

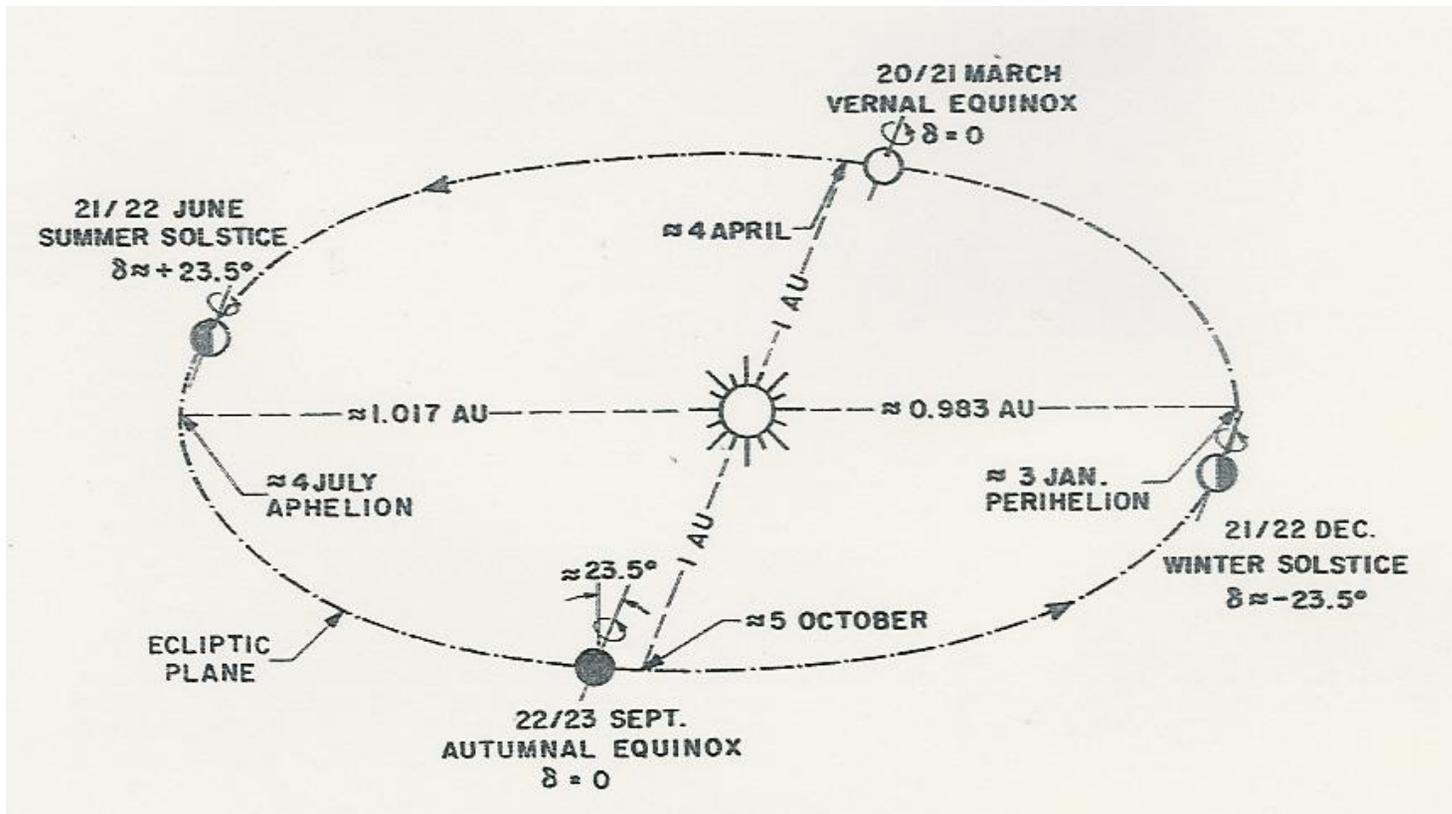
Energia solar para aquecimento de águas

**Notas das aulas da disciplina
de
EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS**

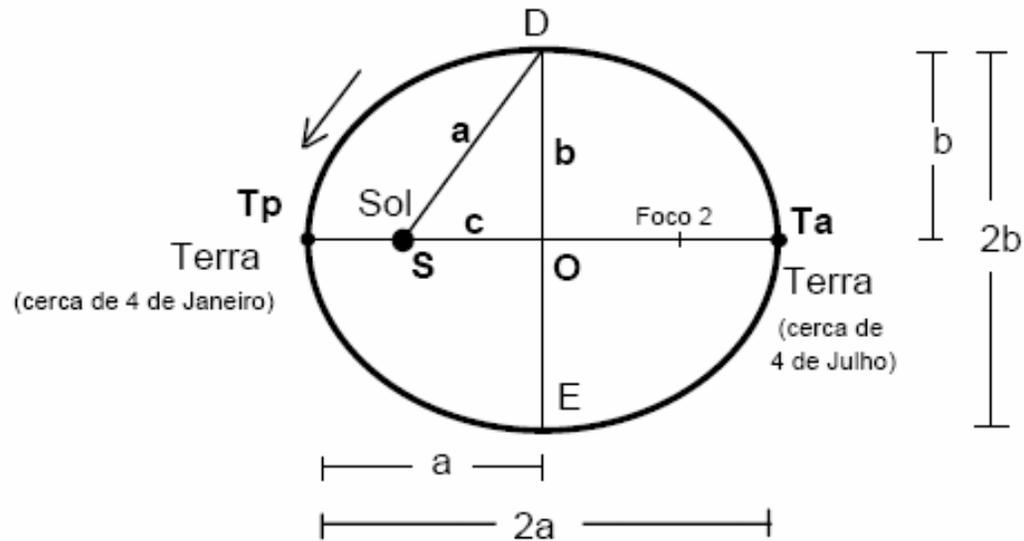
Sol – Fonte de energia térmica

- A quantidade de energia incidente sobre a Terra é imensa, mas é difusa, cíclica e sazonal.
- Sol estrela mais próxima da Terra ($1\text{AU}=1,496\times 10^8$ km)
- A radiação solar extraterrestre é atenuada por dois mecanismos:
 - dispersão, devida às moléculas de ar, vapor de água e às poeiras na atmosfera
 - **dispersão de Rayleigh** - moléculas de gás, que provocam uma dispersão em todas as direcções de uma forma quase uniforme
 - **dispersão de Mie** - poeiras e partículas de aerossóis na atmosfera, concentra as radiações em direcções que estão vedadas aos raios solares
 - absorção, especialmente pelo ozono, vapor de água e dióxido de carbono.
- A Terra no seu movimento à volta da Sol não mantém uma órbita estável.

Movimento da Terra à volta do Sol



Excentricidade do movimento da Terra



Excentricidade de uma elipse: $e = c/a$
 $e = 0,0167$

www.astrofotoportugal.com/siteapaa/GA/Excentricidade_Brasil_1.pdf

cf. Fig. pag. 2
 $0,983 < E_o < 1,017$

Variação da distância da Terra ao Sol

➤ Radiação solar sobre a Terra - inversamente proporcional ao quadrado da sua distância ao Sol

- $E_o = (r_o / r)^2 = 1 + 0,033 \cos (2\pi d_n / 365)$

- [Duffie and Beckman, 1980]

- E_o – factor de correcção da excentricidade da Terra

- d_n – n° do dia do ano

- $r_o = 1\text{AU} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$

Radiação solar e movimento de inclinação e translação da Terra

- A radiação solar extraterrestre (S_e) pode ser determinada pela expressão:

$$S_e = S \cdot E_o \cdot \cos(\delta)$$

S - constante solar ($S = 1353 \text{ W/m}^2$) [Fonte: NASA, 1971]

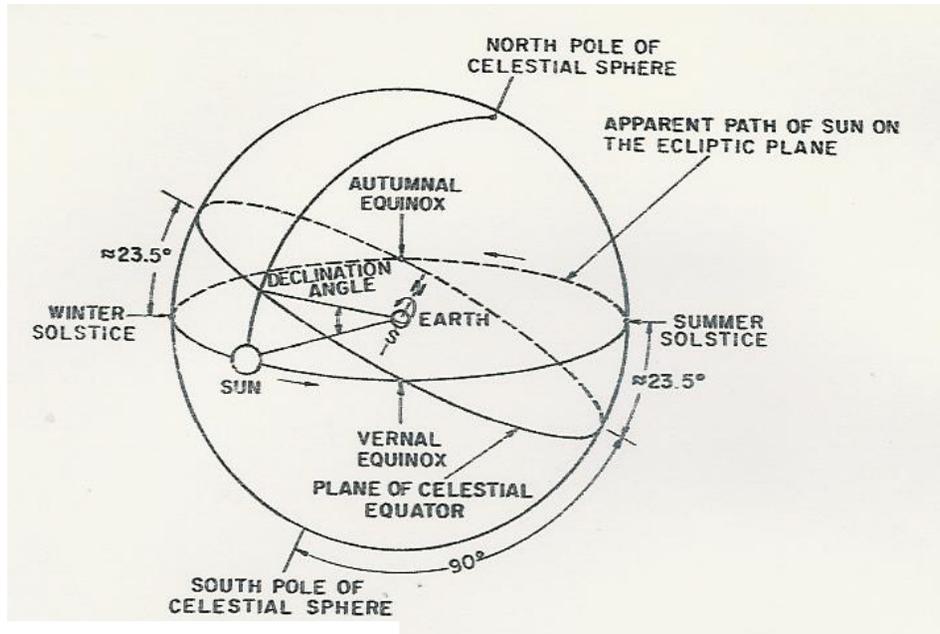
<http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2003/0313irradiance.html>

E_o - factor de correcção de excentricidade da órbita ($0,983 < E_o < 1,017$)
— cf. Fig (pag. 2)

δ - ângulo entre o raio solar e o plano equatorial (normal ao eixo polar), chamado de ângulo de declinação solar

Oscilação da Terra em torno do eixo polar

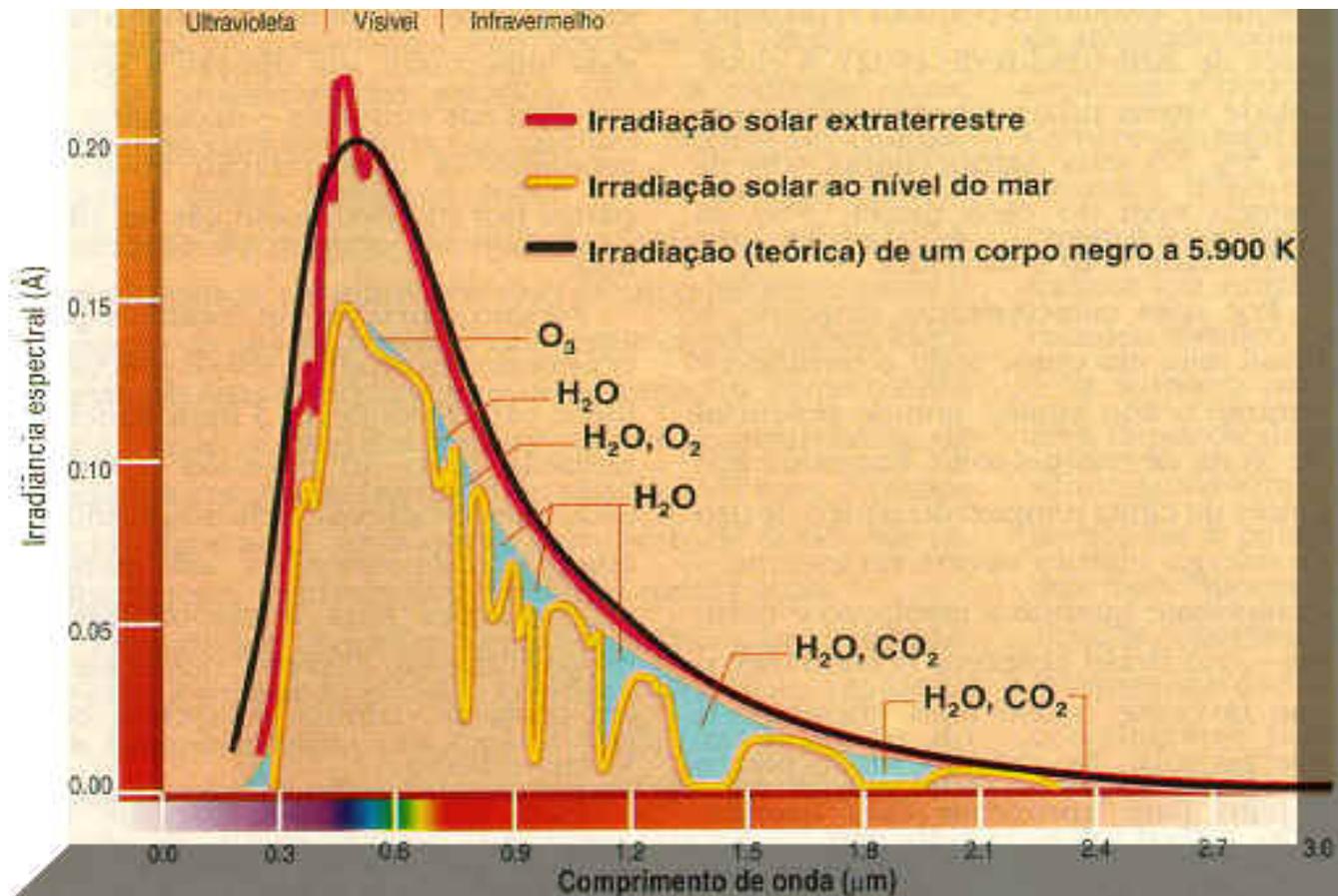
Ângulo de declinação - δ



$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2 \Gamma + 0,000907 \sin 2 \Gamma - 0,002697 \cos 3 \Gamma + 0,00148 \sin 3 \Gamma)(180/\pi)$$

$$\Gamma = 2 \pi (d_n - 1)/365$$

Atenuação da radiação solar



Atenuação da radiação solar

- A radiação emitida pelo Sol corresponde à radiação emitida por um corpo negro à temperatura de 5762 K
- A radiação solar extraterrestre é atenuada por dois mecanismos:
 - dispersão, devida às moléculas de ar, vapor de água e às poeiras na atmosfera
 - **dispersão de Rayleigh** - moléculas de gás, que provocam uma dispersão em todas as direcções de uma forma quase uniforme
 - **dispersão de Mie** - poeiras e partículas de aerossóis na atmosfera, concentra as radiações em direcções que estão vedadas aos raios solares
 - absorção, especialmente pelo ozono, vapor de água e dióxido de carbono.

Radiação térmica

➤ Propagação de uma onda electromagnética, por agitação molecular e atómica - fótons ou quanta

➤ Velocidade de propagação da luz (**c**)

$$c = \lambda \cdot \nu$$

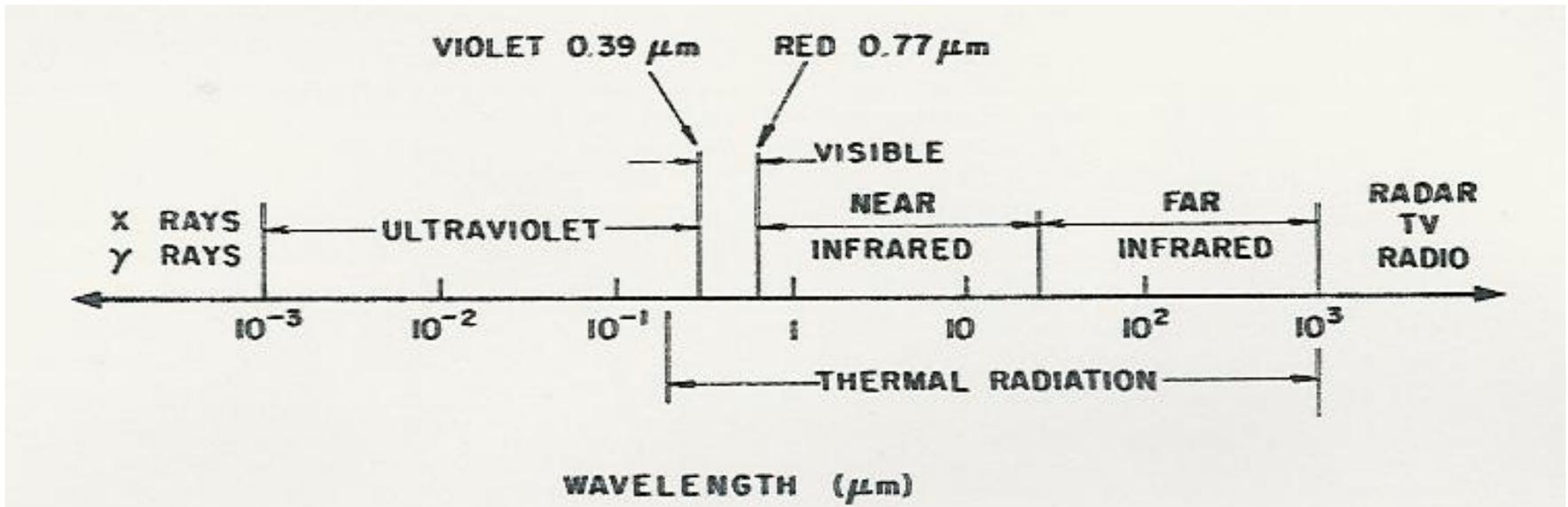
➤ Comprimento de onda

➤ Frequência – ν

➤ Velocidade da luz no vácuo – $c_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$

Radiação térmica no Espectro de radiação electromagnética

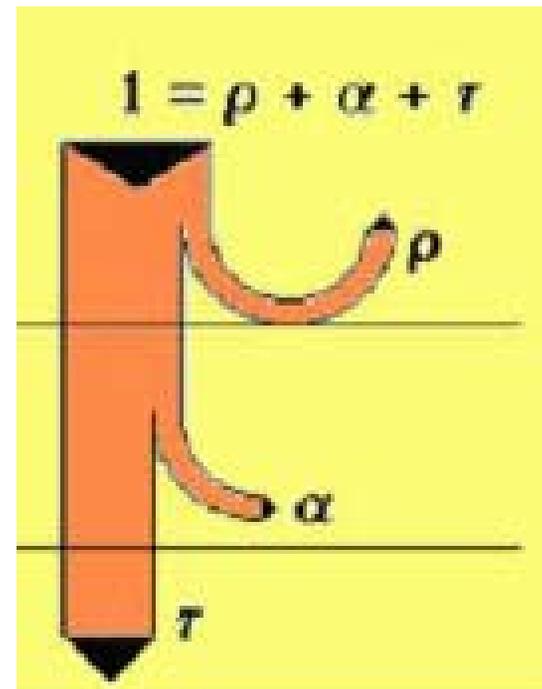
(Radiação térmica) »» (0,1; 100) (μm)



Reacção das superfícies à radiação

➤ Por efeito da irradiação ocorre:

- transmissão (τ),
- absorção (α)
- reflexão (ρ)



Lei de Planck

- A radiação total emitida por corpo negro é dada por uma distribuição contínua e não uniforme de radiações monocromáticas, i.e., para temperaturas seleccionadas
 - ↳ Radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda
 - ↳ Para cada comprimento de onda a intensidade da radiação aumenta com o aumento da temperatura
 - ↳ Radiação é mais intensa para baixos comprimento de onda, a que corresponde maiores temperaturas

$$E = \sigma \cdot T^4$$

Corpo negro

➤ Superfície ideal

- Absorve toda a irradiação incidente, independentemente do comprimento de onda e da direcção
- Para uma dada temperatura e comprimento de onda nenhuma superfície emite mais radiação que a de um corpo negro nas mesmas condições (*lei de Kirchhoff*)
- A radiação emitida é independente da direcção, i.e. um corpo negro é um emissor difuso

Superfície real

- Superfícies reais - para as quais os coef. de absorção e emissão são independentes do comprimento de onda

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

ε - emissividade $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

- ↪ A emissividade de superfícies metálicas é geralmente pequena

- Para ouro e prata polida a emissividade é 0,02
- A presença de uma camada de óxidos pode aumentar significativamente a emissividade das superfícies metálicas
 - aço ligeiramente oxidado - 0,1
 - aço fortemente oxidado - 0,5

Emissividade de diferentes materiais

Materiais	Temperatura	Emissividade
Cobre	100	0,05
Aço	100	0,07
Alumínio em bruto		0,68
Alumínio oxidado		0,85
Alumínio polido		0,1
Cimento		0,95
Plástico branco		0,84
Plástico negro		0,95
Papel Branco	20	0,07-0,9
Pele Humana	32	0,98
Madeira	20	0,9

Emitância e Radiância

- Emitância (E): *Quantidade de energia térmica irradiada por unidade de superfície à temperatura absoluta T*

$$E = \varepsilon \sigma . T^4$$

- Radiância (J): *Energia total radiante que abandona uma dada superfície. Corresponde a toda a emitância mais a parte da energia recebida que é reflectida*

$$J = \rho . G + E$$

Colectores solares

➤ Objectivos:

- captar radiação solar - concentrada ou não
- transferi-la para um fluido
- máximo rendimento » efeito de estufa + isolamento

➤ Meios:

- captação: radiação directa + difusa
- armazenamento
- apoio » eléctrico, caldeira

Conversão térmica da energia solar

• NA PRODUÇÃO DE ELECTRICIDADE ATRAVÉS DE CICLOS TÉRMICOS



• AQUECIMENTO DE ÁGUAS OU PRODUÇÃO DE VAPOR NA INDÚSTRIA



• NA COZEDURA DE ALIMENTOS OU NA DESSALINIZAÇÃO



• NA FUSÃO DE MATERIAIS



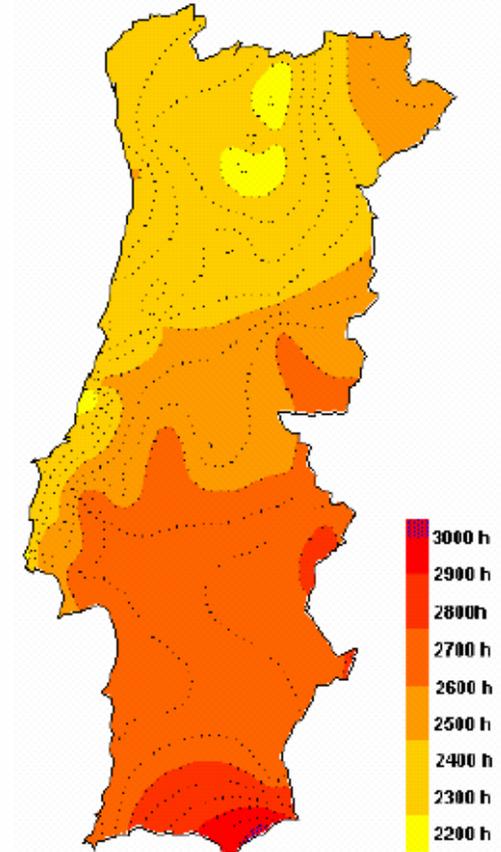
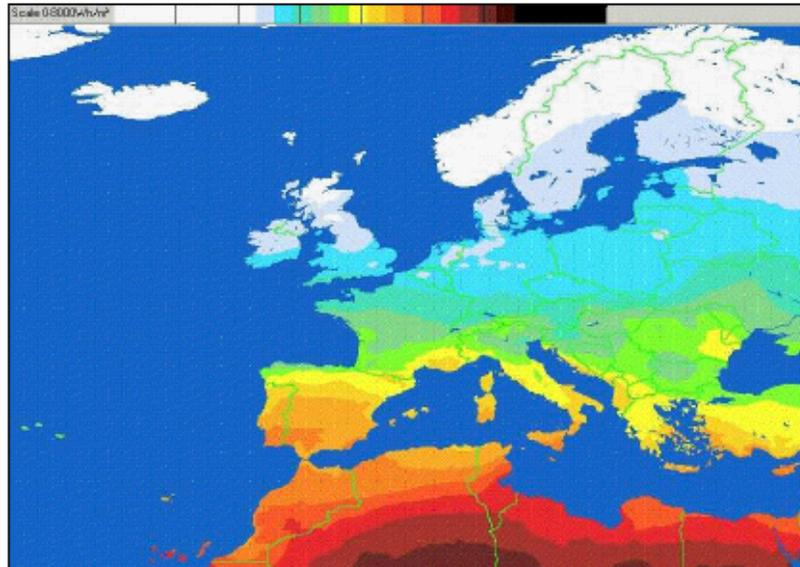
• AQUECIMENTO DE ÁGUAS QUENTES SANITÁRIAS



• AQUECIMENTO DE PISCINAS



Distribuição da energia solar em Portugal e nos países vizinhos



Radiação Solar

2200-3000 h

14-17MJ/m²/dia

Colectores Térmicos

Area instalada:

240 000 m² (~ 10.000 m²/ano)

Módulos Fotovoltaicos

Potência Instalada:

1000 kWp

Comparação da situação Portuguesa com a de outros países europeus

Na aplicação de água quente sanitária

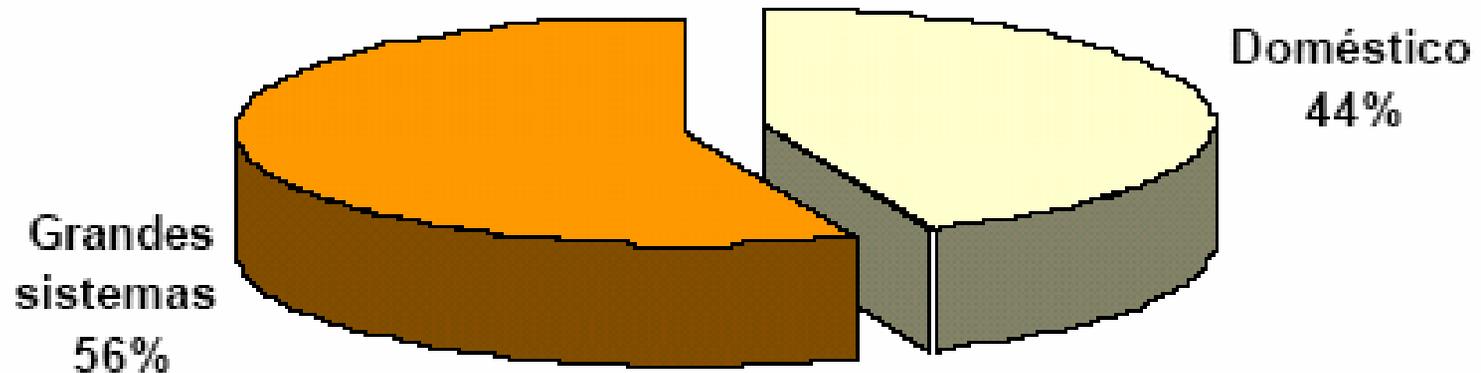
PAÍS	TOTAL INSTALADO ATÉ 1999 (m ²)	PER CAPITA (m ² /hab)	INSTALADO EM 1999 (m ²)	INSTALADO EM 2000(PREVISÃO) (m ²)	ESTIMATIVA PARA 2001 (m ²)
Alemanha	2 900 000	0.036	420 000	615 000	800 000
Áustria	1 476 000	0.184	141 000	170 000	190 000
Bélgica	19 500	0.002	1 500	2000	3000
Dinamarca	282 000	0.054	14 000	15 000	20 000
Espanha	313 000	0.008	33 000	40000	60000
Finlândia	12 000	0.002	7 000	7000	7000
França	296 000	0.005	6 000	7000	14000
Grécia	2 645 000	0.252	160 000	170 000	200 000
Itália	244 000	0.004	22 000	27000	40000
Portugal	219 500	0.022	4 500	????	???
Suécia	157 000	0.018	9000	15000	20000

Quadro 1 – Mercado de energia solar em diferentes países europeus.

Fonte: Forum das Energias Renováveis, 1999

Em Portugal

Distribuição da área instalada por tipo de aplicação em 2004



Energia solar em processos industriais

- Na UE estima-se que o consumo de **calor industrial a temperaturas entre 80°C e 250°C** seja de 300 milhões de MWh, isto é, 8 % do consumo total de energia final.
- A percentagem de consumo de energia sob a forma de calor nas gamas de temperatura média e média-alta é muito elevada nas **indústrias alimentar, de produção de papel, têxtil e química**.
- Processos adequados são por exemplo:
 - **aquecimento de banhos de líquidos** para processos de lavagem, tinturaria, processos químicos etc;
 - **aquecimento de ar** para processos de secagem;
 - **geração de vapor** de baixa pressão para diversas aplicações.
 - **produção de frio** utilizando máquinas de absorção ou outros equipamentos térmicos constitui outro grande campo de aplicações com vantagem reconhecida devido à coincidência entre os picos de consumo e os picos de disponibilidade de energia solar.

Colectores solares

➤ Componentes:

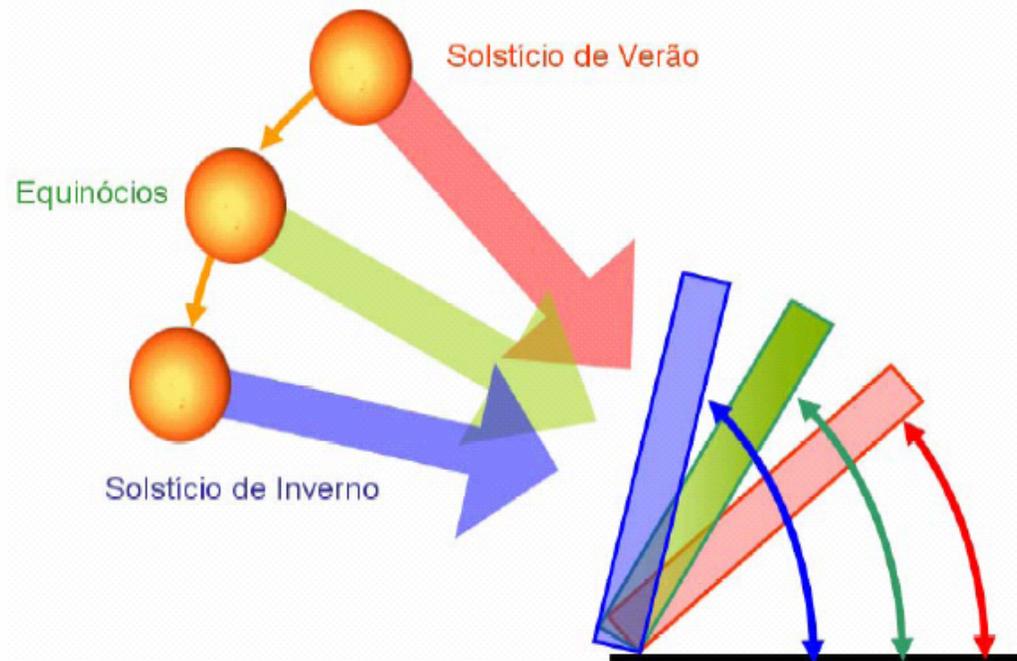
- colector » elemento de absorção: placa selectiva ou não, tubos, isolamento, caixa
- depósito de acumulação
- bombas/ventiladores
- permutadores
- sistemas de segurança e controle
- válvulas
- tubos e isolamento

➤ Dificuldades:

- congelamento, vaporização, perdas de carga, fixação (acção do vento), orientação e inclinação

Direcção dos raios solares e inclinação do colectador

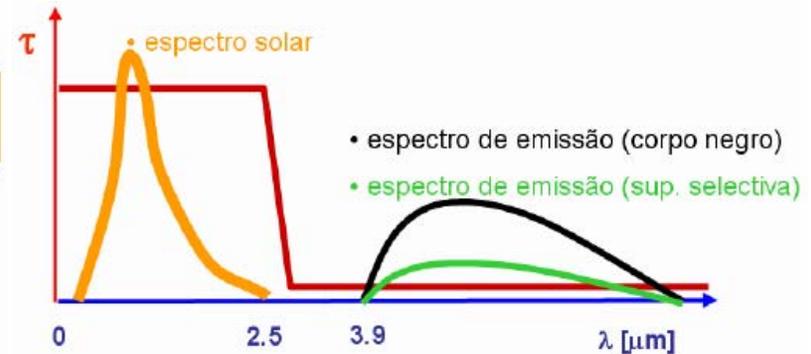
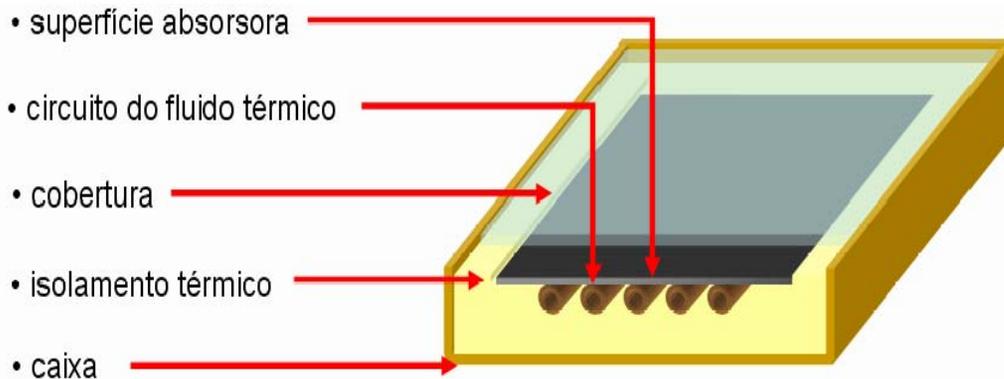
A **inclinação** dos colectores deve otimizar a captação de radiação solar tendo em conta a variação da altura solar ao longo do ano.



Tipos de colectores e concentradores e gamas de aplicação

- Tipos de colectores solares
 - planos
 - cilíndricos
- Tipos de concentradores - heliostatos
 - planos
 - parabólicos
 - lente convexa
 - lente concava
- Gamas de aplicação
 - aquecimento de ar e de água
 - produção de vapor, produção de electricidade
 - fusão de materiais

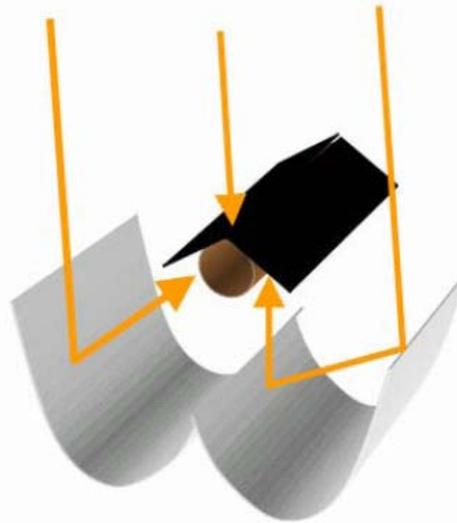
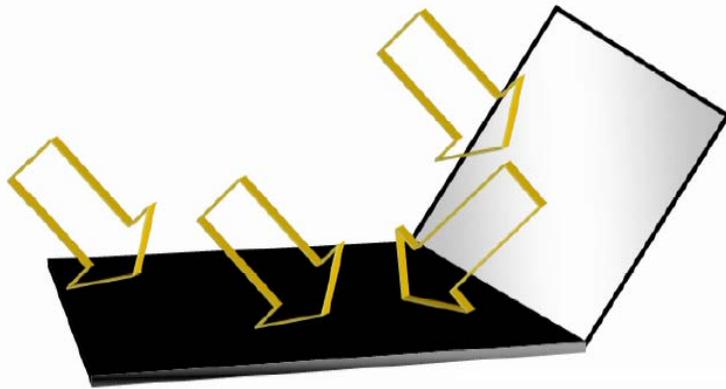
Construção do colector solar



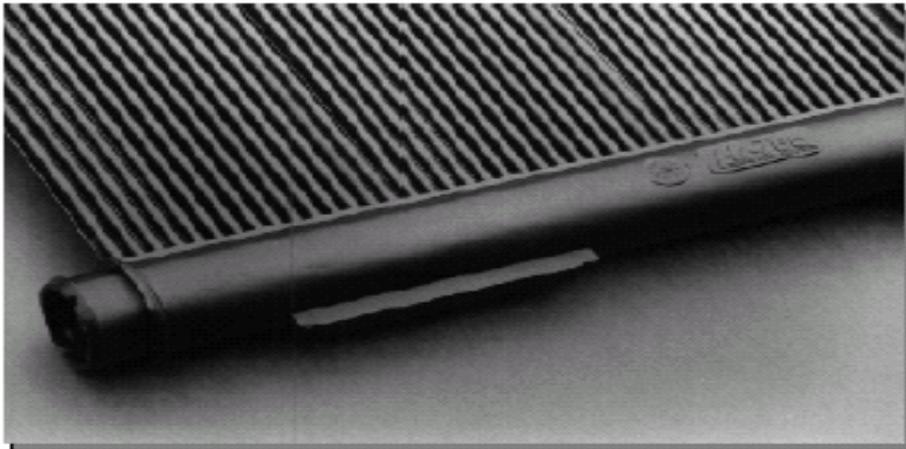
Componente	Material	Processo
Caixa	Alumínio	Extrusão
Cobertura	Vidro	-
Chapa de fundo	Poliestireno	Extrusão
Tubo	Cobre	Extrusão
Absorvedor	Cobre	Extrusão
Isolamento	Poliuretano	Sopragem de espuma (foam blowing)
Borrachas	Borracha	-



Concentradores



Colectores



Colector sem cobertura



Colector plano c/ ou s/ vácuo

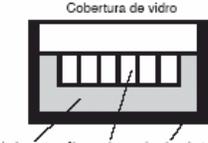
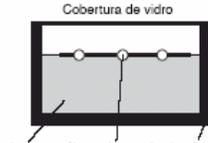
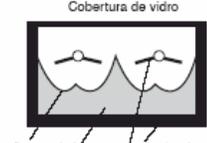
Colectores



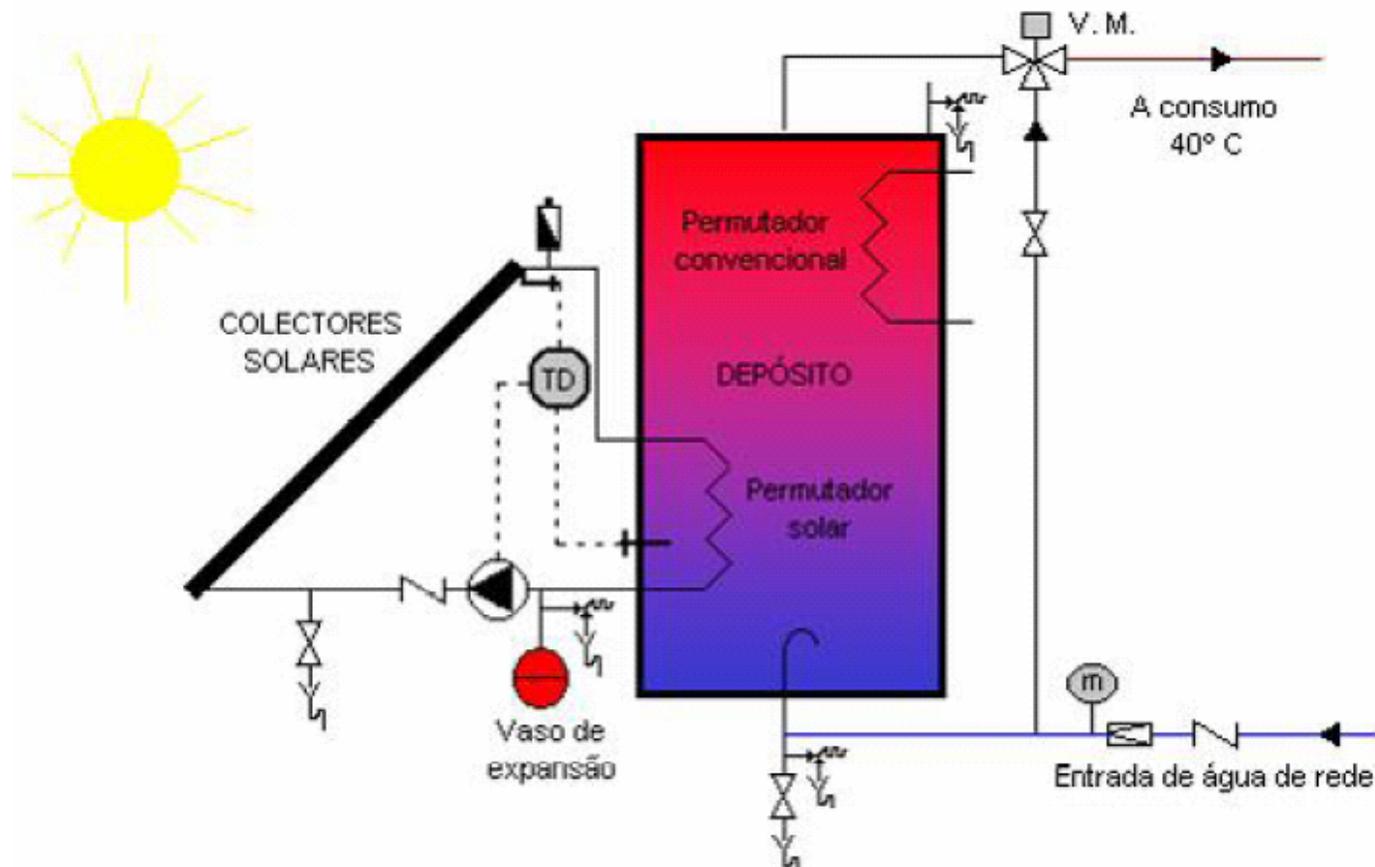
Colector cilíndrico-parabólico



Colector de tubos de vácuo

Tipo de colector	Colector a ar	Colector plano	Colector plano com concentrador parabólico	Colector de tubo de vácuo
Abreviatura	CA	CP	CPC	CTV
				
	 <p>Cobertura de vidro</p> <p>isolamento Absorvedor com canais de ar caixa de colector</p>	 <p>Cobertura de vidro</p> <p>isolamento Absorvedor com tubos para fluido caixa de colector</p>	 <p>Cobertura de vidro</p> <p>reflector isolamento caixa de colector Absorvedor com tubos para fluido</p>	 <p>Tubo de vidro em vácuo</p> <p>Absorvedor com 2 tubos concêntricos (entrada e saída)</p>
Princípio	Aquecimento directo do ar	Aquecimento de um líquido (água, água+glicol)	Aquecimento de um líquido (água, água+glicol), concentração da radiação	<p>Tubos a vácuo para reduzir as perdas térmicas</p> <p>Diferentes tecnologias:</p> <ul style="list-style-type: none"> - com "heat pipe" - com fluxo directo - com concentração, tipo Sydney
Aplicações Principais	Pré-aquecimento do ar de ventilação	Água quente sanitária	Água quente sanitária e Industrial	Água quente sanitária e Industrial
Aplicações principais em arrefecimento solar	Sistemas abertos exsiccantes	Sistemas exsiccantes, adsorção, absorção (efeito simples) com colectores selectivos	Adsorção e absorção (efeito simples)	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorção, absorção - Absorção (duplo efeito): Sydney

Instalação para aquecimento de água



Instalações e equipamentos no aquecimento de águas sanitárias

➤ Circulação

- natural » termo sifão
- forçada

➤ Tipo de transmissão da energia

- directo
- indirecto

➤ Sistemas de controle e segurança

- célula solar
- termóstato simples e/ou diferencial
- sensor de temperatura nos painéis
- sensor de temperatura no depósito de acumulação
- válvula de segurança

Equipamentos em instalações de aquecimento de águas sanitárias

- Vaso de expansão aberto ou fechado
- Purgadores de ar
- Válvula de retenção
- Válvula reguladora de débito e debitómetro
- Bomba
- Tubagem
- Permutador
- Depósito de acumulação

Balanço térmico de um colector solar

- Energia absorvida pela chapa absorvedora

$$Q_{abs} = A_c \cdot \alpha \cdot \tau \cdot G_T$$

- Perdas da chapa absorvedora

$$Q_{perd} = A_c \cdot U_L (T_{pm} - T_a)$$

- Energia útil captada

$$Q_{util} = Q_{abs} - Q_{perd}$$

$$Q_{util} = A_c [G_T (\tau \alpha) - U_L (T_{pm} - T_a)]$$

Rendimento térmico de um colector solar

Correcção de T_{pm} (temp. média da água na chapa absovedora) para T_i (temp. da água à entrada)

$$Q_{util} = A_c Fr [G_T(\alpha\tau) - U_L (T_i - T_a)]$$

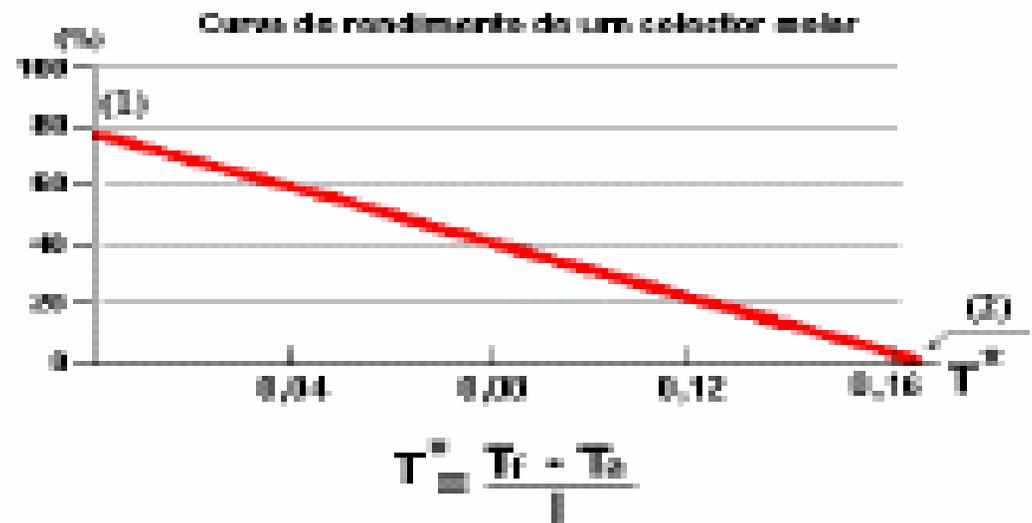
Rendimento de um colector solar

$$\eta_i = Fr (\alpha\tau) - Fr. U_L (T_i - T_a)/G_T$$

Curva de rendimento de um colector solar

Tipo de Colector	CARACTERÍSTICAS (relativas à área de abertura)	
	F' (t a)	$F' \times U_L$ (W/(m ² °C))
NÃO SELECTIVO	0,7 - 0,8	8 - 9
SELECTIVO	0,7 - 0,8	4,5 - 6
C.P.C.	0,75	4,2 / 3,7 ⁽¹⁾

(1) Os dois valores de $F' \times U_L$ para o colector C.P.C. correspondem a orientações NS e EW respectivamente do comprimento L .



Temperaturas e tipo de instalação

TIPO DE INSTALAÇÃO	TEMPERATURA de UTILIZAÇÃO	TIPO DE COLECTOR
Piscinas / Estufas	< 30 °C	plano sem cobertura plano (preto baço) plano (selectivo)
Águas Sanitárias e pré-aquecimento Industrial	< 60 °C	plano (preto baço) plano (selectivo) CPC (baixa concentração)
pré-aquecimento Industrial	> 60 °C	CPC (baixa concentração) CPC (alta concentração) Tubos de Vácuo Outros Concentradores

Percentagem de anti-congelante e C_p do fluido térmico

O Calor específico C_p ($J / (kg \text{ } ^\circ C)$) do fluido térmico depende da temperatura e da percentagem de anti-congelante na mistura.

$T \text{ } ^\circ C \setminus \% \text{ Vol.}$	0%	10%	20%	30%	50%
20° C	4 186	4 105	4 030	3 913	3 566
40° C		4 108	4 039	3 934	3 633
60° C		4 126	4 072	3 976	3 704

Observações sobre o dimensionamento de instalações com colectores solares

- A qualidade térmica de um colector avalia-se com base no seu comportamento instantâneo, procurando-se que as condições de ensaio cubram as condições de funcionamento típicas
- Os colectores inseridos numa instalação irão funcionar num vasta gama de condições, em função dos dados meteorológicos e da utilização
- O dimensionamento das instalações térmicas solares não se faz para a carga de ponta, uma vez que a captação da energia solar não pode aumentar em função do aumento de utilização para além de escassos limites

Observações sobre o dimensionamento de instalações com colectores solares

- O aproveitamento prático da energia solar é uma tarefa de carácter permanente em relação muito estreita com a capacidade de armazenagem
- A energia captada é tanto maior quanto mais baixa for a temperatura de entrada do fluido no colector
- A opção por uma determinada solução, conhecidas as características técnicas, deverá ser condicionada a critérios económicos

Índice de ocupação do país

➤ Aquecimento de água de piscinas cobertas

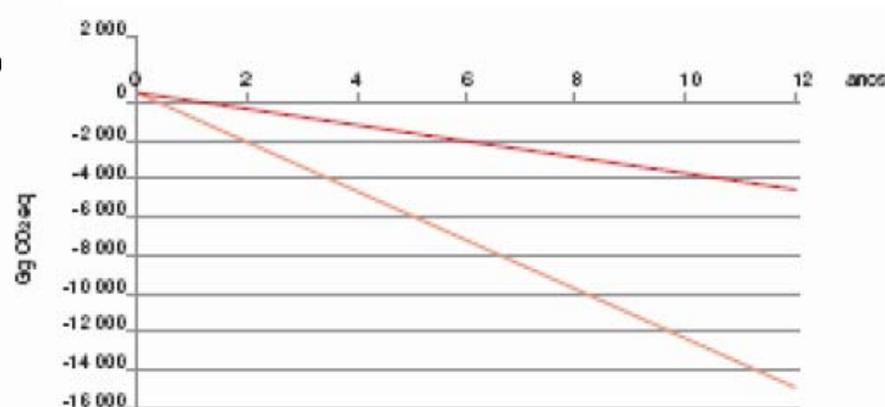
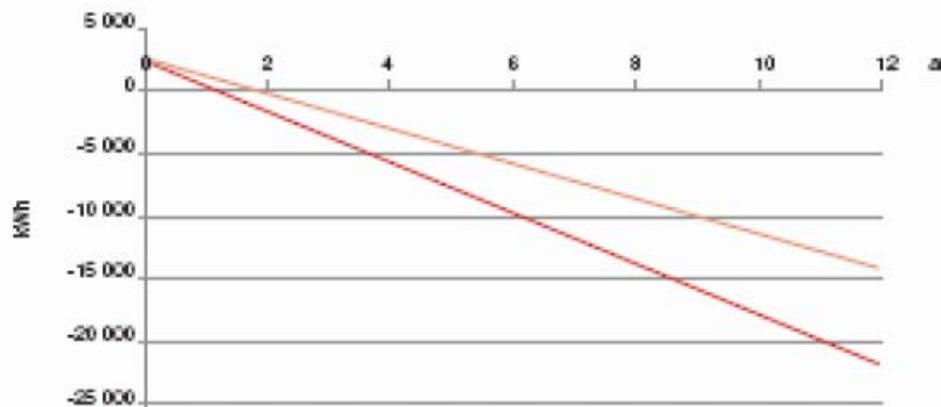
REGIÃO	PISCINAS COBERTAS		A_c	E_{anual}	I_{solar}
	Nº de Inst.	m²	m²	MWh	kEuro
ALENTEJO	33	7 159	5 046	4 289	1 766
ALGARVE	6	1 467	1 034	879	362
CENTRO	77	17 806	12 550	10 668	4 392
LISBOA E VALE DO TEJO	117	30 961	21 882	18 600	7 659
NORTE	124	34 321	24 190	20 562	8 467
TOTAL	357	91 714	66 299	56 354	23 205

Seminário Nacional JRA – Sever do Vouga – 18/11/04

$$I_{\text{solar}}/A_c(\text{m}^2) \cong (350) \text{ €}$$

Tempo de retorno energético e ambiental do KIT solar (taxa 50% de reciclagem)

TAXA DE RECICLAGEM DOS METAIS E VIDRO	"KIT" SOLAR COM APOIO A GÁS NATURAL SUBSTITUINDO UM ESQUENTADOR A GÁS NATURAL	"KIT" SOLAR COM APOIO A ELECTRICIDADE SUBSTITUINDO UMA RESISTÊNCIA ELÉCTRICA
0 %	1 ano e 8 meses	2 anos e 5 meses
50 %	1 ano e 2 meses	1 ano e 9 meses
100 %	9 meses	1 ano e 1 mês



— substituição de um esquentador a gás natural; apoio a gás natural
 — substituição de uma resistência eléctrica; apoio a electricidade

— substituição de um esquentador a gás natural; apoio a gás natural
 — substituição de uma resistência eléctrica; apoio a electricidade

Impacto ambiental dos colectores solares no Protocolo de Quioto



Comparação com o uso de automóvel



emitido por 1 carro

15 000 km/ano

8 litro / 100 km

3,3 ton de CO₂ ≈

evitado por

4 m² de colectores

3,4 ton de CO₂

CONCLUSÃO:

Uma família com 4 m² de colectores solares pode usar o seu automóvel sem problemas de consciência

Decreto-Lei que aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE

- **RCCTE** - estabelece as regras a observar no projecto de todos os edifícios de habitação e dos edifícios de serviços sem sistemas de climatização centralizados.
 - Além da obrigatoriedade do recurso a **colectores solares**, pretende-se que as exigências de conforto térmico, sejam de aquecimento ou de arrefecimento, de ventilação para garantia de qualidade do ar no interior edifícios, ou as necessidades de água quente sanitária, possam vir a ser satisfeitas sem dispêndio excessivo de energia e, por outro lado, que sejam minimizadas as situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas, com potencial impacto negativo na durabilidade dos elementos de construção e na qualidade do ar interior.

LINKS

- <http://www.spes.pt/tmp/>
- <http://www.ineti.pt/uo/uo/?uo=11039>
- <http://www.aguaquentesolar.com/publicacoes/2/>
- http://pt.wikipedia.org/wiki/Painel_solar
- <http://www.seia.org/solartypes.php>
- <http://www.fsec.ucf.edu/solar/>
- <http://www.solarserver.de/index-e.html>