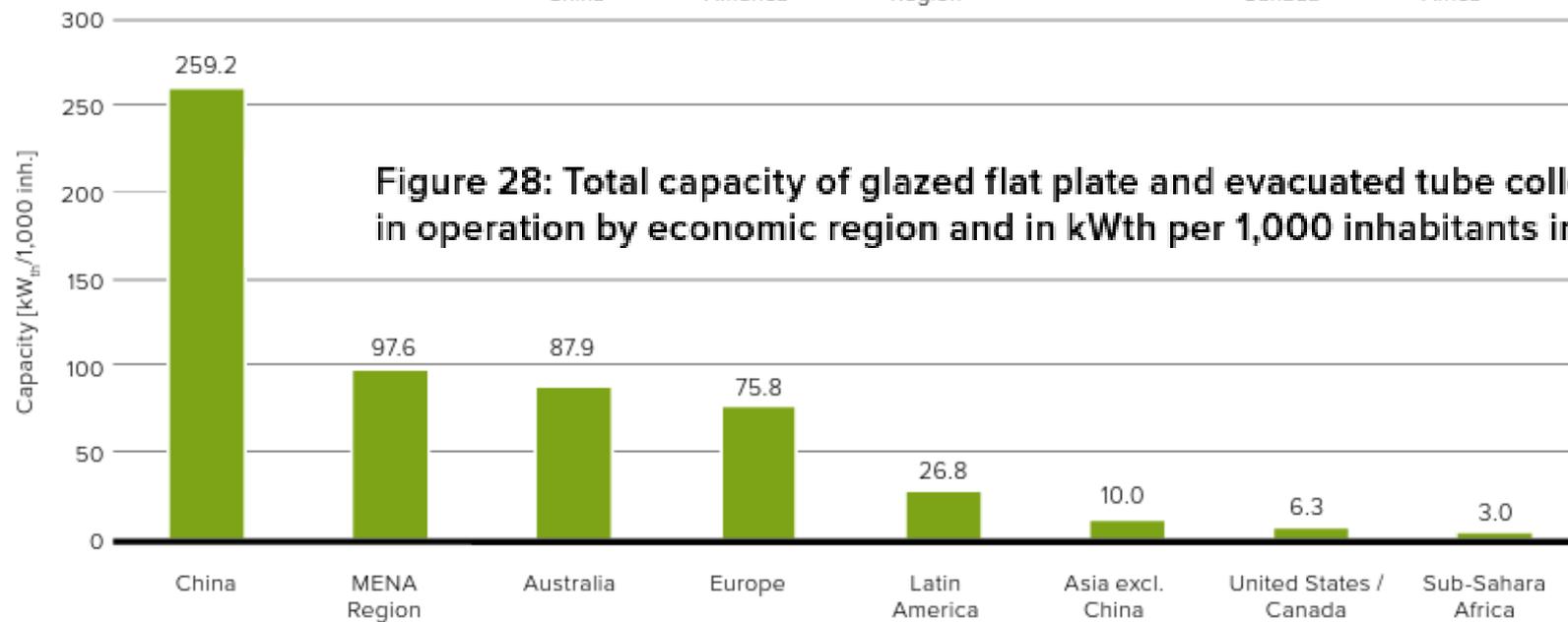
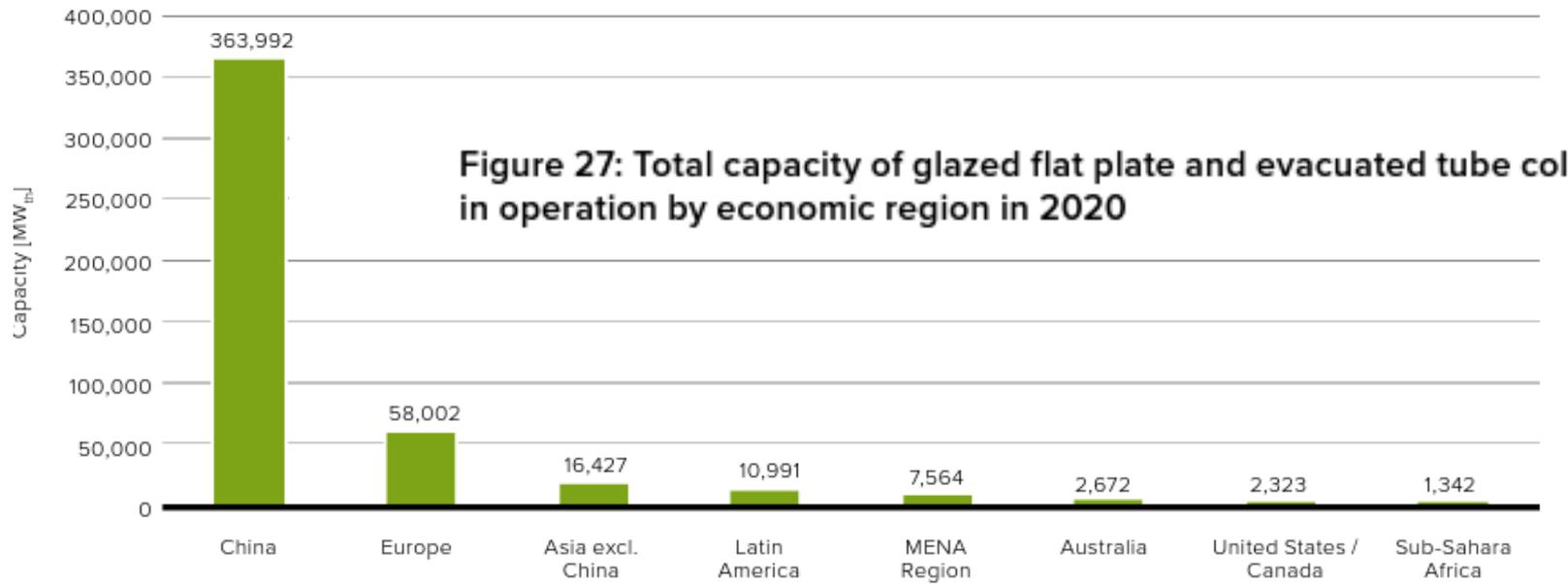


Figure 18: Share of the total installed capacity in operation (glazed and unglazed water and air collectors) by economic region in 2020



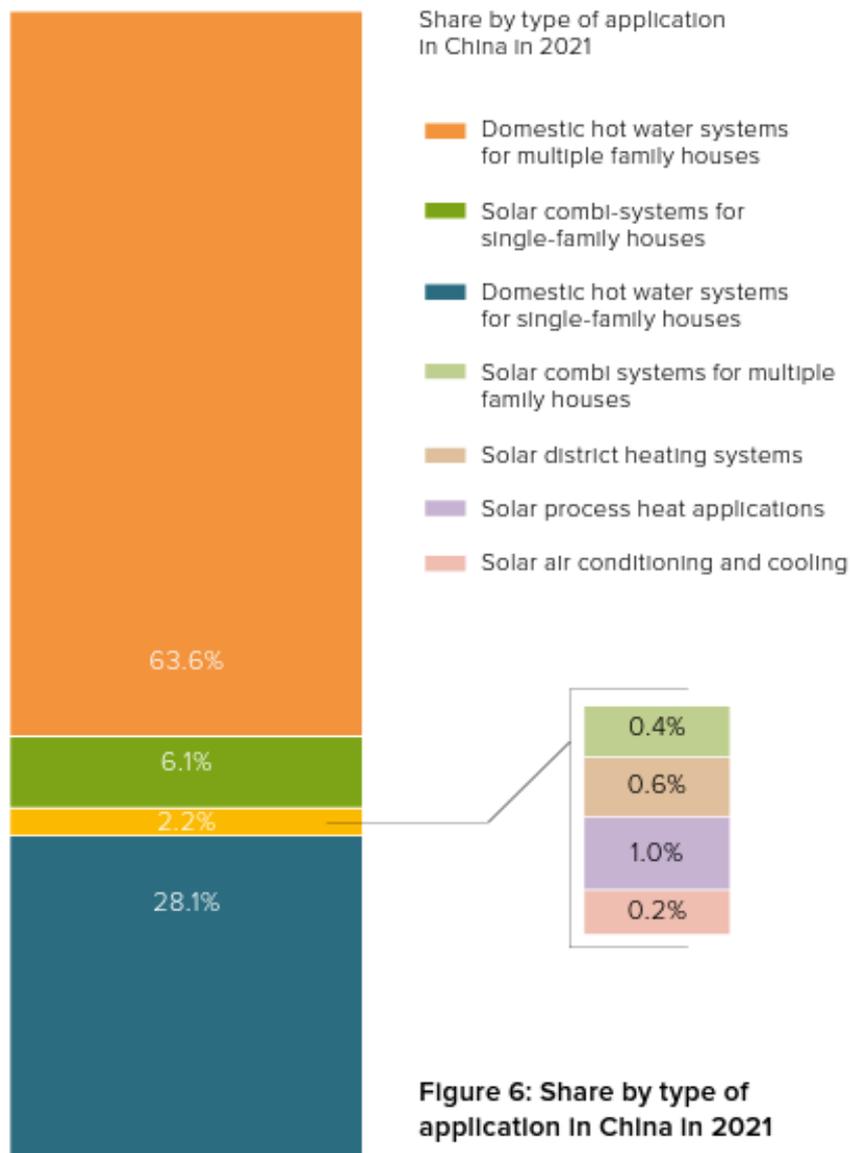


Figure 6: Share by type of application in China in 2021

Aplicações mais populares:
Sistemas aquecimento de
água para apartamentos
(2/3) e casas unifamiliares
(1/3).

Todas as outras aplicações
são residuais!

Sistemas com circulação estão a tornar-se dominantes (na China)

Distribution by type of system for installed glazed water collector capacity from 2006 to 2021 in China

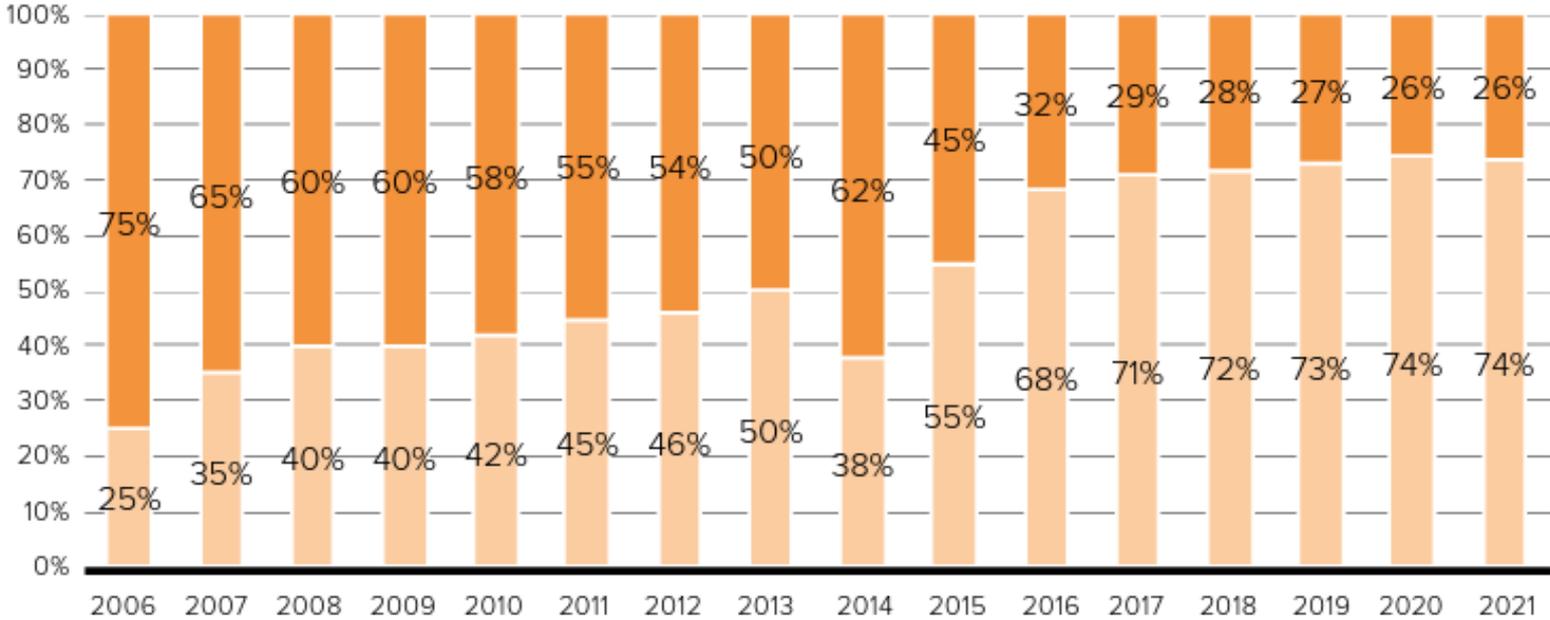
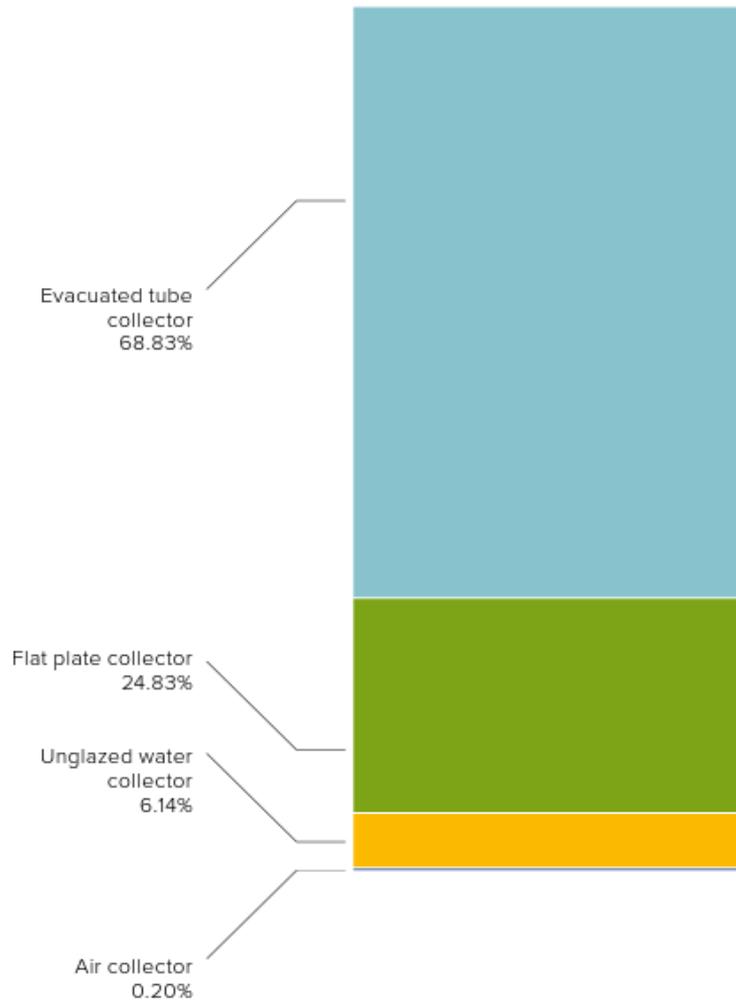


Figure 5: Distribution by type of system for installed glazed water collector capacity from 2006 to 2021 in China

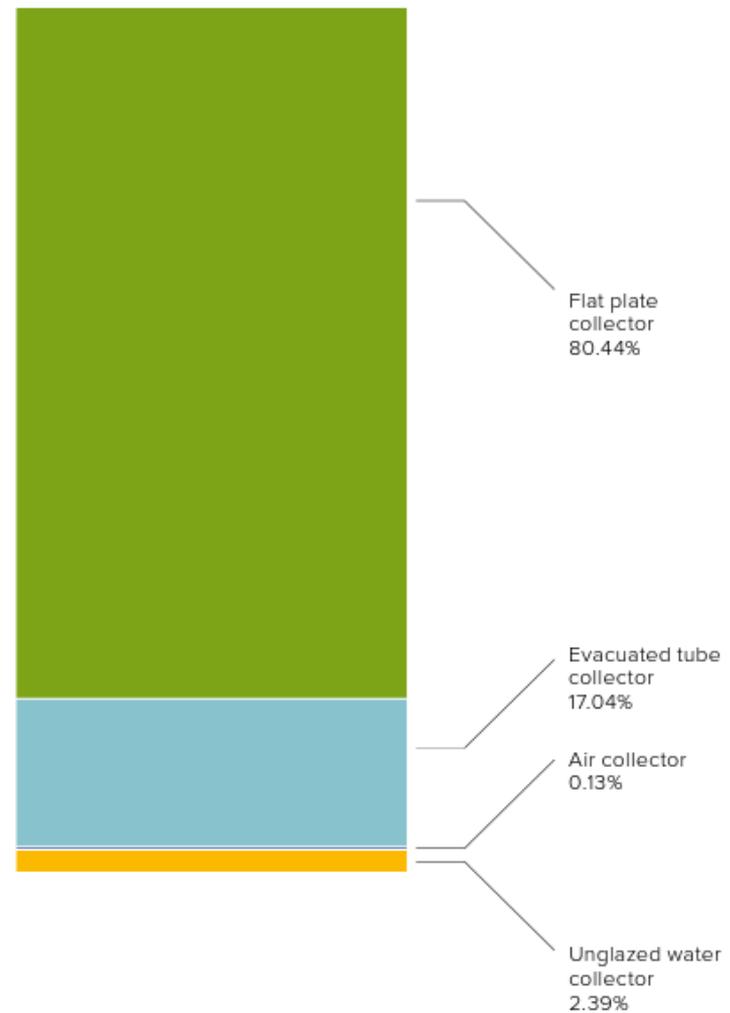
- Pumped solar heating systems
- Thermosiphon solar heating systems

Tubos de vácuo são os mais populares (na China)

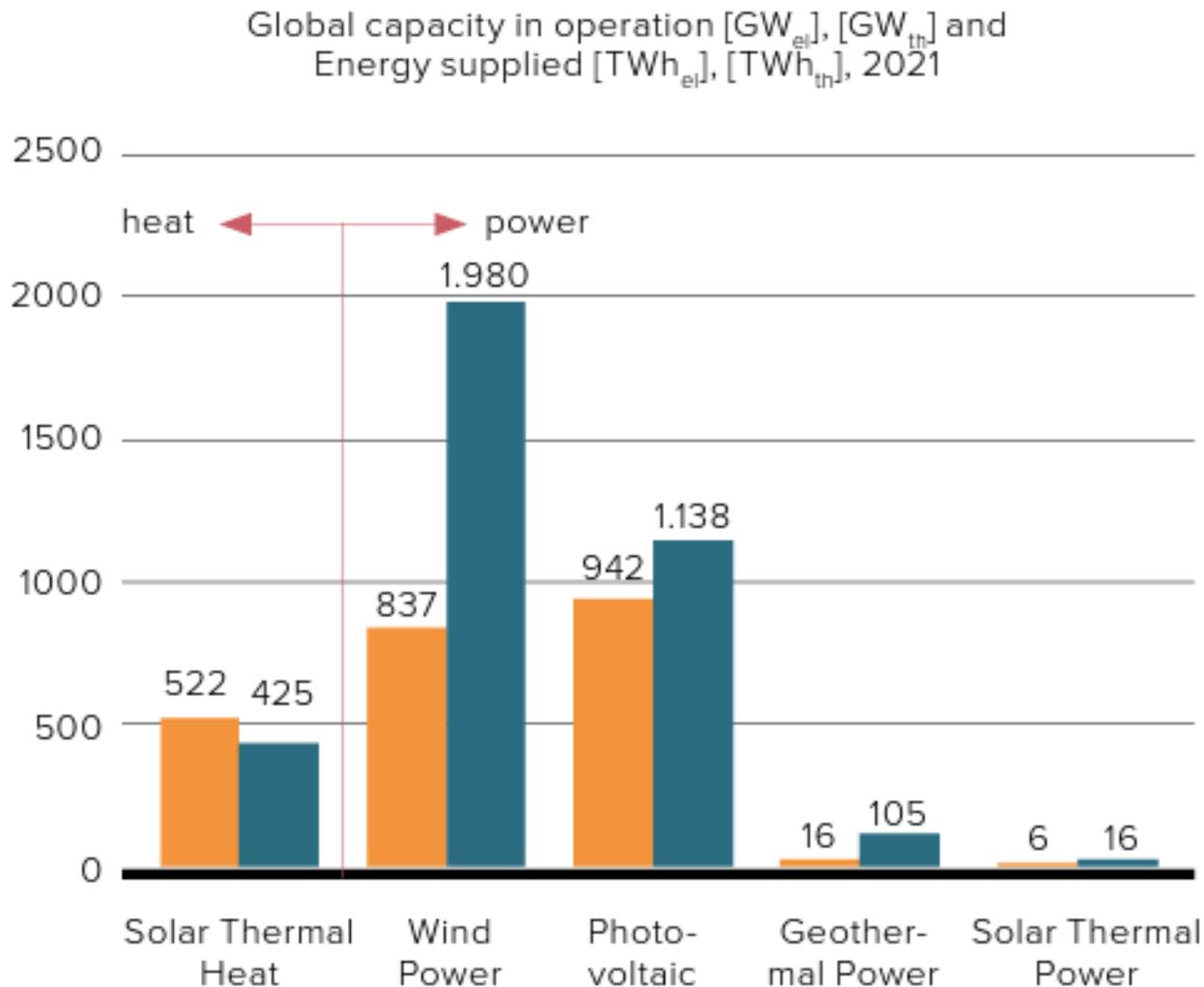
Distribution of the total installed capacity in operation by collector type in 2020 - WORLD



Distribution of the total installed capacity in operation by collector type in 2020 - EUROPE



Ainda que com crescimento mais lento, solar térmico é relevante

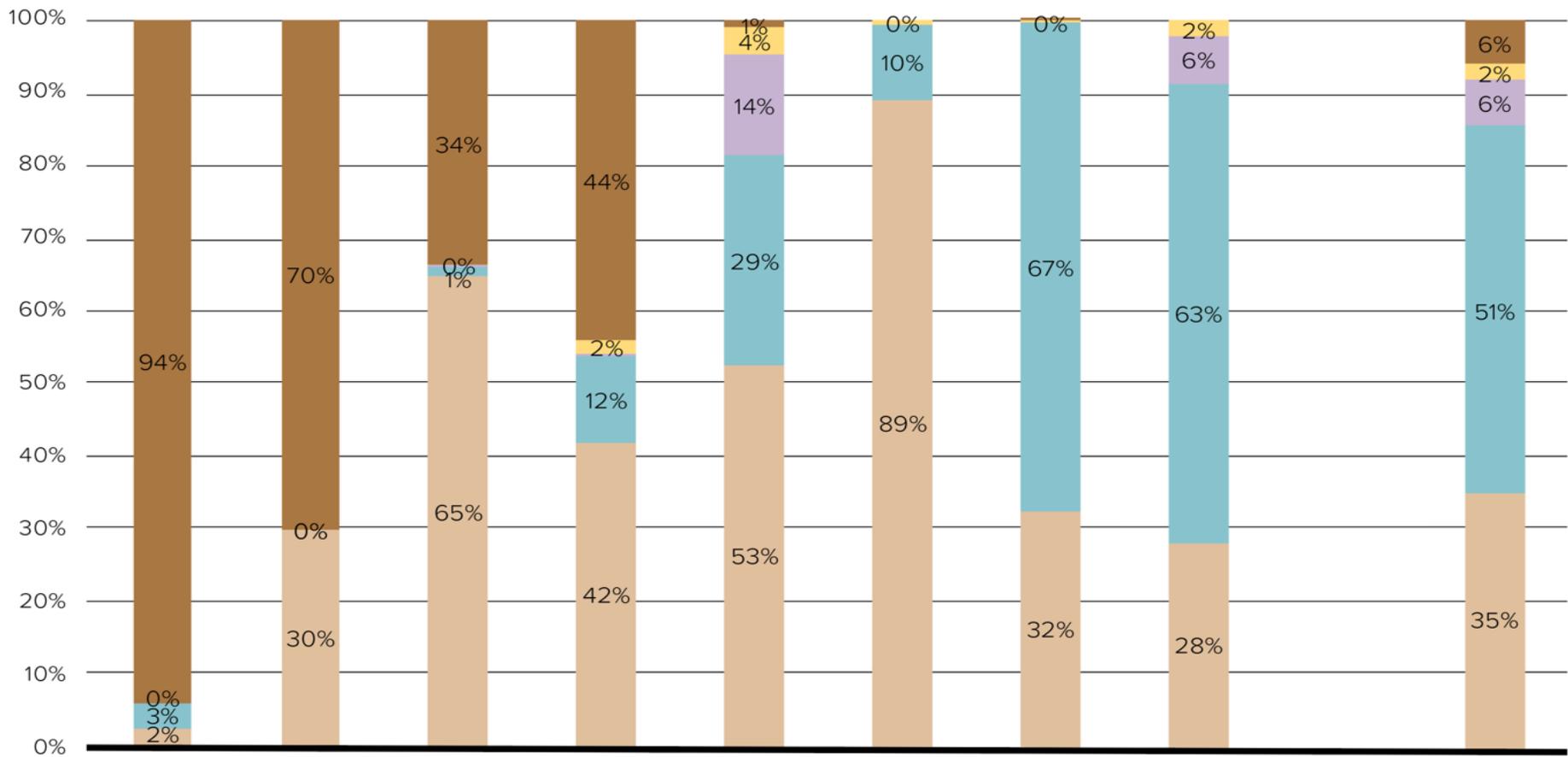


Outras aplicações:

Three top markets

		1	2	3
Solar district heating New additions 2021 [MW _{th}]		China	France	Denmark
Solar industrial heat New additions 2021 [MW _{th}]		China	France	Mexico
PVT systems Total in operation 2021 [MW _{th} / MW _{peak}]		France	South Korea	China
Solar air heating systems Total in operation at the end of 2020 [MW _{th}]		Canada	Australia	Japan
Swimming pool heating Total in operation 2020 [MW _{th}]		USA	Brazil	Australia

Distribution of solar thermal systems by application for the newly installed water collector capacity by economic region in 2020



- Swimming pool heating
- Other (solar district heating, solar processheat, solar cooling)
- Solar combi-systems (DHW and space heating for single-family and multi-family houses)
- Large DHW systems (multi-family houses, tourism and public sector)
- Domestic hot water systems for single-family houses

Sub-Sahara Africa: Botswana, Burkina Faso, Ghana, Kenya, Lesotho, Mauritius, Mozambique, Namibia, Senegal, South Africa, Zimbabwe

Asia w/o China: Bhutan, India, Japan, South Korea, Taiwan Thailand

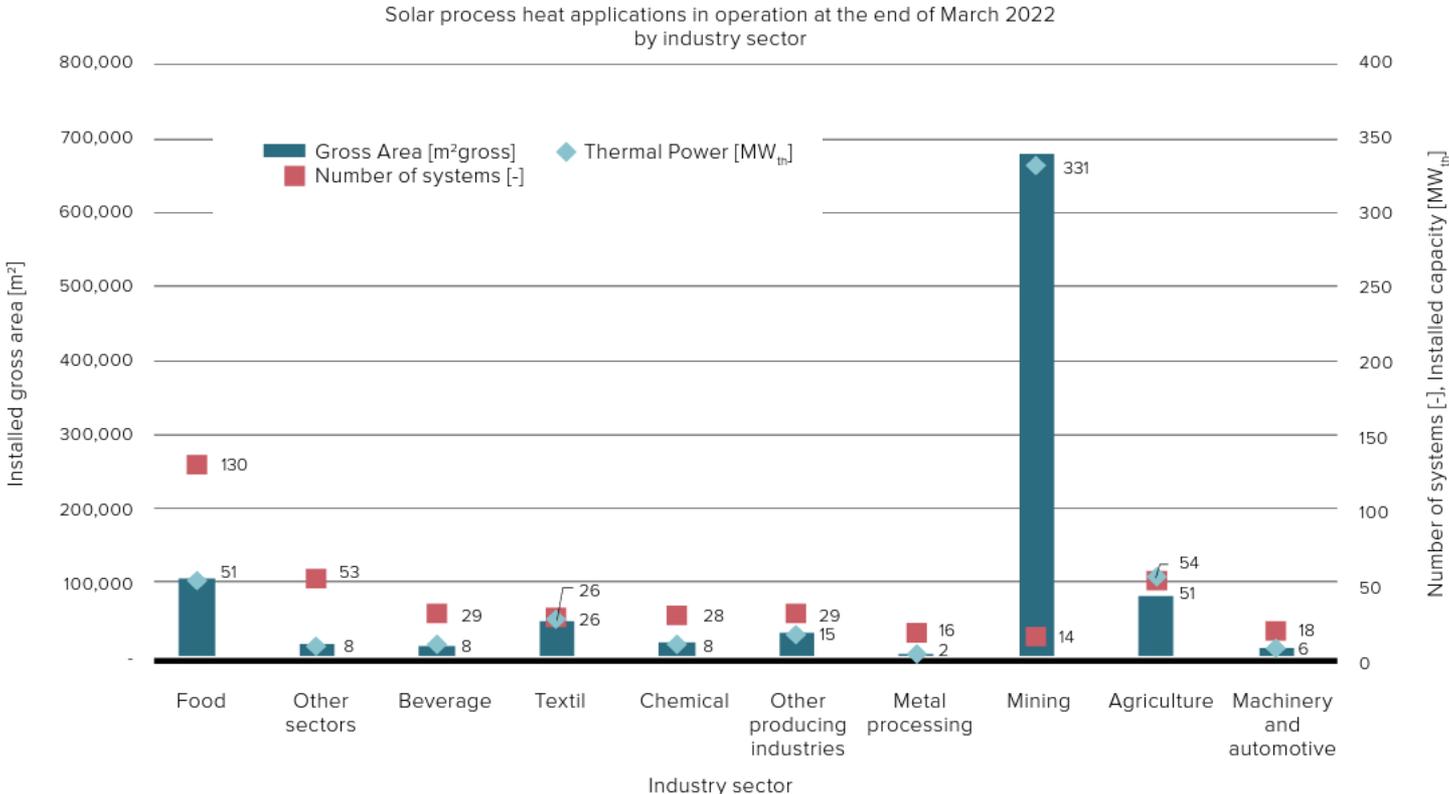
Latin America: Argentina, Barbados, Brazil, Chile, Mexico, Uruguay

Europe: EU 27, Albania, North Macedonia, Norway, Russia, Switzerland, Turkey, United Kingdom

MENA countries: Israel, Jordan, Lebanon, Morocco, Palestinian Territories, Tunisia

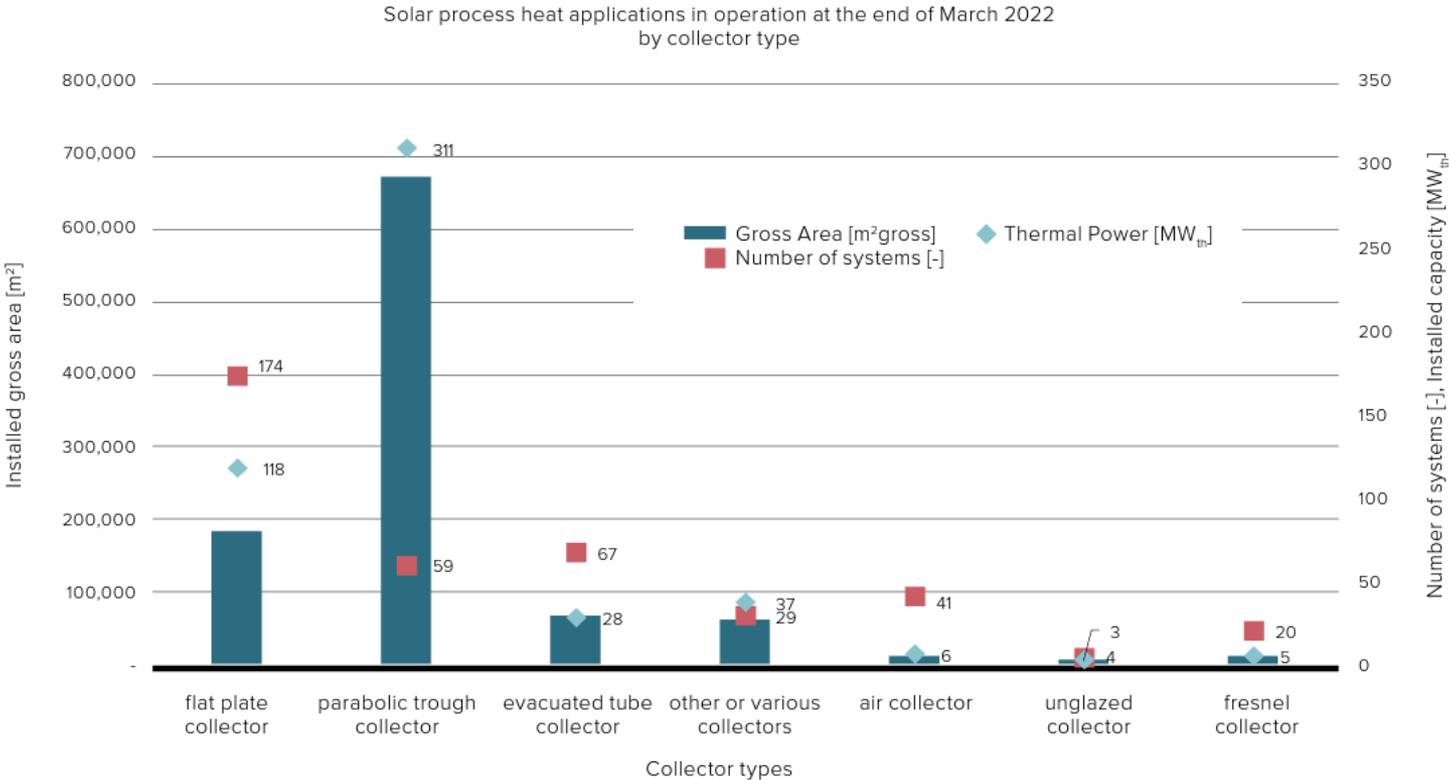
Outras aplicações: para a indústria (mineira)

Figure 13: Solar process heat applications in operation worldwide at the end of March 2022 by industry sector
 (Source: IEA SHC Task64/IV SHIP database)



Outras aplicações: para a indústria

Figure 12: Solar process heat applications in operation at the end of March 2022 by collector type
 (Source: IEA SHC Task49/IV SHIP database)



Outras aplicações: 'aquecimento urbano'

"Europa" quer dizer quase exclusivamente DINAMARCA e ALEMANHA

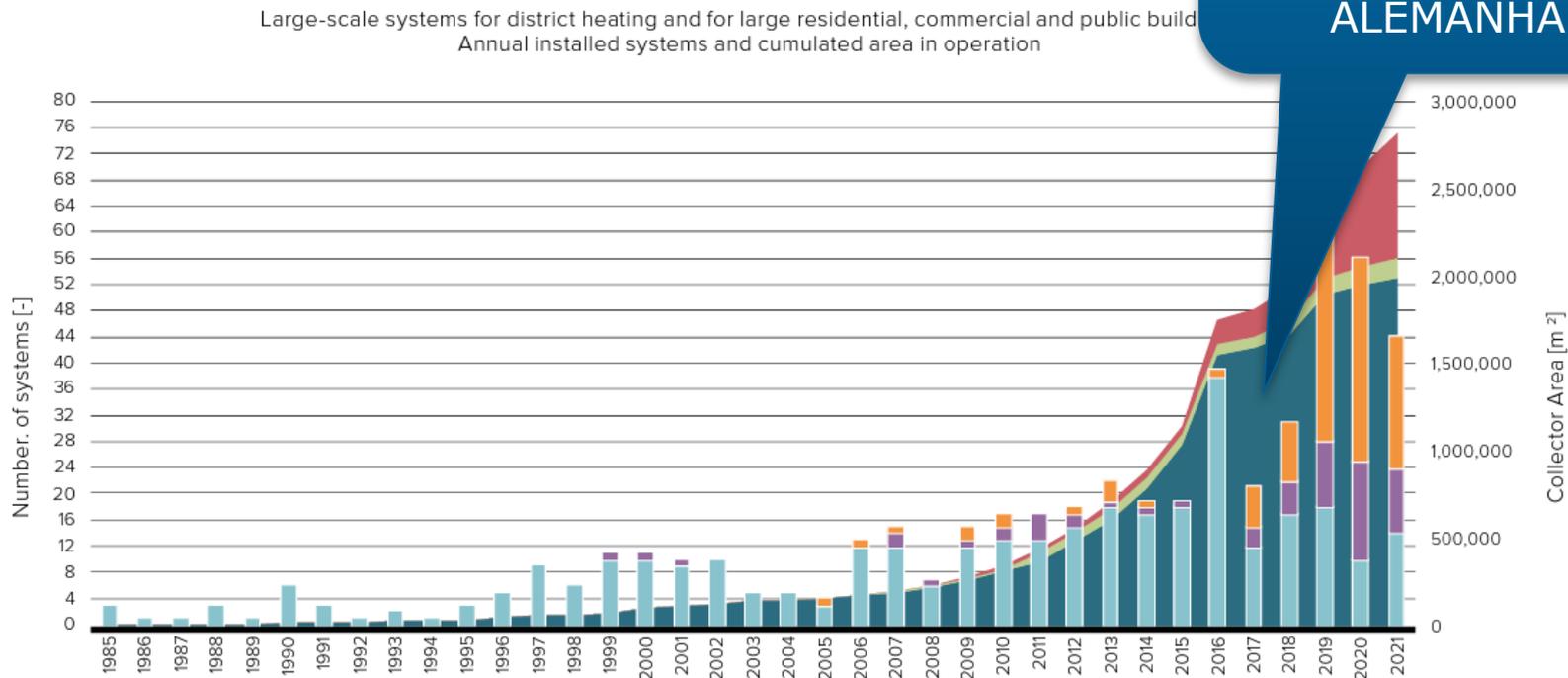
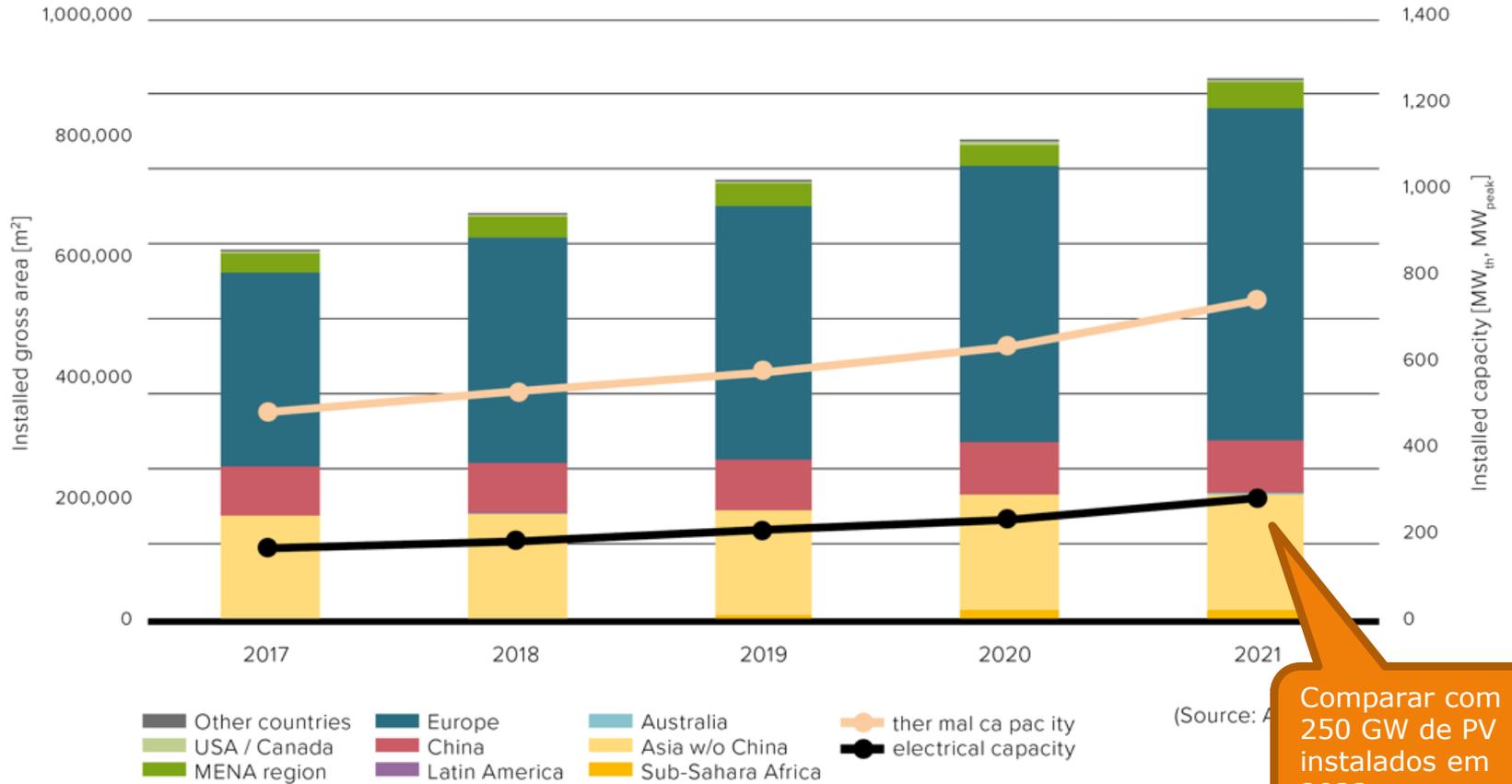


Figure 8: Large-scale systems for solar district heating and large residential, commercial and public buildings worldwide – annual achievements and cumulated area in operation in 2021

(Data sources: Daniel Trier - PlanEnergi, DK, Jan-Olof Dalenbäck - Chalmers University of Technology, SE, Sabine Putz - IEA SHC Task 55, AT, Bärbel Epp - solrico.com/, DE, AEE INTEC, AT, Janusz Starościk - SPIUG, PL, Zheng Ruicheng, China Academy of Building Research, CHN).

- Cumulated collector area in operation in Europe [m²]
- Cumulated collector area in operation in China [m²]
- Cumulated collector area in operation "Other countries" [m²]
- Number of systems installed in Europe [-]
- Number of systems installed in "Other countries" [m²]
- Number of systems installed in China [-]

Global market development of PVT collectors from 2017 to 2021



(Source: A

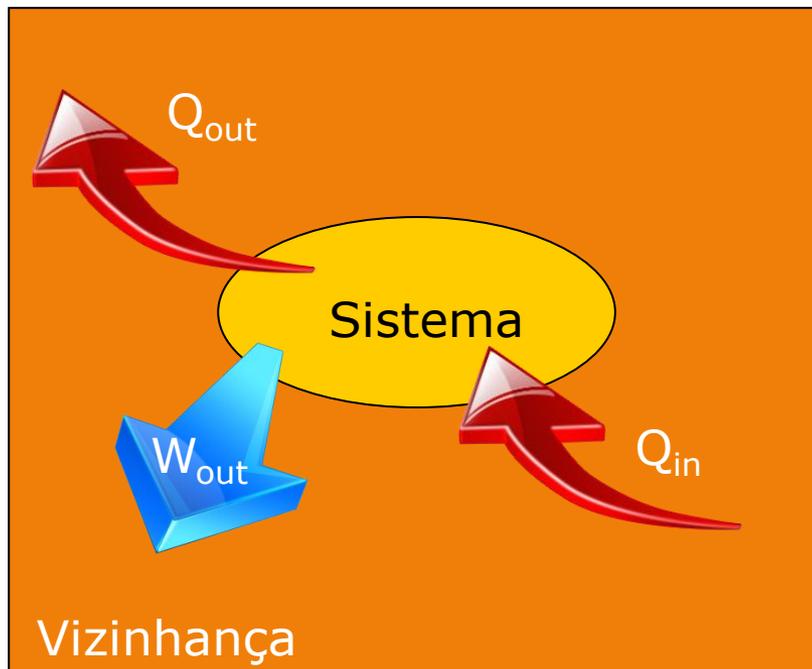
Comparar com 250 GW de PV instalados em 2022

Produção
electricidade
por via térmica
a partir de
radiação solar

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Como calculo o rendimento de uma máquina deste tipo?

O rendimento é sempre calculado da mesma maneira:



$$\eta = \frac{\text{o que obtenho}}{\text{o que pago}}$$

$$\eta = \frac{W_{out}}{Q_{in}}$$

Produção de electricidade com uma máquina térmica

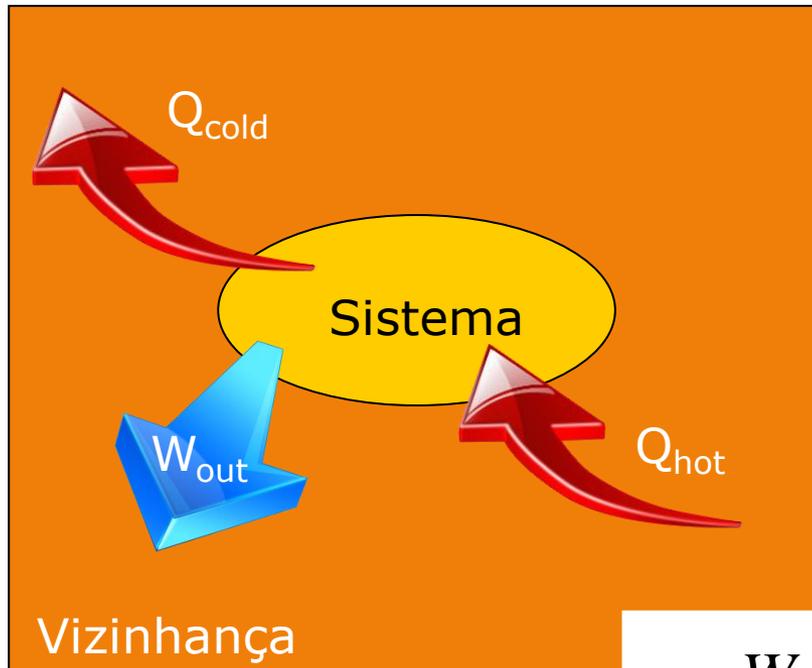
Como calculo o rendimento de uma máquina deste tipo?

$$Q_{hot} = W_{out} + Q_{cold}$$

$$\frac{Q_{hot}}{T_{hot}} \leq \frac{Q_{cold}}{T_{cold}}$$

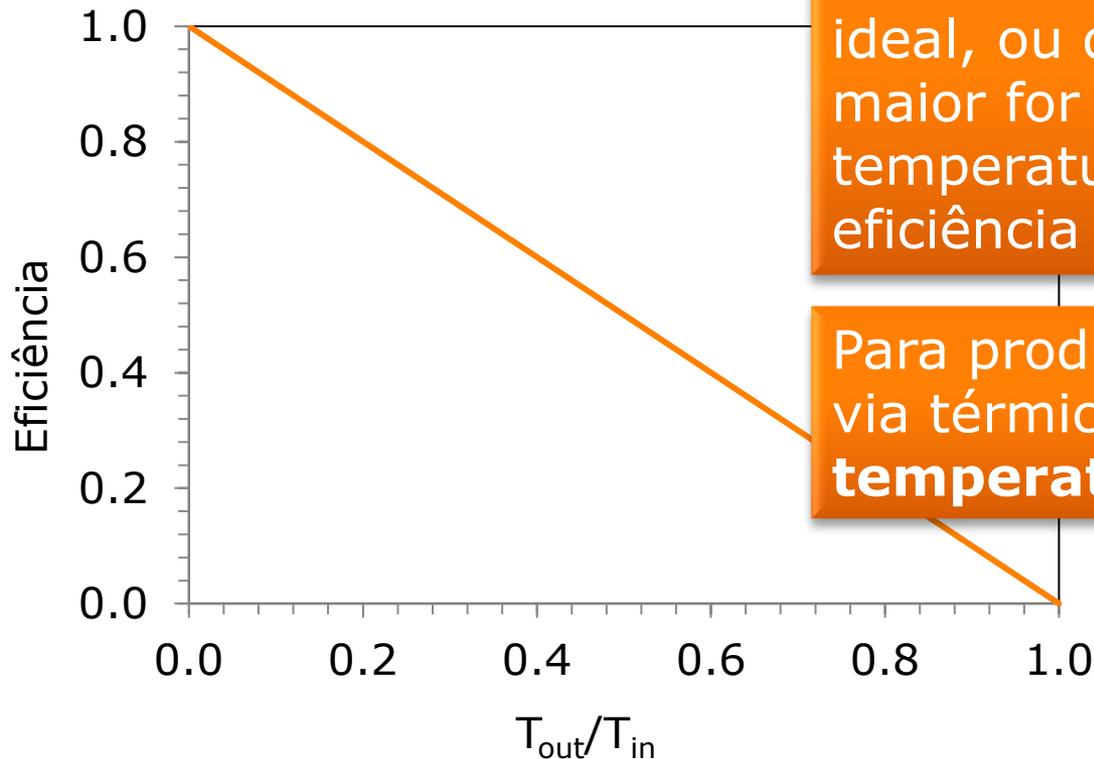
$$W_{out} = Q_{hot} - Q_{cold}$$

$$\frac{T_{cold}}{T_{hot}} \leq \frac{Q_{cold}}{Q_{hot}}$$



$$\eta = \frac{W_{out}}{Q_{hot}} = \frac{Q_{hot} - Q_{cold}}{Q_{hot}} = 1 - \frac{Q_{cold}}{Q_{hot}} \leq 1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}}$$

Produção de electricidade com uma máquina térmica



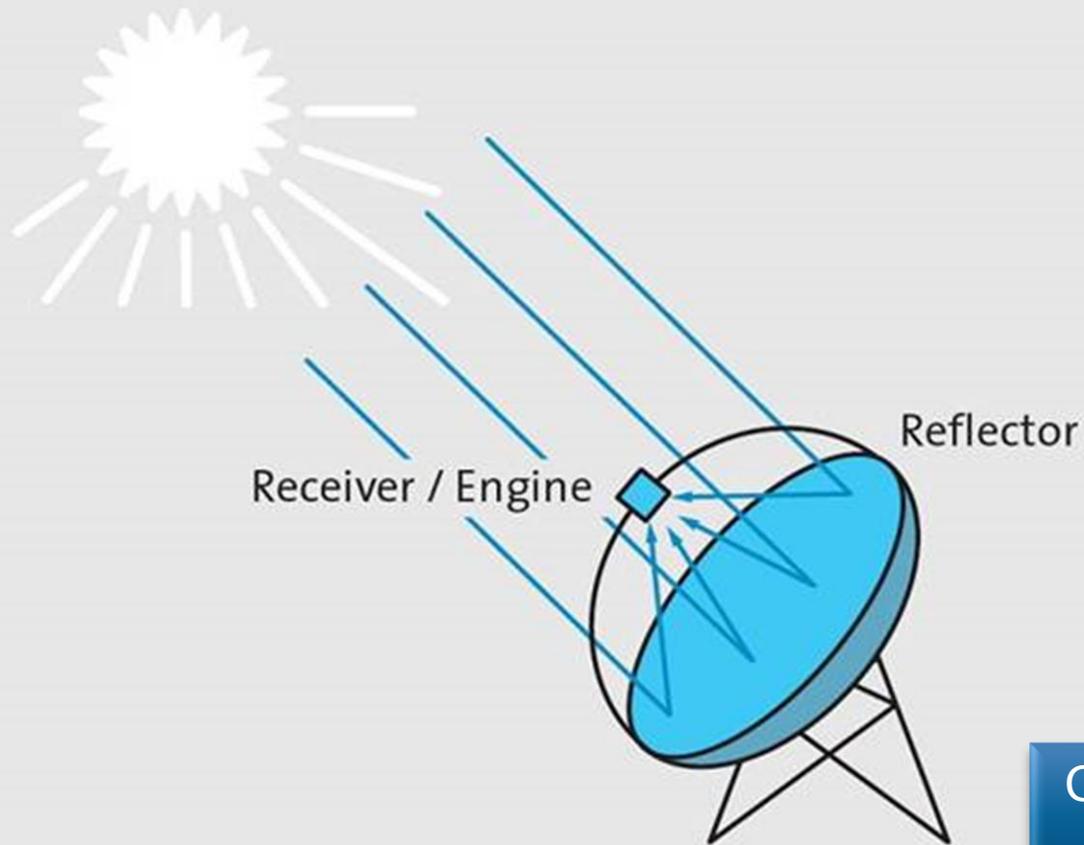
Para uma máquina térmica ideal, ou de Carnot, quanto maior for a diferença de temperatura maior será a eficiência

Para produzir electricidade por via térmica precisamos de **temperaturas elevadas.**

$$\eta = \frac{W_{out}}{Q_{hot}} = \frac{Q_{hot} - Q_{cold}}{Q_{hot}} = 1 - \frac{Q_{cold}}{Q_{hot}} \leq 1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}}$$

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar



Concentradores
parabólicos
pontuais

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar



Diâmetro: 8.5m ($\sim 57\text{m}^2$)

Distância focal: 4.5m

Factor de concentração: 2500

Temperatura do fluido (hélio): 650°C

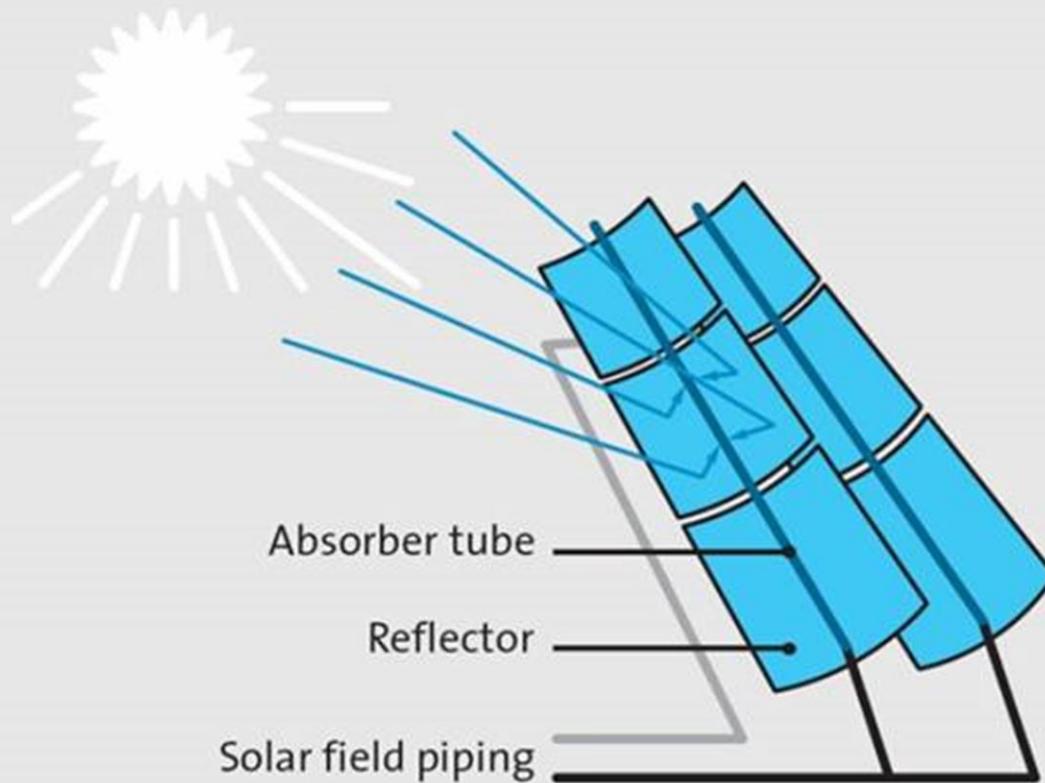
Pressão: 20-150bar

Potência eléctrica: 8.4kW

Concentradores
parabólicos
pontuais

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar



Concentradores
parabólicos
lineares

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar



Concentradores
parabólicos
lineares

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar



Área ocupada: 1,62 km²

760 linhas de reflectores

184 000 espelhos

Temperatura do fluido: 400°C,

Máquina vapor, ciclo Rankine

Recurso solar: 2606 kWh/(m²ano)

Superfície colectora: 357200m²

Produção eléctrica: 134000MWh/ano

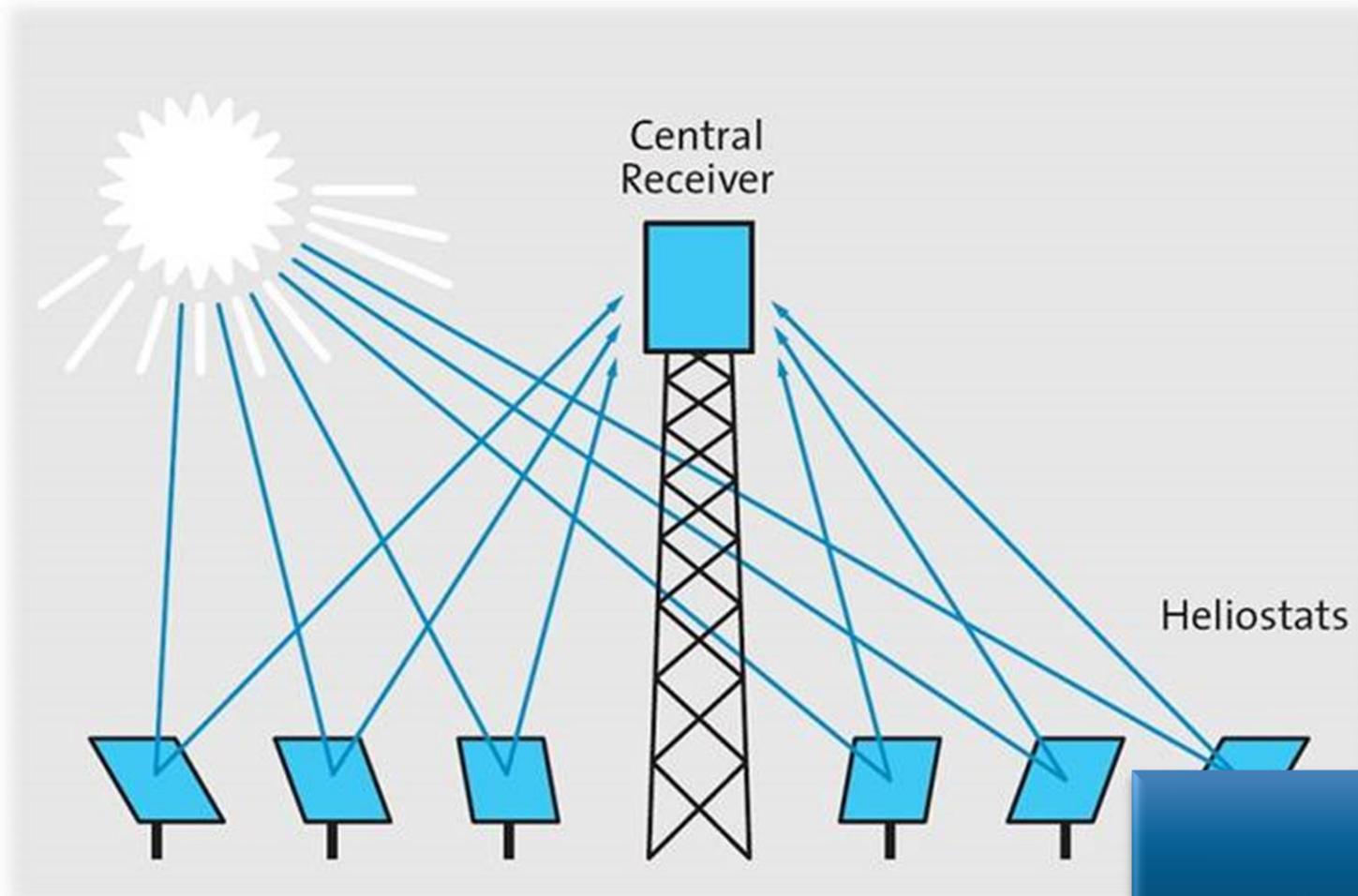
Tempo armazenagem: 0.5h

Custo: 266 M US\$

Concentradores
parabólicos
lineares

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar



Torres
solares
com heliostato

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar

Área ocupada: 60 hectares

624 superfícies reflectoras com 120 m²

Superfície reflectora total: 75 000 m²

Temperatura do fluido: 250°C,

Máquina vapor, ciclo Rankine

Eficiência solar-eléctrica: 17%

Capacidade armazenamento: 1h

Produção eléctrica: 24.3GWh/ano

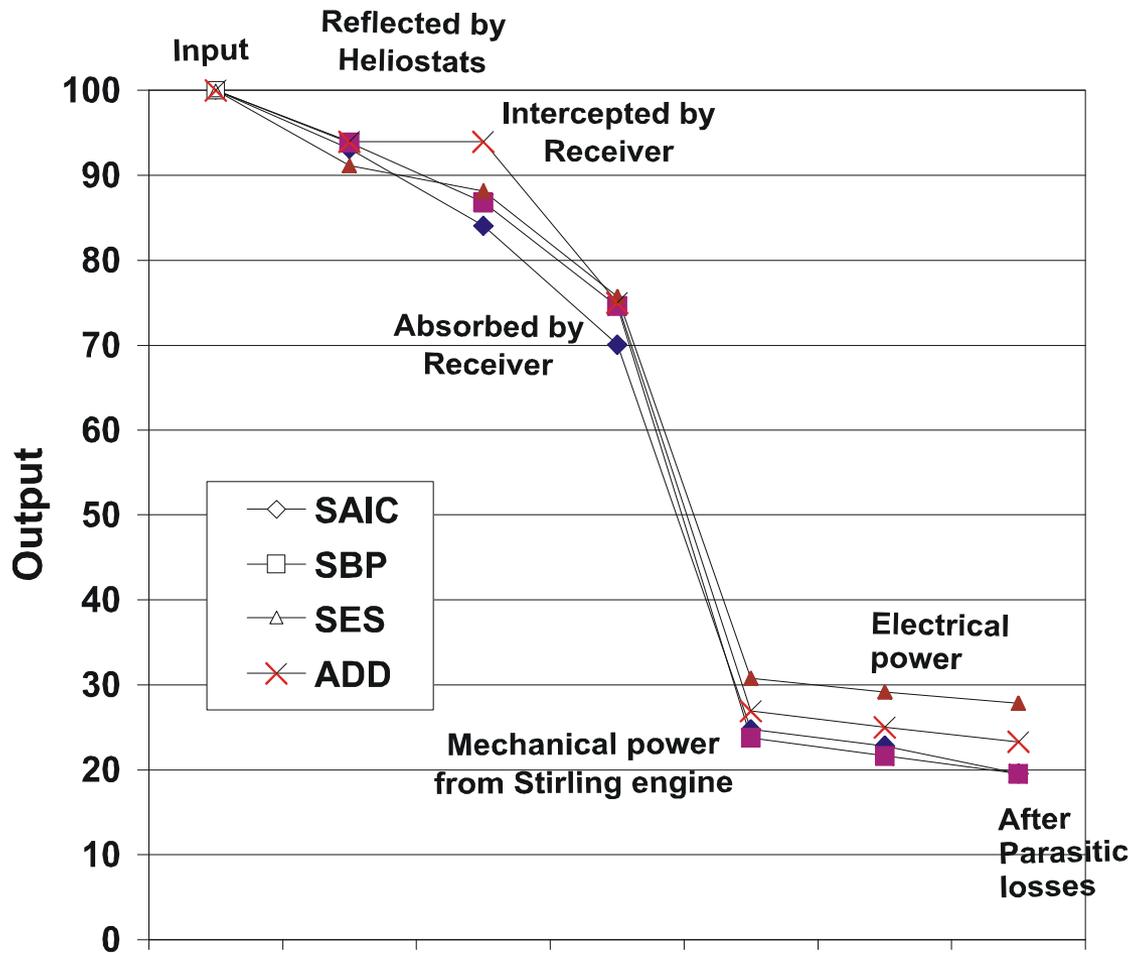
Custo: 35 M€



Torres
solares
Com heliostato

Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar



Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar

Vantagens importantes:

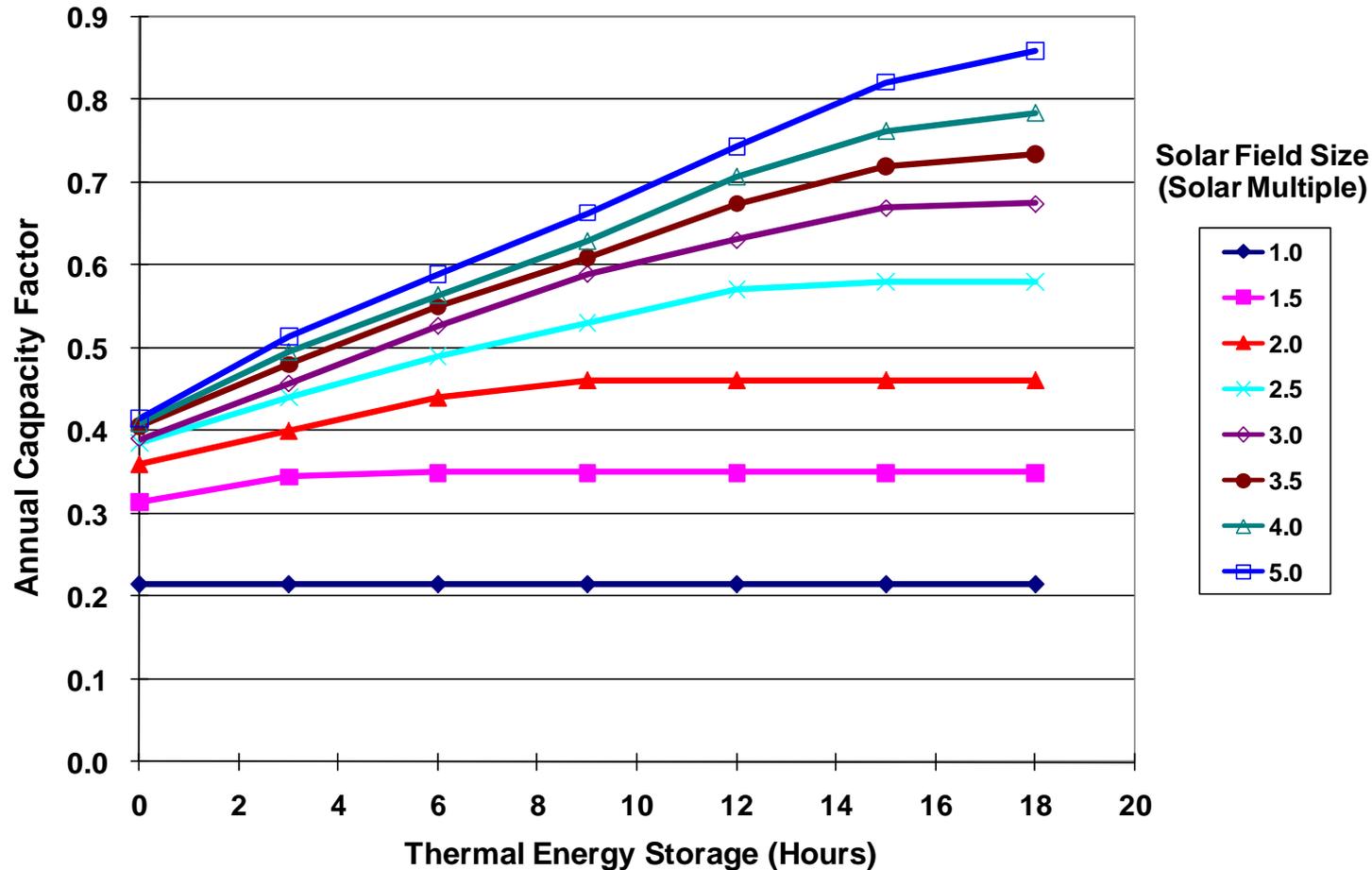
- Armazenamento de energia

Desvantagens relevantes:

- Só se aproveita a componente directa da radiação
- Seguimento solar

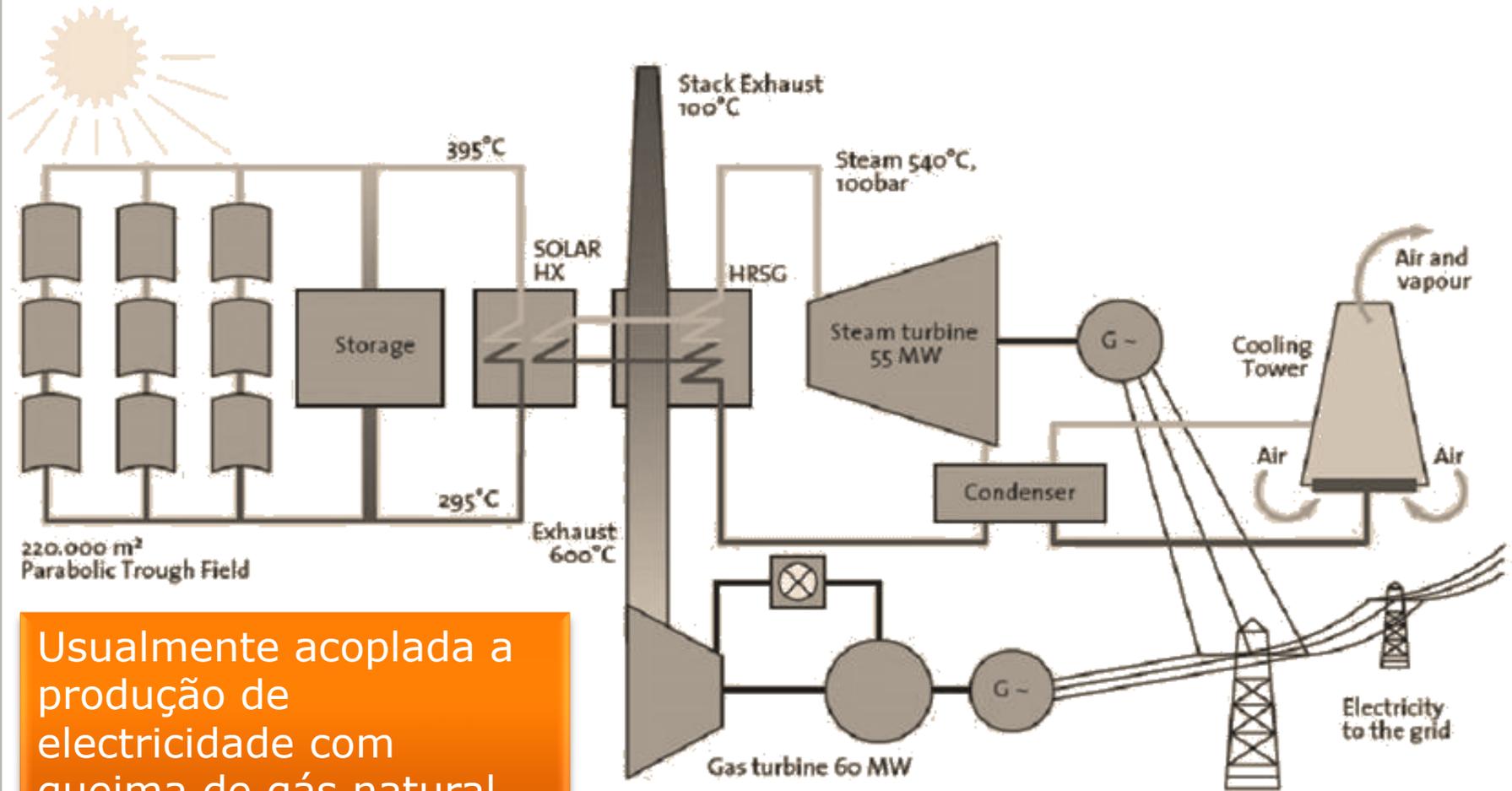
Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar



Produção de electricidade com uma máquina térmica

Com concentração de radiação solar

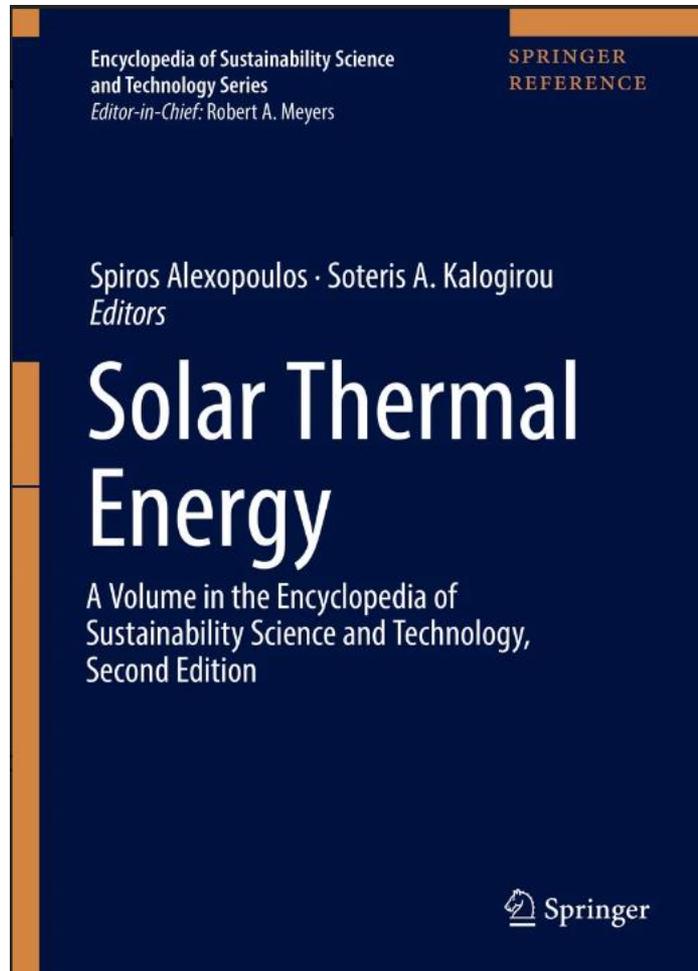


Usualmente acoplada a produção de electricidade com queima de gás natural

Tipo de colector	Temperatura °C	concentração	η
Colector plano (AQS)	30 - 80	1	30%
Colector tubos de vazio (AQS)	50 - 200	1	30%
Concentrador parabólico linear	60 - 250	15 - 45	14%
Concentrador parabólico pontual	100 - 500	100 - 1000	15%
Torre	150 - 2000	100 - 1500	17%

η = energia útil final/energia incidente

Considera-se a área colectora e não a área de implementação;
a diferença é um factor x10



<https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-1-0716-1422-8>