

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 23



Aula 23: Energia Solar Activa

Tópicos

- *Tipos de sistemas hidráulicos*
- *Necessidades Energéticas*
- *Cálculo da superfície solar colectora*
- *Cálculo da energia aproveitável*
- *Cálculo da intensidade útil*
- *Rendimento de um colector solar*
- *Perdas de calor nos elementos do sistema*
- *Cálculo da energia útil*
- *Cálculo da energia efectiva captada por mês*



23.0-Tipos de sistemas hidráulicos dos sistemas solares térmicos

Os sistemas solares de aquecimento de água possuem um circuito hidráulico que garante a circulação do fluido térmico e a transferência de energia térmica entre a área de captação e o depósito de acumulação. As configurações disponíveis para o circuito hidráulico são do tipo directo e indirecto.

Nos sistemas directos de aquecimento, o fluido térmico que circula nos colectores solares é a água de consumo. Enquanto que, nos circuitos indirectos o fluido térmico movimenta-se num circuito fechado e a permuta térmica dá-se para o circuito de consumo (secundário) através de um permutador de calor no interior ou exterior ao depósito de acumulação, como ilustrado na Figura 23.1



23.0-Tipos de sistemas hidráulicos dos sistemas solares térmicos

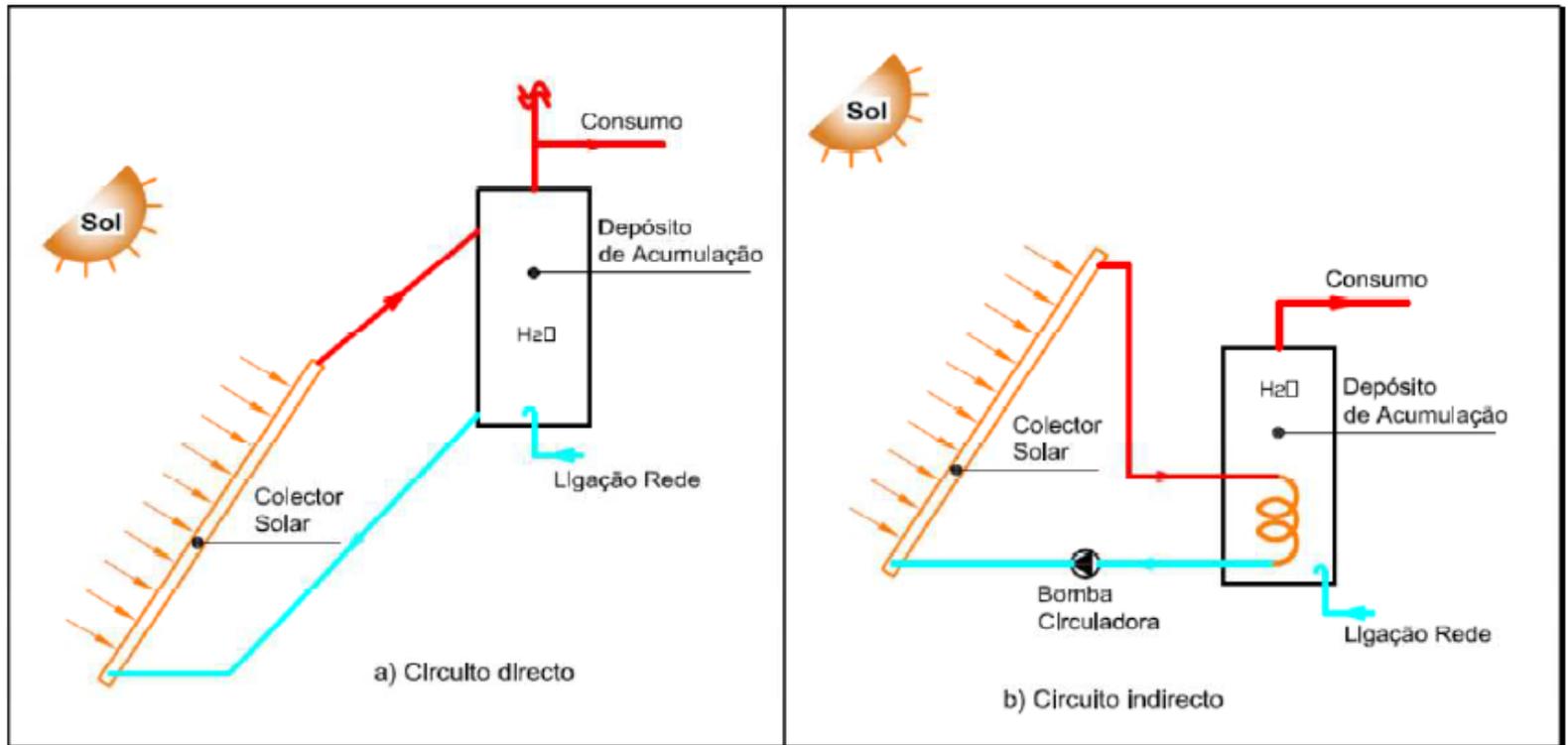


Figura 23.1: Tipos de sistemas hidráulicos dos sistemas solares térmicos



23.1-Tipos de sistemas hidráulicos dos sistemas solares térmicos

A escolha do tipo de sistema a aplicar numa instalação de aquecimento depende da carga energética necessária, bem como de outras questões de índole técnica e económica e portanto as questões económicas são as que mais se consideram na escolha de um sistema, uma vez que a intenção central de uma instalação solar é conseguir economizar energia.

Os sistemas solares captam a energia solar e transferem-na para o fluido térmico de duas formas: Termossifão (circulação natural) e Circulação forçada (com recurso a uma bomba de circulação).



23.1 Termossifão (Circulação natural)

Os sistemas de termossifão são definidos pela circulação natural do fluido térmico através da variação de densidade do fluido ocasionada pela variação da temperatura, isto é, o fluido térmico com a temperatura mais elevada tem uma densidade menor, logo sobe do colector para o depósito, enquanto que o fluido térmico com a temperatura mais baixa desce e entra no colector.

Os elementos base que constituem este tipo de sistemas são: colector solar, depósito acumulador e dispositivos de segurança, como é ilustrado na Figura 23.2.





23.1.1 Termossifão (Circulação natural)

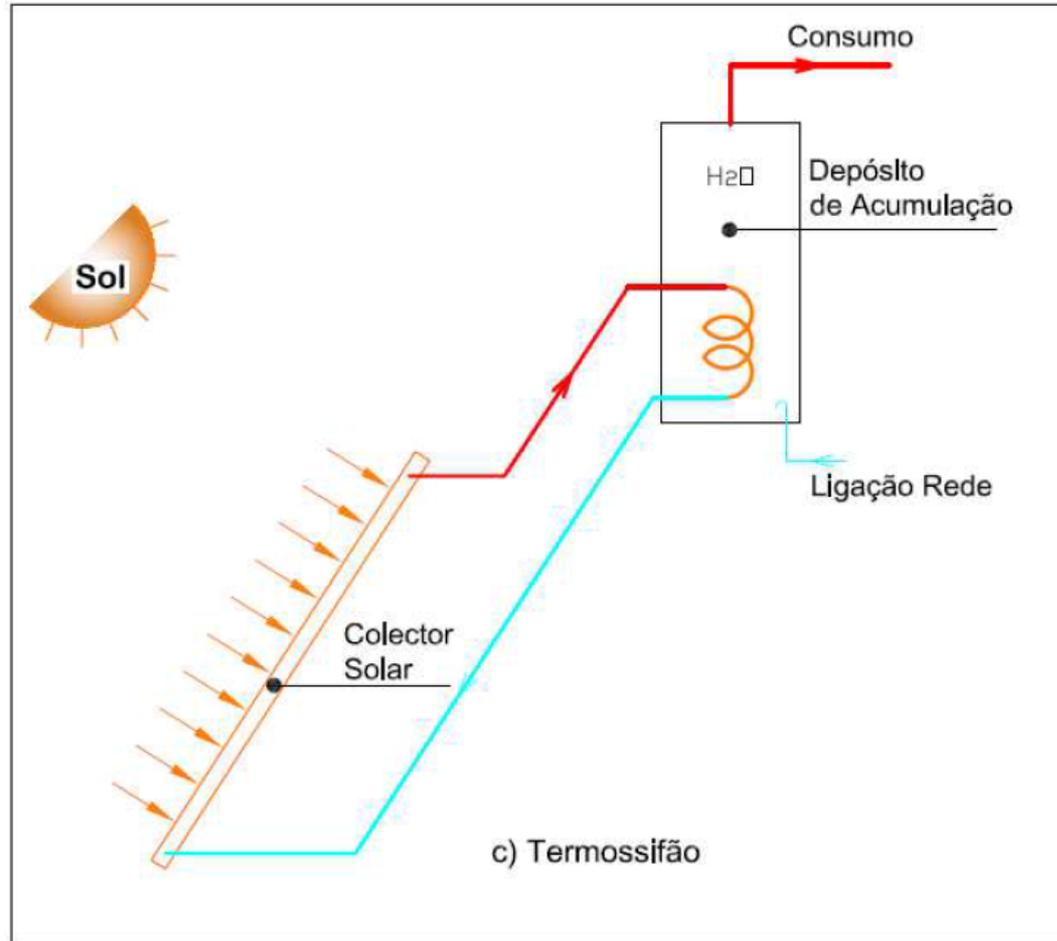


Figura 23.2: Termossifão (circulação natural)

23.1.2 Circulação forçada

Estes sistemas são caracterizados pela impulsão mecânica (com recurso a uma bomba de circulação) controlada por um dispositivo de controlo. O princípio de funcionamento consiste no movimento do fluido térmico accionado pela bomba de circulação controlada por um dispositivo de controlo. Este ao detectar condições para troca de energia entre os colectores e o depósito de acumulação acciona a bomba de circulação para que o fluido térmico circule e efectue a transferência de calor para o depósito de acumulação.

Os elementos base que constituem este tipo de sistemas são: colector solar, depósito acumulador, bomba de circulação, regulador solar e dispositivos de segurança, como é mostrado na figura.





23.1.2 Circulação forçada

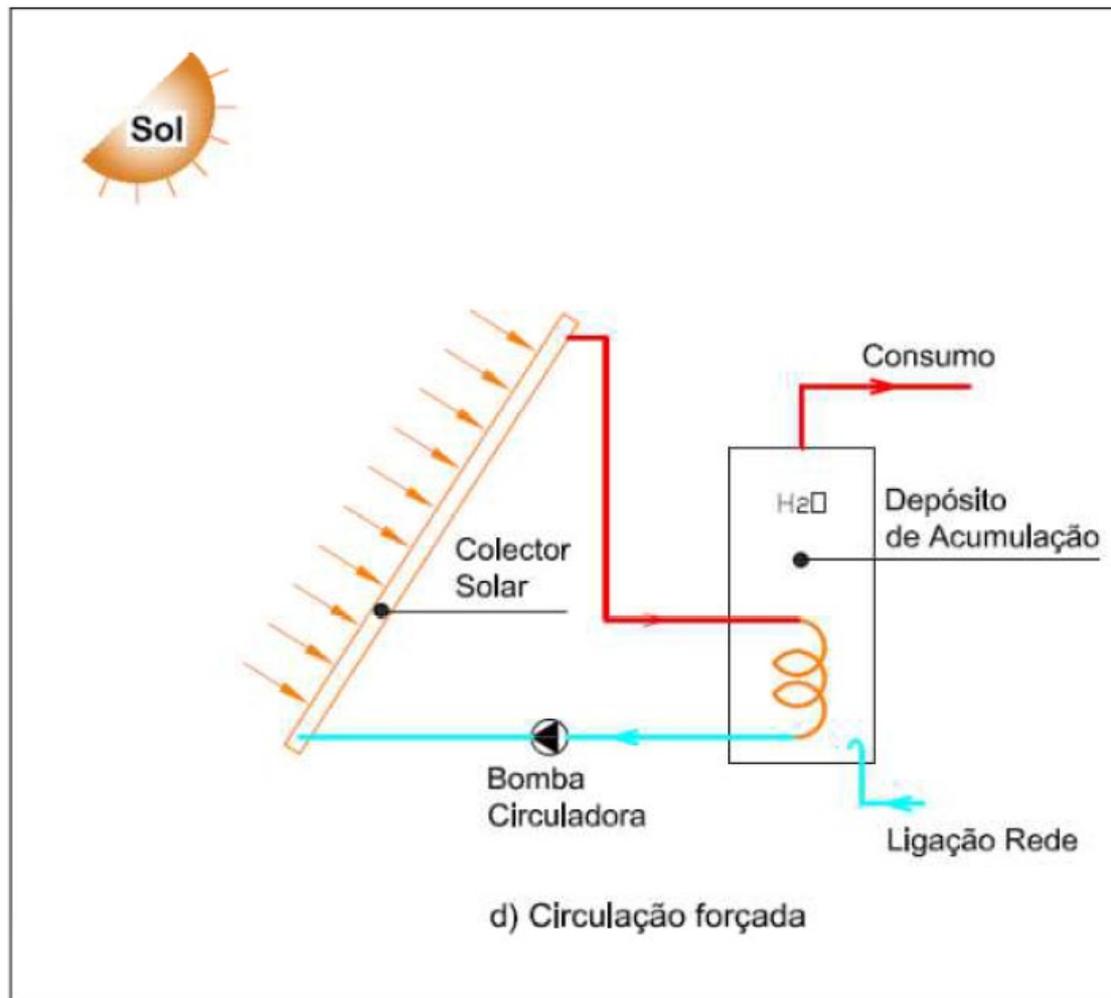


Figura 23.2: Circulação forçada

23.2 Necessidades Energéticas

As necessidades energéticas mensais ($E_{n,m}$) são determinadas pelo produto da potência solar necessária ao aquecimento de água pelos dias correspondentes ao mês em causa, de acordo com a seguinte expressão:

$$E_{n,m} = Q_{solar} \times n_h \times \text{dias do mês} \quad (23.1)$$

Em que:

$E_{n,m}$ - Necessidades energéticas mensais [MJ]

Q_{Solar} - Potência solar [MJ]

n_h - Número de horas de funcionamento [s]



23.2 Necessidades Energéticas

Para contabilizar as necessidades, ao calcular a quantidade de colectores solares a partir de um consumo diário desconhecido, é necessário utilizar os valores unitários de referência que constam no Procedimento Básico para a Certificação Energética de Nova Construção.



23.2 Necessidades Energéticas

Tabela 23.1 - Consumos diários de referência

Consumos	Litros/dia a 60°C
Vivendas unifamiliares	30 por pessoa
Vivendas multifamiliares	22 por pessoa
Hospitais e clínicas	55 por cama
Hotéis (4 estrelas*)	70 por cama
Hotéis (3 estrelas*)	55 por cama
Hotéis/Residenciais (2 estrelas*)	40 por cama
Campismo	40 por posição
Residenciais/Pensões (1 estrela*)	35 por cama
Residências (idosos, estudantes, etc.)	55 por cama
Vestiários/Duches colectivos	15 por serviço
Escolas	3 por aluno
Quartéis	20 por pessoa
Fábricas	15 por pessoa
Administrativos	3 por pessoa
Ginásios	20 a 25 por usuário
Lavandarias	3 a 5 por Kg de roupa
Restaurantes	5 a 10 por refeição
Cafetarias	1 por refeição ligeira



23.2 Necessidades Energéticas

Consumo equivalente à $T_{\text{utilização}}$ e à T_{rede} para cada mês, calcular-se:

$$\text{Consumo equivalente} = \text{Consumo diário}_{(T_{ref})} \times \left(\frac{T_{ref} - T_{rede}}{T_{utiliz} - T_{rede}} \right) [\text{litros}] \quad (23.2)$$

As necessidades energéticas calculam-se de:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t [J] \quad (23.3)$$

Onde:

m - Consumo equivalente em litros a 45°C

C_p - Calor específico da água,

$$\Delta t = T_{\text{utilização}} - T_{\text{rede}} = 45 - T_{\text{rede}}$$



23.3 Cálculo da superfície solar colectora

Após serem obtidas as necessidades energéticas para cada mês do ano, que podem ser representadas por meio de tabelas ou graficamente pode ser construído o diagrama de consumo. O ideal seria este diagrama corresponder, ao longo do ano, o mais possível com o diagrama de incidência solar.

Assim, para cada mês do ano pode ser obtida a relação energia solar disponível/consumo, que umas vezes é maior que a unidade e outras vezes é menor, consoante os meses do ano, daí ter que se ajustar a área colectora.





23.3.1 Escolha da inclinação óptima

Como inclinação adequada para os colectores solares térmicos planos estacionários deve ser escolhido um ângulo fixo para todo o ano. Muitas vezes ainda que para determinada altura do ano não se maximize a captação solar, produz-se uma melhor distribuição da mesma ao longo do ano. Em geral, deve-se favorecer a captação no Inverno em detrimento dos meses de Verão, já que no Verão é comum haver energia captada em excesso.

23.3.1 Escolha da inclinação óptima

O critério adoptado para dimensionar a superfície colectora consiste em que a energia solar captada no período de actividade satisfaça as necessidades requeridas.

Assim, as inclinações óptimas a dar aos colectores solares térmicos para aquecimento de diversos sistemas são as indicadas na Tabela 23.2, conforme a época do ano e seu uso:

Tabela 23.2 – Inclinação óptima dos colectores solares térmicos

UTILIZAÇÃO (POR ESTAÇÃO)	INCLINAÇÃO OPTIMA DO COLECTOR
Todo o ano (AQS)	Latitude do lugar -5 °
Inverno (Aquecimento)	Latitude do lugar +15 °
Verão (Piscinas descobertas/ hotéis de temporada)	Latitude do lugar -15 °



23.3.1 Escolha da inclinação óptima

Considerando que os sistemas de refrigeração por absorção funcionarão durante os 12 meses do ano para “produção de frio”, pela tabela acima admite-se que a inclinação adequada dos colectores solares térmicos planos estacionários será a correspondente a todo o ano (Latitude do lugar -5 °). A expressão que determina a inclinação óptima é:

$$I_{\text{óptima}} = Lat + (\hat{ang}_{\text{utiliz}}) \quad (23.4)$$

Em que:

$I_{\text{óptima}}$ - Inclinação óptima do colector de acordo com a sua utilização [°]

Lat. - Latitude do lugar [°]

$\hat{ang}_{\text{utiliz}}$ - Ângulo de utilização [°]



23.4 Cálculo da energia aproveitável

A energia aproveitável ou energia total teórica (E_{ap}) que incide sobre cada m^2 da superfície inclinada dos colectores num dia médio de cada mês é obtida conforme indicado nos pontos seguintes:

i- É obtida a irradiação horizontal média para cada mês, através de tabelas de dados climáticos, correspondentes à latitude considerada.

H- Irradiação global horizontal média para cada mês [MJ/m^2]





23.4 Cálculo da energia aproveitável

ii-Depois de obtido o valor (H) são admitidos os seguintes coeficientes de correcção, $\text{Coef}_{\text{Correcção}}$:

- 1,05 - caso a localização do sistema solar térmico seja uma zona de montanha com atmosfera limpa;
- 0,95 - caso a localização seja em zonas poluídas, ou grandes cidades;
- Estimar um valor de correcção caso exista projecção de sombras sobre os colectores.

23.4 Cálculo da energia aproveitável

iii-Resultando do produto destes dois componentes a irradiação horizontal média para cada mês corrigida, ($H_{\text{Corrigida}}$), a qual tem a seguinte expressão:

$$H_{\text{Corrigida}} = H \times \text{Coef}_{\text{Correcção}} \quad (23.5)$$

Onde:

$H_{\text{Corrigida}}$ - Irradiação horizontal média para cada mês corrigida [MJ/m^2]

H - Irradiação horizontal média para cada mês [MJ/m^2]

$\text{Coef}_{\text{Correcção}}$ - Coeficiente correcção [Adimensional]



23.4 Cálculo da energia aproveitável

iv - Conhecido o valor da irradiação horizontal média para cada mês, o qual pode coincidir com o valor das tabelas ou apresentar um valor diferente pelos motivos de correção apresentados anteriormente há que encontrar o seguinte factor:

f - Factor de inclinação [Adimensional]

O factor de inclinação (f) é obtido através de tabelas de latitude/inclinação para os diferentes meses do ano.





23.4 Cálculo da energia aproveitável

v - Com estas duas variáveis ($H_{\text{Corrigida}}$) e (f) é possível determinar a energia aproveitável ou energia total teórica (E_{ap}) que eventualmente pode incidir num dia médio do mês considerado em cada m^2 de superfície colectora. Mais, conforme descrito anteriormente o funcionamento dos sistemas térmicos solares ocorre por circulação de um fluido que entra em movimento pela acção da temperatura ou por acção de uma bomba de circulação, a qual só deve entrar em funcionamento se existir energia para aproveitar.

23.4 Cálculo da energia aproveitável

Assim sendo, o movimento do fluido não é verificado apenas nas primeiras horas da manhã e as últimas da tarde porque a incidência de irradiação solar não é suficiente para aquecer os colectores.

Empiricamente é demonstrado que a energia desperdiçada durante estes períodos de menor incidência solar (menor altura solar) é cerca de 6% da energia total diária (E_{ap}), com pouca variação durante as épocas do ano.

Assim, para a correcta obtenção da energia aproveitável (E_{ap}) esta deve ser multiplicada por 0,94.

$$E_{ap} = H_{Corrigida} \times f \times 0,94 \quad (23.6)$$



23.4 Cálculo da energia aproveitável

Onde:

E_{ap} - Energia aproveitável ou energia total teórica incidente por m^2

[MJ/ m^2]

f - Factor de inclinação [Adimensional]

Ainda há que ter em conta aspectos estéticos ou arquitectónicos, em que havendo a necessidade de desvios da direcção Sul de um ângulo (β) entre $20^\circ < \beta < 70^\circ$, será ainda necessário multiplicar(E_{ap}) por $1,14 - 0,0085\beta$, em que (β) é expresso em graus.



23.5 Cálculo da intensidade útil

A irradiação que incide sobre a superfície dos colectores solares irá ter uma variação consoante as horas do dia. Assim, para efeitos de cálculo, pode ser utilizada uma intensidade média, a qual será a razão entre a energia média útil (E_{ap}) incidente ao longo do dia e o tempo que o sol está sobre o horizonte, retirando as horas de início e fim do dia em que o sol apresenta uma altura reduzida, a qual não garante irradiação suficiente sobre os colectores para colocar o fluido em circulação.



23.5 Cálculo da intensidade útil

A expressão que permite o cálculo da intensidade é a seguinte:

$$I = \frac{E_{ap}}{n_{hs}} \quad (23.7)$$

Sendo:

I - Irradiação global Incidente sobre a superfície do colector por unidade de área [W/m²]

E_{ap} - Energia aproveitável ou energia total teórica incidente por m² [MJ/m²]

n_{hs} - Número de horas de sol [s]



23.6 Rendimento de um colector solar

A energia solar é extraída de um colector através do fluido de transferência térmica, que passa pelo interior do colector, recolhendo parte do calor produzido e transmitindo para outro lugar para ser utilizado ou acumulado. O rendimento do colector solar é a percentagem da energia total incidente que é efectivamente transferida para o fluido de trabalho. Assim o rendimento dum colector solar é função da temperatura a que se encontra.



23.6 Rendimento de um colector solar

O Rendimento térmico obtém-se de:

$$\eta_{(T)} = \frac{q_{ext}}{A_c I} \quad (23.8)$$

A Potência extraída [W/m²] é dada por:

$$q_{ext} = q_{abs} - q_{perdas} (T) \quad (23.9)$$

A Potência absorvida em [W/m²] obtém-se de:

$$q_{abs} = A_c I \tau \alpha \quad (23.10)$$



23.6 Rendimento de um colector solar

As Perdas na placa absorvora em $[\text{W}/\text{m}^2]$ obtém-se como:

$$q_{\text{perdas}} = A_c U(T) (T - t_{\text{amb}}) \quad (23.11)$$

Obtém-se então:

$$\eta_{(T)} = \frac{A_c I \tau \alpha - A U(T) (T - t_{\text{amb}})}{A I} \quad (23.12)$$

Logo:

$$\eta_{(T)} = \tau \alpha - U_L(T) \frac{(T - t_{\text{amb}})}{I} \quad (23.13)$$



23.6 Rendimento de um colector solar

Onde:

A_c - Área útil de captação do colector [m^2]

η - Rendimento do colector [%]

I - Irradiação global Incidente sobre a superfície do colector por unidade de área [W/m^2]

τ - Transmitância da cobertura transparente [adimensional]

α - Absortância da placa absorvora [adimensional]

U_L - Coeficiente global de perdas térmicas do colector [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]

T - Temperatura da placa absorvora [$^\circ C$]

t_{amb} - Temperatura ambiente exterior [$^\circ C$]

F' - Factor de Irrigação [adimensional]



23.6 Rendimento de um coletor solar

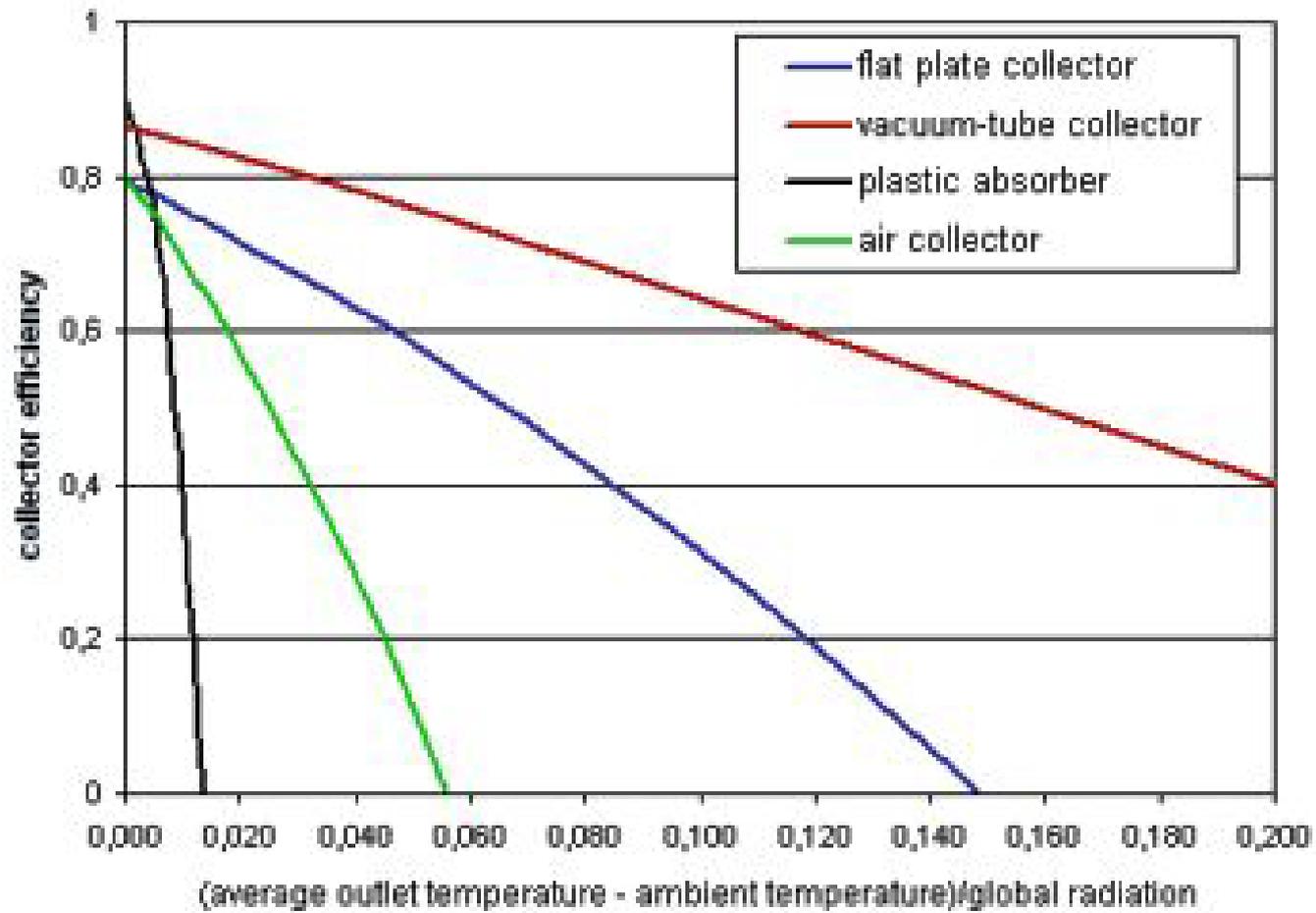


Figura 23.3: Gráfico de eficiência de coletores solares



23.6 Rendimento de um colector solar

Na figura anterior pode ser verificado a diminuição do rendimento do colector à medida que a temperatura média do fluido (t_f) sobe. Se $t^*=0$ (a temperatura média do fluido é igual à temperatura ambiente t_a) o rendimento é designado por rendimento óptico. Quando a temperatura de saída se igualar à temperatura de entrada, o rendimento é nulo e o colector atinge a temperatura de estagnação (máxima temperatura que o colector pode atingir para uma temperatura ambiente e radiação determinadas).



23.6 Rendimento de um colector solar

Da figura nota-se que a ordenada na origem depende apenas das características ópticas de dois elementos: a transmitância (τ) da cobertura transparente e a absorvidade (α) da placa, pelo que se designa por rendimento óptico do vidro e placa (η_o) e relaciona-se com as suas perdas ópticas; sendo o rendimento que o colector apresenta quando a temperatura ambiente é igual à temperatura do fluido e não existem perdas térmicas. Coincide com a ordenada da origem da curva de rendimento. Assim surge que:

$$\eta_o = \tau\alpha \quad (23.14)$$



23.6 Rendimento de um colector solar

Como (T) representa a temperatura da placa, não sendo de utilização prática, pelo que é preferível usar a temperatura média do fluido entre a entrada e a saída (t_f) . Como $t_f < T$, seria obtido um rendimento errado por excesso, pelo que é necessário multiplicá-lo por um factor inferior à unidade, F' (factor de irrigação), sendo este tanto menor quanto maior for a diferença entre (T) e (t_f) , representando assim a facilidade com que o calor se transmite da placa para o fluido e ficando então, como rendimento de um colector a expressão característica do colector:

$$\eta = F' \tau \alpha - F' U_L \frac{(t_f - t_{amb})}{I} \quad (23.15)$$



23.6 Rendimento de um colector solar

Pela expressão apresentada é verificado que as perdas associadas à conversão de energia solar em energia térmica provoca uma progressiva diminuição do rendimento do colector à medida que aumenta a diferença de temperatura entre a placa absorvora e o ambiente, de acordo com a expressão característica do colector. Para um caudal estabelecido e τ , α e U_L constantes, a equação correspondente a esta curva característica pode assemelhar-se com bastante precisão a uma recta. Caso as temperaturas dos colectores não atinjam valores muito elevados ou se a gama de temperaturas de funcionamento rondar os 90 °C a aproximação linear é suficiente.





23.6 Rendimento de um colector solar

Na tabela seguinte serão apresentados alguns rendimentos ópticos e coeficientes de perdas térmicas típicos para os colectores mais comuns no mercado.

Tabela 23.3 – Rendimentos ópticos e coeficientes de perdas térmicas de colectores

Tipo de colector	Características	
	$F'(\tau\alpha)$	$F' \times UL$
Não selectivo sem vidro	0.8 – 0.9	20
Não selectivo	0.7 – 0.8	8 - 9
Selectivo	0.7 – 0.8	3 – 6
C.P.C.	0.7 - 0.75	4.2/3.7 – (NS/EW)*
Tubos de vácuo	0.7 – 0.8	1.8 – 3
* - Orientação Norte-Sul e Este-Oeste		



23.6 Rendimento de um colector solar

A conversão de energia radiante do sol em energia térmica leva associadas perdas de radiação condução e convecção, cujo efeito é a progressiva redução do rendimento à medida que aumenta a diferença de temperatura entre a placa absorvedora e o ambiente, conforme preconiza a expressão característica do colector. A cobertura de vidro, o tratamento selectivo da placa e a evacuação do ar no interior do colector e consequentemente a melhoria da sua eficiência contribuem para aumentar o rendimento dos colectores.

23.6 Rendimento de um colector solar

Como regra geral, o colector solar deve ser escolhido de acordo com a temperatura de utilização pretendida, de acordo com a Tabela 23.4, tendo em conta que o seu rendimento seja superior a 40%.

Tabela 23.4 – temperatura de utilização de colectores solares

Gama de Temperatura	Tipo de colector
< 40 °C	Colectores sem cobertura ou colectores planos comuns de baixo custo
40 – 70 °C	Colectores planos selectivos ou colectores do tipo CPC
70 – 100 °C	Colectores do tipo CPC, colectores de tubos de vácuo ou outros colectores estacionários de rendimento elevado Colectores concentradores para sistemas de média e grande dimensão
> 100 °C	Colectores concentradores, colectores de tubos de vácuo com CPC



23.7 Perdas de calor nos elementos do sistema

Factores que levam a que muitas vezes a energia diária fornecida pelo colector não coincida com a disponibilidade para os resultados pretendidos são devido às perdas que inevitavelmente se verificam nos componentes do sistema, logo ser de extrema importância o estudo quanto ao isolamento a aplicar a estes dispositivos.

Na falta de dados ou quando não se justifique o cálculo específico das perdas de calor é recomendado estimar umas perdas globais ao sistema (P_g) correspondentes a **10%**.

23.8 Cálculo da energia útil

Na posse dos resultados da energia incidente (E_{ap}), do rendimento real do colector (η_r) e das perdas de calor globais do sistema, pode ser calculada a energia diária captada por cada m^2 ($E_{Col.d}$) através da expressão:

$$E_{Col.d} = E_{ap} \eta_r P_g \quad (23.16)$$

Onde:

$E_{Col.d}$ - Energia captada durante o dia por m^2 de colector [MJ/m^2]

E_{ap} - Energia aproveitável ou energia total teórica incidente por m^2 [MJ/m^2]

η_r - Rendimento real do colector [%]

P_g - Percentagem correspondente as perdas globais do sistema [%]



23.8 Cálculo da energia útil

Como é pretendido a energia mensal captada por cada m² efectua-se o produto da ($E_{Col.m}$) pelos dias correspondentes ao mês em causa através da expressão:

$$E_{Col.m} = E_{Col.d} \times \text{dias do mês}_g \quad (23.17)$$

em que:

$E_{Col.m}$ - Energia captada durante o mês por m² de colector [MJ/m²]



23.9 Cálculo da área da superfície colectora

Para o cálculo da área de superfície colectora teórica A_{sc} , efectua-se o quociente das necessidades energéticas mensais ($E_{n.m}$) pela energia captada durante o mês por m^2 de colector ($E_{Col.m}$) conforme a seguinte equação:

$$A_{sc} = \frac{E_{n.m}}{E_{Col.m}} \quad (23.18)$$

Onde:

A_{sc} - Área de superfície colectora teórica [m^2]

$E_{n.m}$ - Necessidades energéticas mensais [MJ]

$E_{Col.m}$ - Energia captada durante o mês por m^2 de colector [MJ/ m^2]



23.9.1 Cálculo do número teórico de colectores

Sabendo-se a área da superfície colectora teórica (A_{sc}) necessária para satisfazer as necessidades energéticas mensais, selecciona-se o colector que melhores características apresente para a utilização em causa, nomeadamente as temperaturas que é capaz de atingir e que estão relacionadas com o rendimento térmico e o coeficiente de perdas. Quanto menores forem as perdas, maiores serão as temperaturas atingidas.



23.9.1 Cálculo do número teórico de colectores

Assim, sabendo a área útil de captação do colector (A_c), calcula-se o número teórico de colectores (N_{ct}) para cada mês, pela expressão seguinte:

$$N_{ct} = \frac{A_{sc}}{A_c} \quad (23.19)$$

Onde:

N_{ct} - Número teórico de colectores necessários [adimensional]

A_{sc} - Área de superfície colectora teórica [m^2]

A_c - Área útil de captação do colector [m^2]

O número real de colectores (N_{cr}) a aplicar no sistema, deve ser tido em conta o número de colectores referentes aos meses com menos irradiação solar. No entanto, deverá ser feito o estudo de forma a atribuir uma quantidade que respeite o factor custo benefício.



23.10 Cálculo da energia efectiva captada por mês

Depois de definido o número real de colectores a aplicar ao sistema solar, calcula-se então a energia efectiva captada por mês ($E_{Col.e}$), pelo produto da energia captada por mês por m^2 de colector ($E_{Col.m}$), área do colector (A_c) e pelo número real de colectores aplicados ao sistema (N_{cr}) pela seguinte expressão:

$$E_{Col.e} = E_{Col.m} \times A_c \times N_{cr} \quad (23.20)$$

Em que:

$E_{Col.e}$ - Energia efectiva captada por mês [MJ/m^2]

$E_{Col.m}$ - Energia captada durante o mês por m^2 de colector [MJ/m^2]

A_c - Área útil de captação do colector [m^2]

N_{cr} - Número real de colectores [adimensional]

