

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 21



Aula 21: Energia Solar – Tecnologias e Dimensionamento



Tópicos

- ***Introdução e histórico***
- ***Formas e aplicações da energia solar***
- ***Equipamentos solares***
- ***Dimensionamento de sistemas solares térmicos***
- ***Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autónomos***

21.1 Introdução

- A Terra recebe do Sol cerca de **10 000 vezes** a energia que a humanidade consome.
- No núcleo do Sol, núcleos de hidrogénio fundem-se em hélio; a superfície está a cerca de **5 800 K**.
- No topo da atmosfera a intensidade é de cerca de **1361 W/m²** (constante solar).
- À superfície, com céu limpo e num plano perpendicular aos raios, chegam cerca de **1000 W/m²**.
- Em **Maputo** a irradiação global média é $\approx 18 \text{ MJ/m}^2$ por dia ($\approx 5 \text{ kWh/m}^2$): de $11,6 \text{ MJ/m}^2$ em Junho a $25,5 \text{ MJ/m}^2$ em Fevereiro (INAM).
- Não é solução única nem definitiva, mas é uma das tecnologias-chave do desenvolvimento sustentável.



21.2 Histórico

- 1839** ● Edmond Becquerel observa o efeito fotovoltaico em eléctrodos de platina e prata iluminados.
- 1873** ● Willoughby Smith descobre a fotocondutividade do selénio.
- 1877** ● Adams e Day: primeiro dispositivo sólido de selénio (rendimento $\approx 0,5\%$).
- 1883** ● Charles Edgar Fritts: primeiras células de selénio de grande área ($\approx 1\%$).
- Fim séc. XIX** ● Ernst Werner von Siemens divulga as células de selénio, usadas depois como fotómetros em fotografia.
- 1954** ● Laboratórios Bell (Chapin, Fuller, Pearson): célula de silício com $\approx 6\%$; em 1955 alimenta uma rede telefónica em Americus (EUA).





21.3 Formas de Energia Solar

Existem duas formas diferentes de utilização da energia solar:

- **Activa:** transformando os raios solares em outras formas de energia: térmica ou eléctrica.
- **Passiva:** aproveitando a energia solar para aquecimento de edifícios ou prédios, através de concepções e estratégias construtivas.

21.3.1 Energia Solar Activa

- Transforma a radiação solar em **calor** (colectores) ou em **electricidade** (painéis fotovoltaicos).
- **Vantagens:** poupança energética e económica que pode ultrapassar 80%; tecnologia amplamente disponível no mercado.
- **Desvantagem:** investimento inicial elevado.

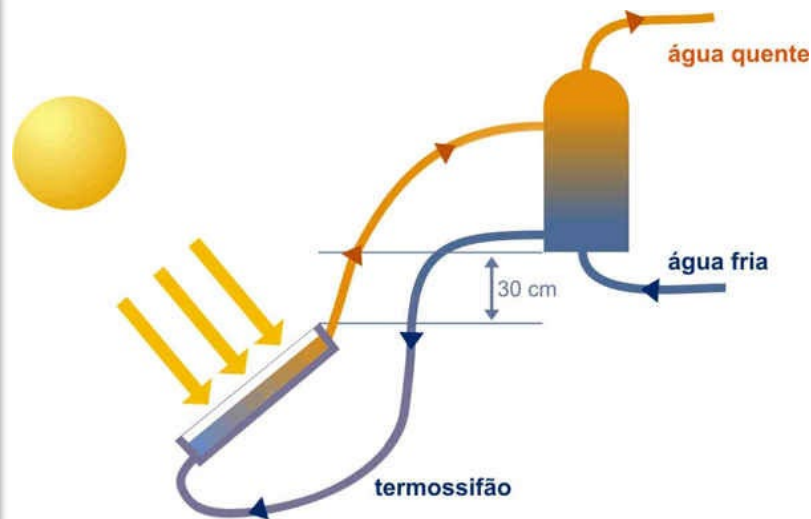
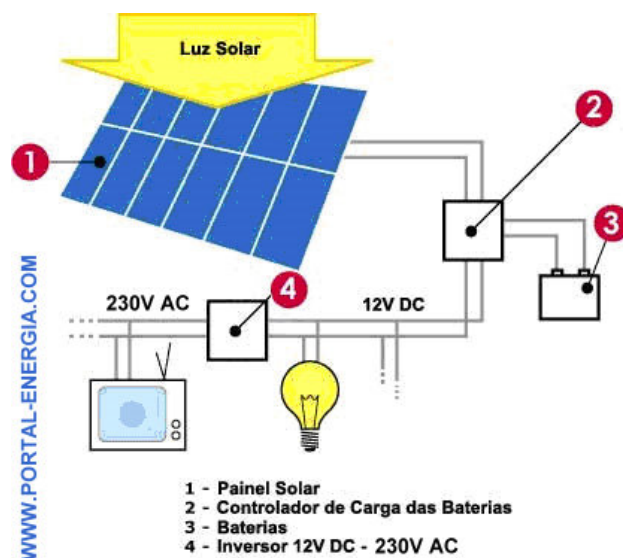


Figura 21.1 – Aproveitamento térmico (em cima) e fotovoltaico (em baixo)



21.3.1 Princípio do Colector Solar

- Um corpo exposto à radiação Q aquece; ao mesmo tempo, perde calor Q_p por radiação, convecção e condução, que crescem com a temperatura.
- Quando as perdas igualam o ganho, atinge-se a **temperatura de equilíbrio** T_c :

$$Q = Q_p \quad (21.1)$$

- Se se extrair continuamente parte do calor (energia útil Q_u), o equilíbrio passa a ser:

$$Q = Q_p + Q_u \quad (21.2)$$



21.3.2 Aplicações Térmicas (1)

- **Água quente sanitária (AQS):** abaixo de 60 °C; com 8 a 10 meses de uso por ano dimensiona-se para as necessidades anuais, evitando excedentes no Verão.
- **Piscinas:** 25 a 35 °C, uso anual ou sazonal.
- **Aquecimento ambiente:** possível, mas útil só 3 a 4 meses por ano, logo menos económico.



Figura 21.2 – Água quente sanitária

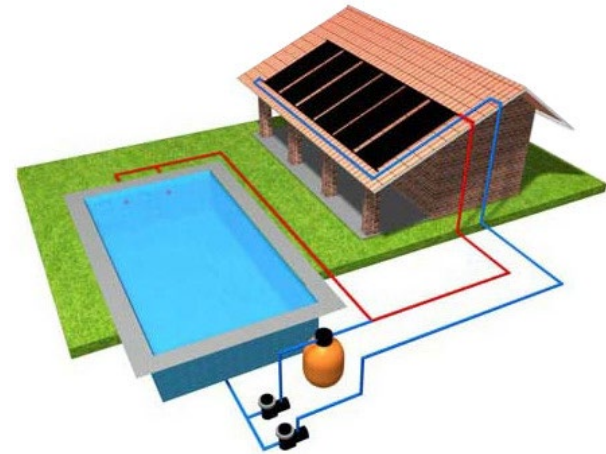


Figura 21.3 – Piscina

21.3.2 Aplicações Térmicas (2)

- **Arrefecimento solar:** máquinas de absorção accionadas a cerca de 80 °C (brometo de lítio/água) ou a cerca de 120 °C (amónia/água). Combinar o arrefecimento no Verão com o aquecimento no Inverno aumenta as horas de utilização dos colectores e, consequentemente, a rentabilidade do sistema.
- **Calor de processo industrial:** fornecimento de água quente ou vapor a temperaturas superiores a 80–100 °C. Com sistemas de concentração, é possível produzir vapor acima de 450 °C para a geração de electricidade (centrais termossolares).
- **Outras aplicações:** estufas, secadores, dessalinizadores, destoxificação de água por radiação UV (fotocatálise) e fogões solares.



21.3.2 Aplicações Térmicas (3)

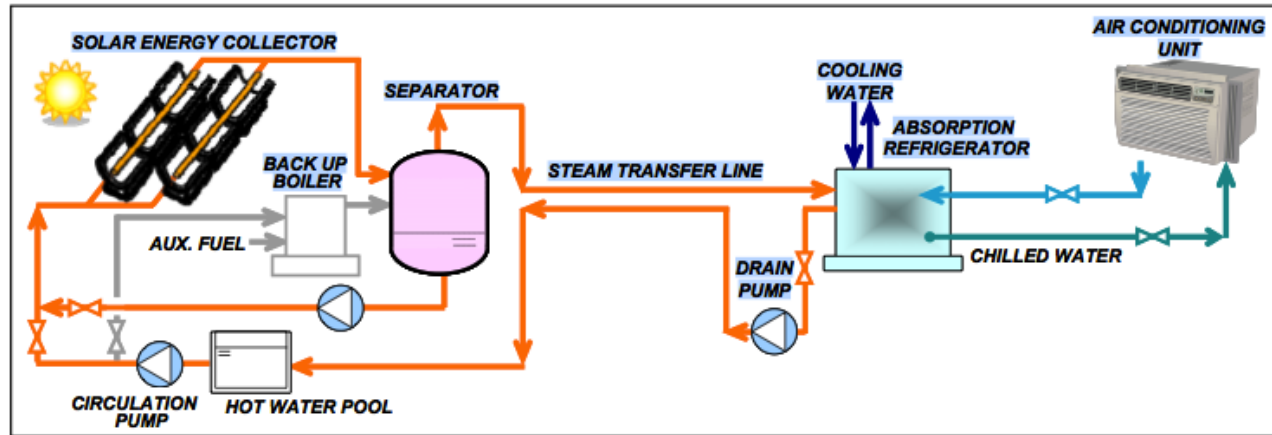


Figura 21.4 – Arrefecimento solar por absorção

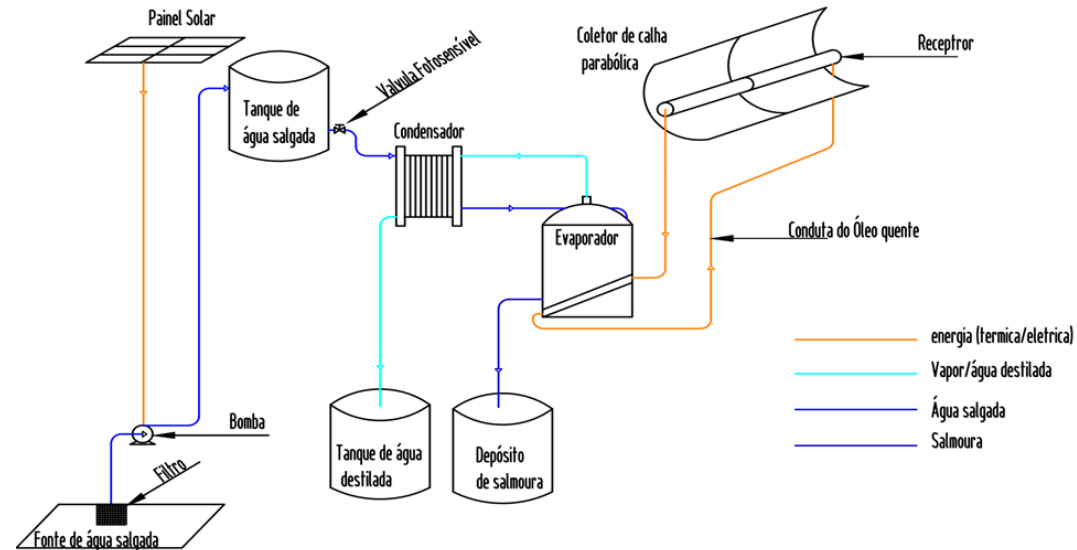


Figura 21.5 – Dessalinização solar (Fonte: Durão, J.)

21.3.3 Energia Fotovoltaica: Princípio

- Num semiconductor, os fotões excitam electrões da banda de valência para a de condução, criando pares electrão-lacuna.
- O campo eléctrico interno da junção separa as cargas antes de se recombinarem: obtém-se corrente contínua (**efeito fotovoltaico**).
- Tecnologias: células discretas (silício cristalino) e película fina integrada.

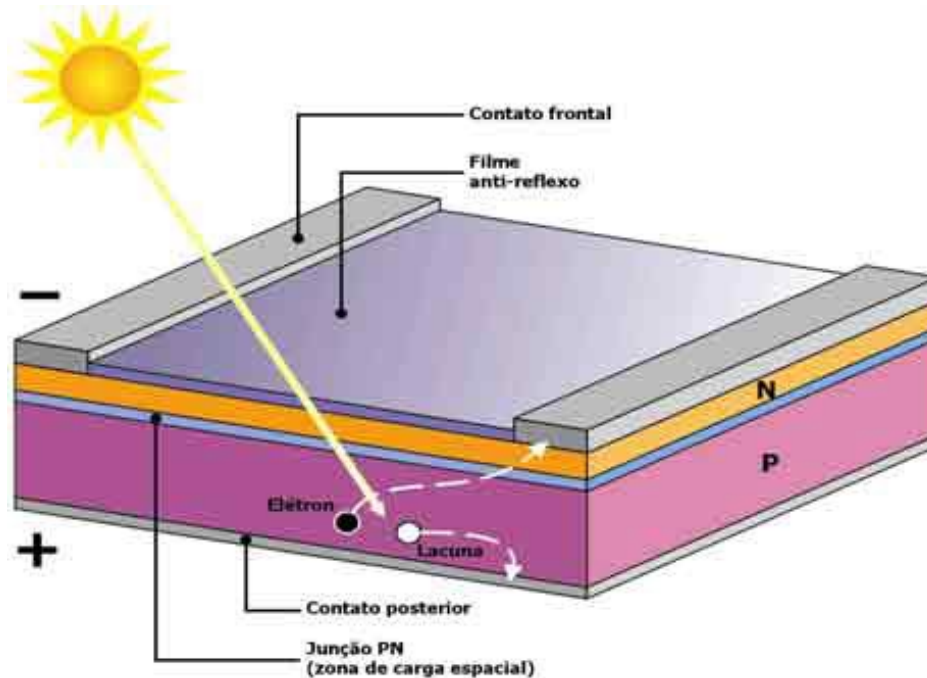


Figura 21.6 – Princípio da célula fotovoltaica



21.3.3 Fotovoltaico: Vantagens e Aplicações

Vantagens

- Quase sem poluição, sem ruído nem partes móveis.
- Pouca manutenção e longa vida útil dos módulos.

Desvantagens

- Rendimento baixo: aproveita mal o espectro solar.
- Custo dos materiais semicondutores, em queda.

Aplicações

- Electrificação de locais remotos, onde a rede é mais cara ou impossível.
- Sistemas autónomos: bombagem de água, sinalização, telecomunicações.
- Veículos e embarcações (em investigação).



Figura 21.7 – Electrificação rural com energia fotovoltaica



21.3.4 Energia Solar Passiva

- Usa-se a energia solar directamente, sem transformação, através do projecto do edifício (aquecimento e iluminação naturais).
- Soluções de baixo custo: um bom planeamento e orientação podem reduzir o consumo de energia em até 40%.
- Aplica-se a edifícios de habitação, escritórios ou indústria.

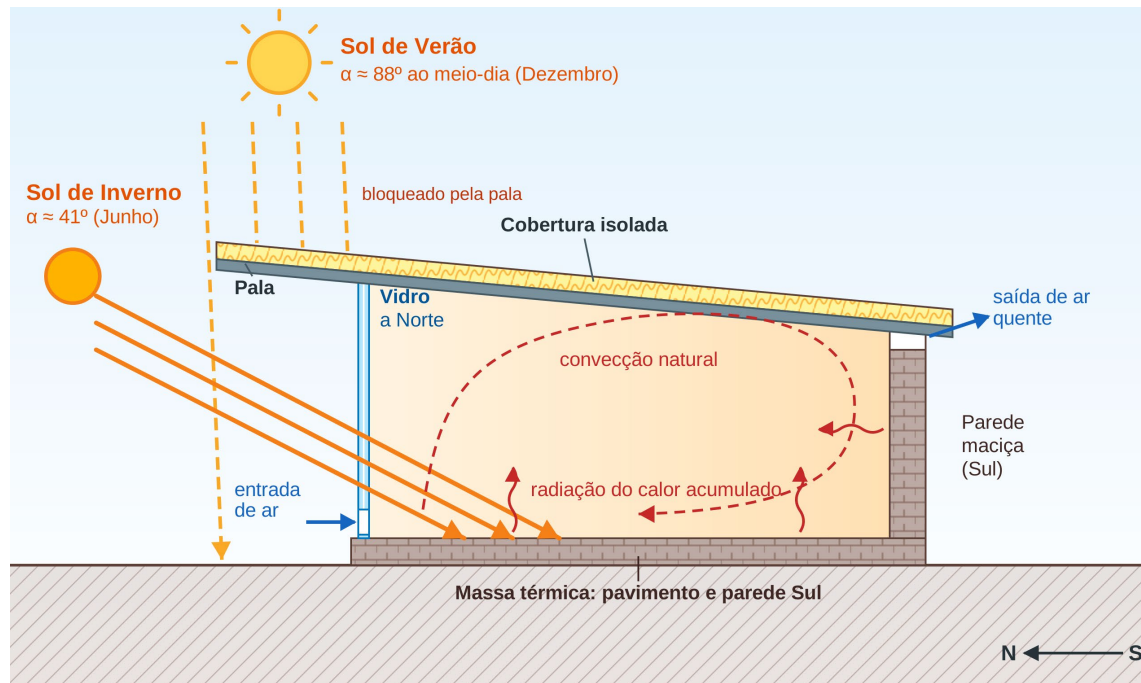


Figura 21.8 – Ganho solar directo com pala, massa térmica e ventilação natural



21.3.4 Energia Solar Passiva: Princípios

O próprio edifício é o "colector": a forma, a orientação, os vãos e os materiais captam, guardam e distribuem a energia solar, sem bombas nem ventiladores.

Captar

vãos
envidraçados
orientados a
Norte

Armazenar

massa térmica:
betão, tijolo,
pedra, água

Distribuir

condução,
convecção
natural e
radiação

Controlar

palas, beirados,
estores e
vegetação

Arrefecer

ventilação
natural e
protecção solar

- **Em Moçambique, o problema principal é o calor:** em Maputo o Verão é quente e húmido e o Inverno é ameno. O objectivo é, sobretudo, evitar ganhos solares no Verão e, apenas secundariamente, aproveitá-los no Inverno.
- No hemisfério Sul o Sol do meio-dia está a **Norte**: a fachada Norte recebe sol baixo no Inverno e é fácil de sombrear no Verão; as fachadas Este e Oeste recebem sol baixo e difícil de controlar.
- Bem aplicadas, estas medidas reduzem em até $\approx 40\%$ o consumo de energia do edifício, com baixo custo adicional.



21.3.4 Estratégias Passivas

Aquecimento e iluminação

- **Ganho directo:** o sol entra pelos vãos a Norte e aquece pavimentos e paredes com massa térmica.
- **Ganho indirecto (parede de Trombe):** parede maciça escura atrás de um vidro, que acumula calor de dia e o liberta à noite.
- **Ganho isolado (estufa ou solário):** espaço envidraçado anexo, separado da zona habitada.
- **Iluminação natural:** janelas altas, clarabóias e prateleiras de luz reduzem a iluminação eléctrica.

Arrefecimento passivo

- **Orientação:** maior dimensão Este-Oeste, fachadas principais a Norte e a Sul; poucos vãos a Este e Oeste.
- **Sombreamento:** palas e beirados a Norte; lâminas verticais a Este e Oeste; árvores e trepadeiras.
- **Ventilação natural:** cruzada (aberturas em fachadas opostas) e efeito chaminé (saída de ar quente pelo alto).
- **Cobertura:** cores claras, isolamento e caixa de ar ventilada.
- **Massa térmica + ventilação nocturna:** arrefecer as paredes à noite para absorverem calor de dia.



21.3.4.1 Dimensionamento de Palas (1)

A pala sobre um vão a Norte deve cortar o sol alto de Verão e deixar entrar o sol baixo de Inverno.

$$\text{Declinação solar:} \quad \delta = 23,45^\circ \sin \left[\frac{360 (284 + n)}{365} \right] \quad (21.3)$$

$$\text{Altura solar ao meio-dia:} \quad \alpha_s = 90^\circ - | \varphi - \delta | \quad (21.4)$$

$$\text{Projeção da pala:} \quad P = \frac{H}{\tan \alpha_s} \quad (21.5)$$

n – dia do ano; φ – latitude (negativa a Sul); H – altura a sombrear abaixo da pala; P – projeção horizontal da pala

Exemplo: janela a Norte, Maputo ($\varphi = -26^\circ$), $H = 1,5 \text{ m}$

Data	α_s ao meio-dia	Janela ao sol
21 Dez ($\delta = -23,45^\circ$)	87,5°	0% (toda à sombra)
21 Mar/Set ($\delta = 0^\circ$)	64,0°	0% → define P
21 Jun ($\delta = +23,45^\circ$)	40,6°	58%

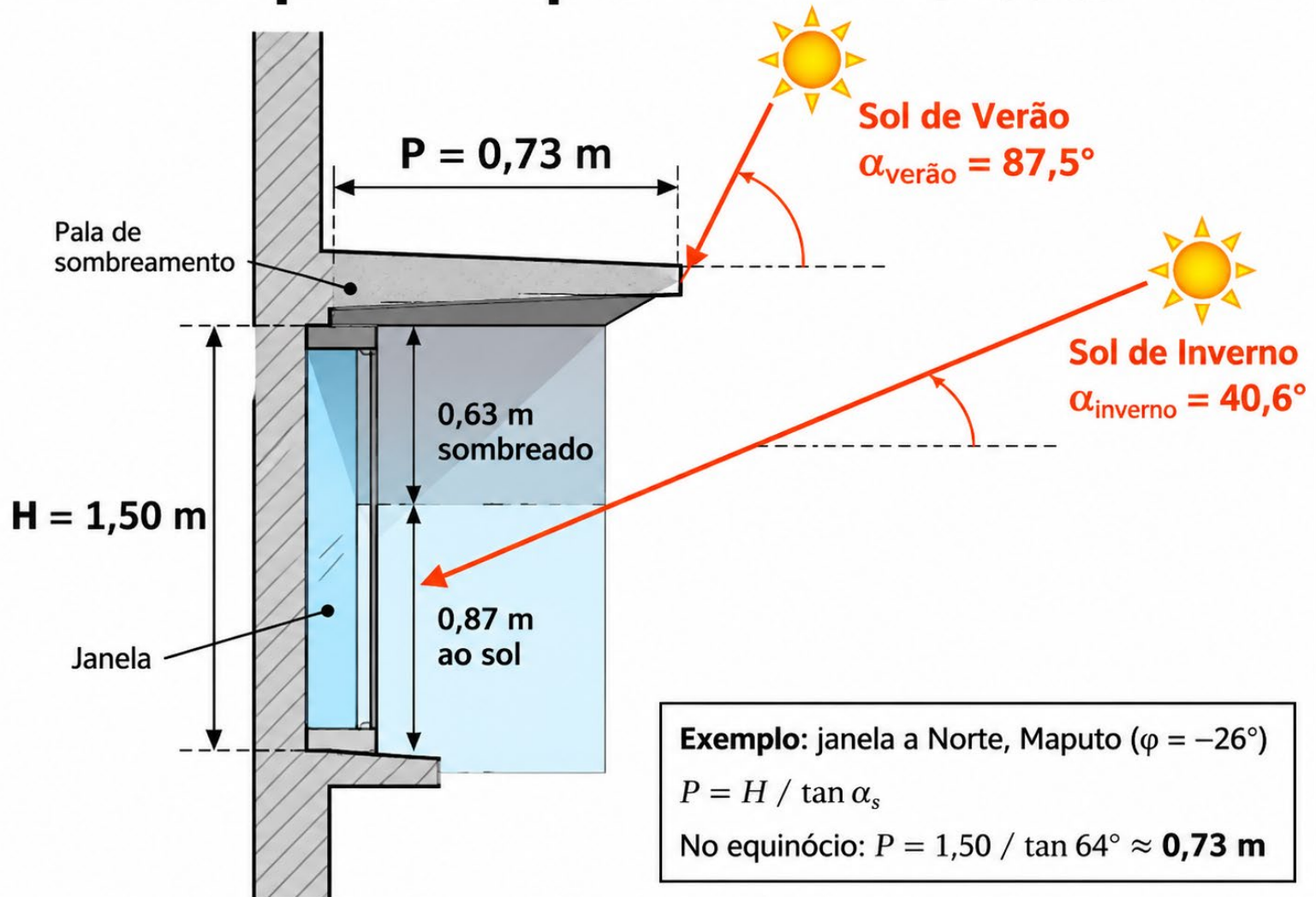
$$P = 1,5 / \tan 64^\circ \approx \mathbf{0,73 \text{ m}}$$

No Inverno a pala só sombreia 0,63 m do topo; entram 0,87 m de sol, Este e Oeste: o sol é baixo; usar lâminas verticais ou vegetação.



21.3.4.1 Dimensionamento de Palas (2)

Esquema da pala com dimensões



21.4 Equipamentos Solares: Colector Plano

É o colector solar mais utilizado para aquecimento de água, geralmente a temperaturas inferiores a **60 °C**. Capta a radiação solar, transforma-a em calor e transfere-o para um fluido que circula no seu interior.

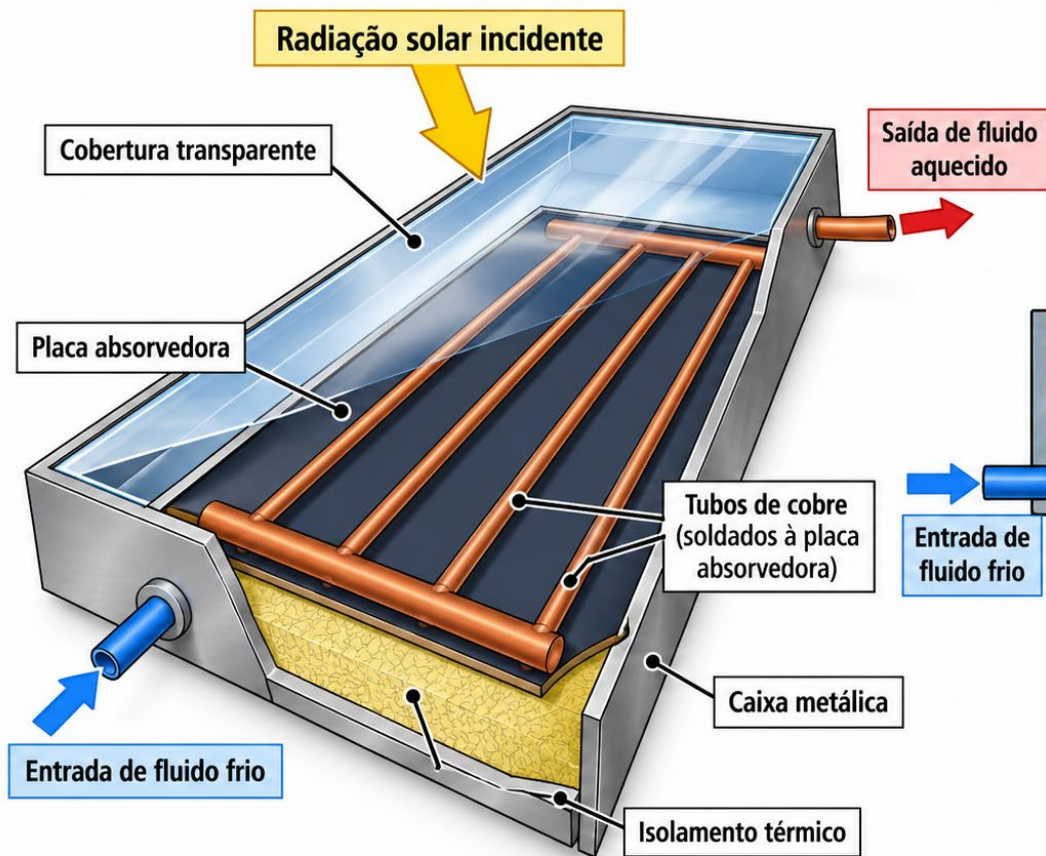
Principais componentes:

- **Cobertura transparente:** permite a entrada da radiação solar, reduz as perdas térmicas por convecção e radiação e protege o interior contra agentes atmosféricos.
- **Placa absorvedora:** converte a radiação solar em calor e transmite-o aos tubos. Os revestimentos selectivos aumentam a absorção e reduzem as perdas por radiação.
- **Tubos de circulação:** conduzem o fluido térmico, que recebe o calor da placa absorvedora e o transporta para o sistema de utilização.
- **Caixa com isolamento térmico:** reduz as perdas de calor pela base e pelas paredes laterais, assegurando a rigidez e a protecção dos componentes.



21.4 Equipamentos Solares: Colector Plano

Vista em perspectiva (em corte)



Secção transversal simplificada

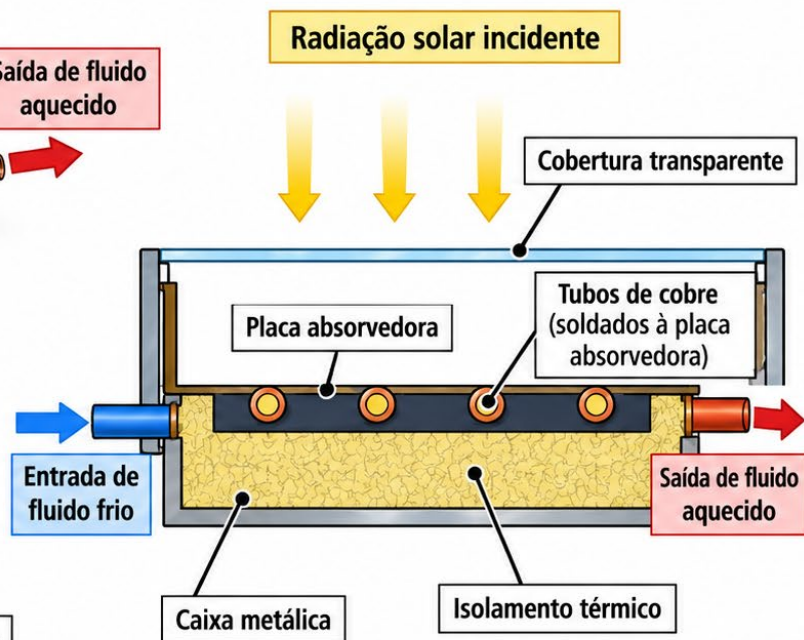


Figura 21.9 – Colector solar plano

21.4 Tubos de Vácuo e Outros Colectores

- **Tubos de vácuo:** absorvedor metálico dentro de tubos de vidro sem ar; elimina a convecção e mantém bom rendimento a temperaturas altas.
- **Colector de ar:** aquece ar para ambientes ou secagem de produtos agrícolas.
- **Absorvedor plástico:** barato, para piscinas e baixas temperaturas.

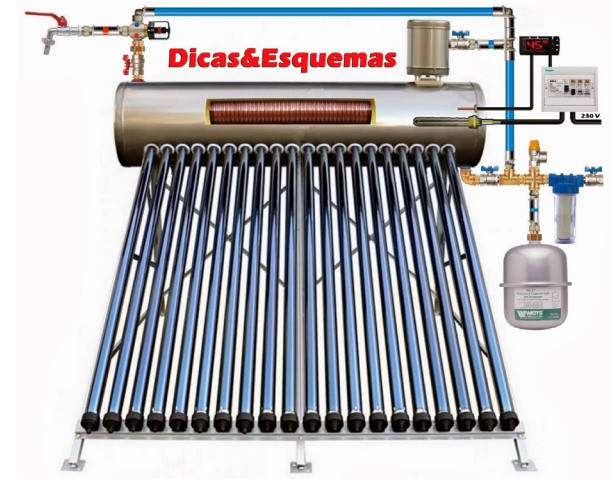
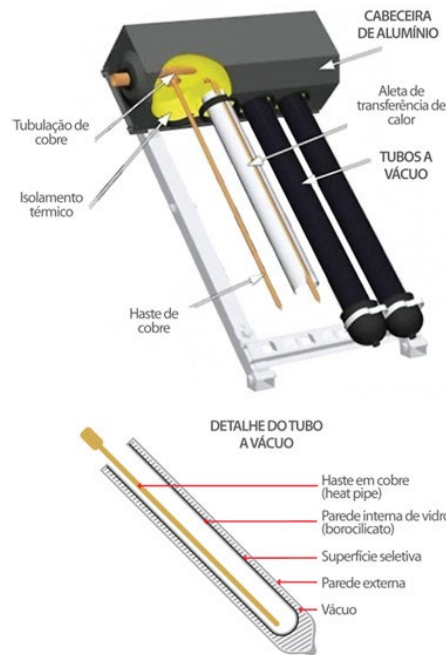


Figura 21.10 – Colectores de tubos de vácuo

21.4 Sistemas de Concentração

Espelhos ou lentes concentram a radiação directa num receptor; exigem seguimento do Sol.

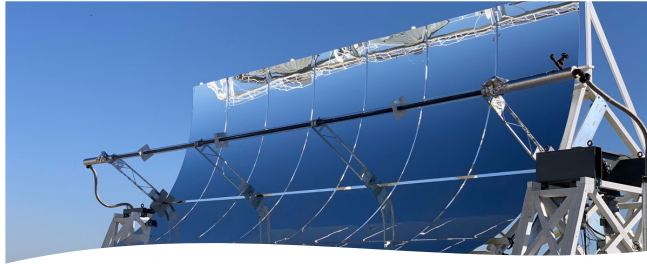
Tabela 21.1 – Tecnologias de concentração solar

Tecnologia	Princípio	Fluido	Temperatura	Aplicação
Calha parabólica	Espelhos em calha focam num tubo receptor	Óleo térmico, vapor, sais fundidos	150–400 °C	Centrais médias e grandes
Torre solar	Heliostatos reflectem para um receptor no topo da torre	Ar, sais fundidos, vapor	500–1000 °C	Electricidade em grande escala
Disco parabólico	Foco pontual num receptor com motor Stirling	Hidrogénio, hélio, ar	500–1200 °C	Pequena escala, descentralizada
Fresnel linear	Espelhos planos focam num tubo fixo	Água/vapor, óleo	200–450 °C	Centrais médias, mais baratas
CPV	Lentes ou espelhos sobre células multijunção	— (eléctrico)	$2\times$ a $>1000\times$ sóis	Locais com muita radiação directa





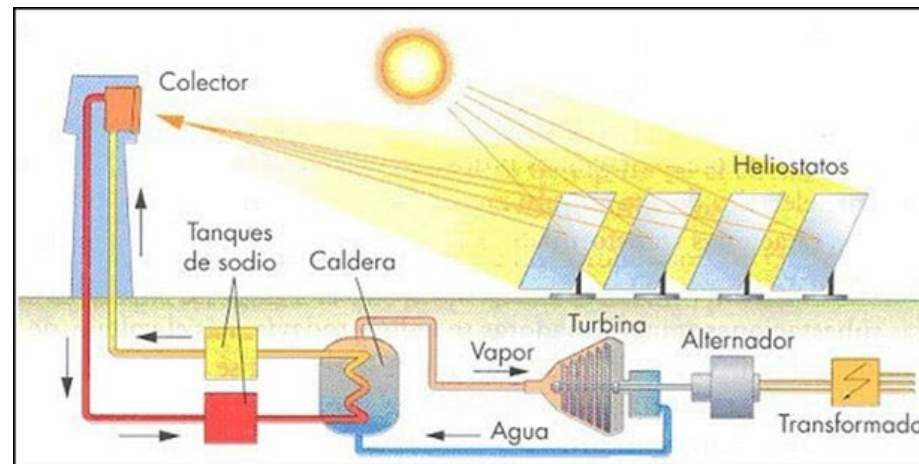
21.4 Sistemas de Concentração



a) Calha parabólica



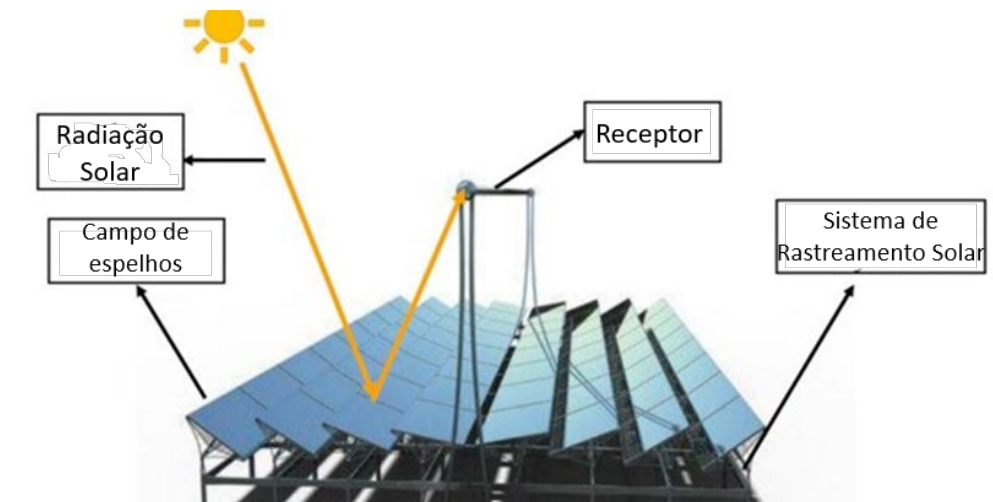
c) Disco parabólico



b) Torre solar

Figura 21.11 – Tecnologias de concentração solar

21.4 Sistemas de Concentração



d) Fresnel linear



e) CPV

Figura 21.11 – Tecnologias de concentração solar



21.5 Sistemas Térmicos: Circuito Hidráulico

- **Directo:** a água de consumo circula nos colectores.
- **Indirecto:** o fluido térmico circula em circuito fechado e cede o calor à água através de um permutador.

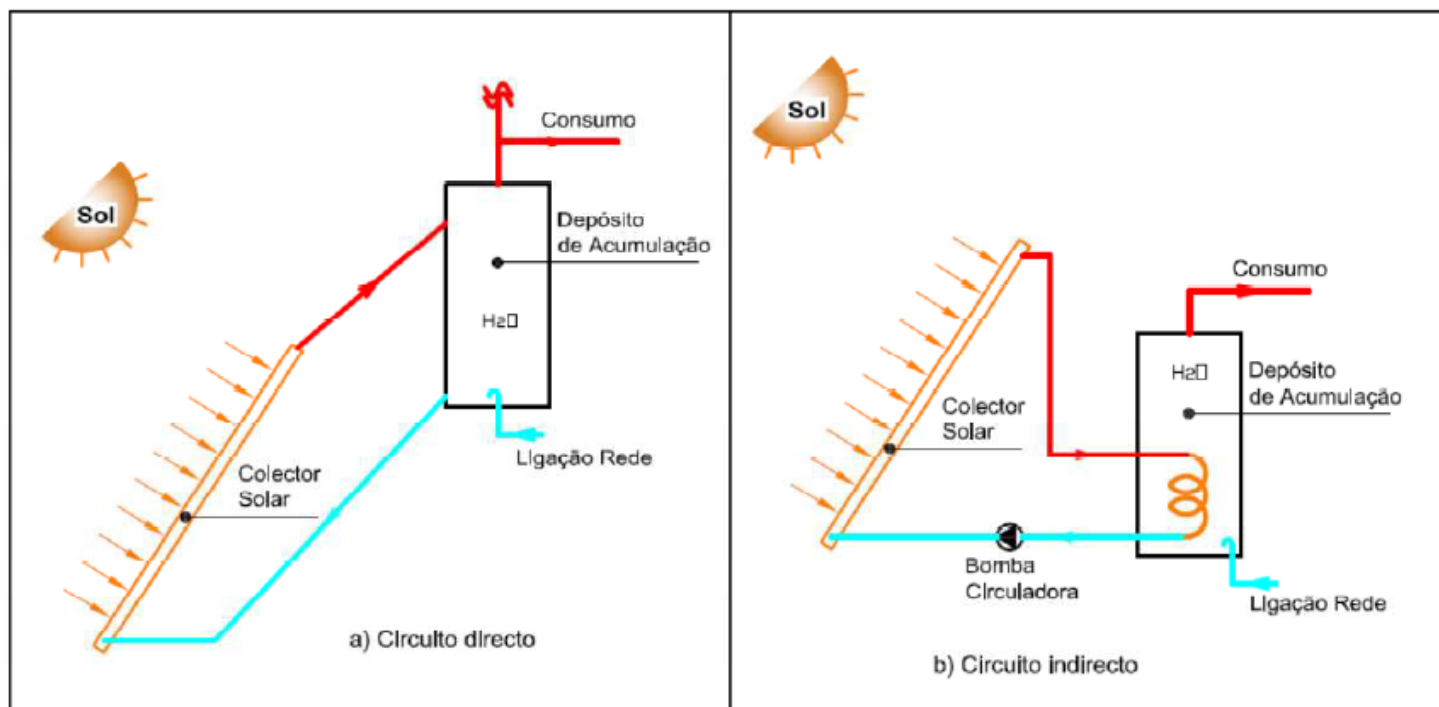


Figura 21.12 – Circuito directo (a) e indirecto (b)

21.5.1 Termossifão e Circulação Forçada

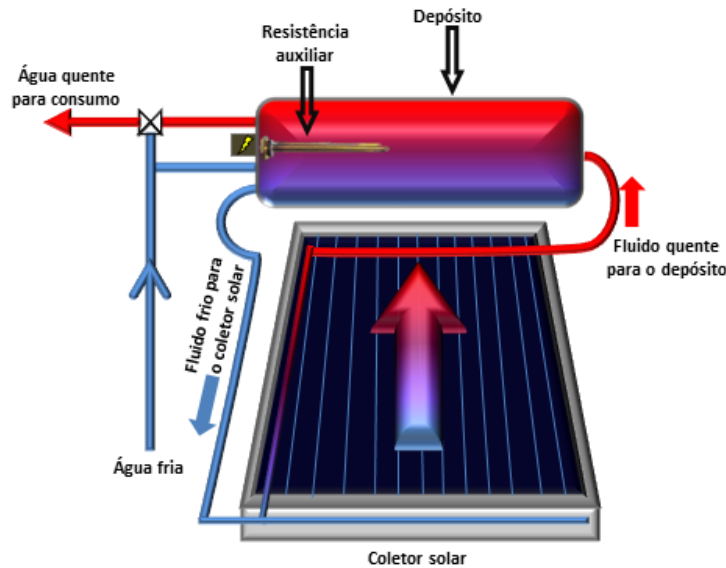


Figura 21.13 – Termossifão

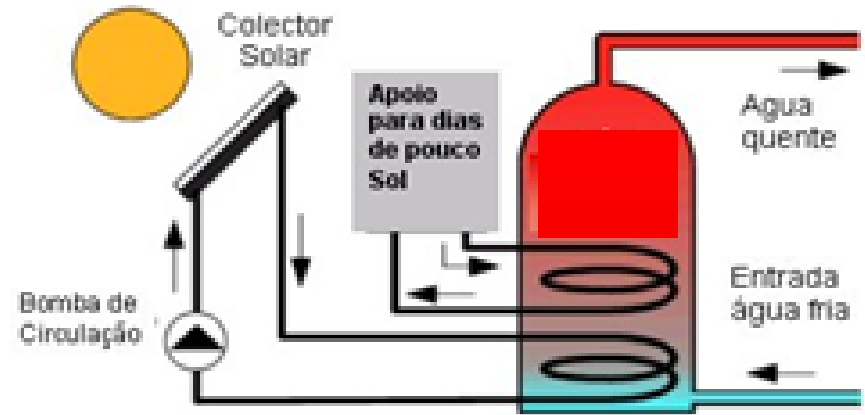


Figura 21.14 – Circulação forçada

- **Termossifão:** o fluido aquecido, menos denso, sobe para o depósito; o depósito tem de ficar acima do coletor, senão dá-se o termossifão invertido à noite.
- **Circulação forçada:** bomba comandada por um controlador diferencial, que a liga quando a temperatura no coletor excede a do depósito em $\approx 5^\circ\text{C}$; o depósito pode ficar em qualquer posição.



21.6 Dimensionamento: Marcha de Cálculo

1. Necessidades energéticas $Q = m c_p \Delta t$ $E_{n,m} = Q \times \text{dias}$ (21.6–21.8)

2. Inclinação dos colectores $I_{\text{óptima}} = Lat + \hat{a}ng_{\text{utiliz}}$ (21.9)

3. Energia aproveitável $E_{ap} = H \cdot Coef \cdot f \cdot 0,94$ (21.10–21.11)

4. Intensidade útil $I = \frac{E_{ap}}{n_{hs}}$ (21.12)

5. Rendimento do colector $\eta = F' \tau \alpha - F' U_L \frac{t_f - t_{amb}}{I}$ (21.20)

6. Energia útil por m² $E_{Col.m} = E_{ap} \eta_r (1 - P_g) \times \text{dias}$ (21.21–21.22)

7. Área colectora $A_{sc} = \frac{E_{n,m}}{E_{Col.m}}$ (21.23)

8. Número de colectores $N_{ct} = \frac{A_{sc}}{A_c} \rightarrow N_{cr}$ (21.24)



21.6.1 Necessidades Energéticas

Consumo diário (Tabela 21.2, a 60 °C) convertido para a temperatura de utilização de 45 °C:

$$\text{Consumo equivalente} = \text{Consumo diário}_{(T_{ref})} \times \left(\frac{T_{ref} - T_{rede}}{T_{utiliz} - T_{rede}} \right) [\text{litros}] \quad (21.6)$$

Energia diária a fornecer: $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t [J]$ (21.7)

Necessidades mensais: $E_{n,m} = Q_{solar} \times n_h \times \text{dias do mês}$ (21.8)

m – consumo equivalente a 45 °C [$L \approx kg$]

c_p – calor específico da água (4,186 kJ/kg·°C)

$\Delta t = T_{utilização} - T_{rede} = 45 - T_{rede} [^{\circ}C]$

Q – energia diária necessária [J]

Q_{solar} – potência térmica média necessária [W]; n_h – tempo diário de funcionamento [s], de modo que $Q_{solar} \cdot n_h = Q$

$E_{n,m}$ – necessidades energéticas mensais [J $\rightarrow$ MJ]



21.6.1 Necessidades Energéticas

Tabela 21.2 – Consumos diários de referência a 60 °C (referência portuguesa)

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



21.6.2 Inclinação e Orientação dos Colectores

- Ângulo fixo para todo o ano; favorece-se o Inverno, pois no Verão há energia em excesso.
- Em Moçambique (hemisfério Sul) os colectores orientam-se para **Norte**.
- Para AQS em Maputo ($\approx 26^\circ$ S): $I_{\text{ótima}} \approx 26 - 5 = 21^\circ$.

$$I_{\text{ótima}} = Lat + (\hat{ang}_{\text{utiliz}}) \quad (21.9)$$

Tabela 21.3 – 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 $+15^\circ$
Verão (Piscinas descobertas/ hotéis de temporada)	Latitude do lugar -15°



21.6.3 Energia Aproveitável

1. **H** – irradiação global horizontal média do mês (tabelas climáticas) [MJ]/m²].
2. **Correcção do local:** ×1,05 montanha com atmosfera limpa; ×0,95 zona poluída ou grande cidade; reduzir se houver sombras.
3. **f** – factor de inclinação, de tabelas de latitude/inclinação para cada mês.
4. × **0,94** – desconta ≈ 6% de energia perdida no início e no fim do dia, quando o sol está baixo.
5. **Desvio da orientação Norte** de β ($20^\circ < \beta < 70^\circ$): multiplicar E_{ap} por $(1,14 - 0,0085\beta)$.

$$H_{Corrigida} = H \times Coef_{Correcção} \quad (21.10)$$

$$E_{ap} = H_{Corrigida} \times f \times 0,94 \quad (21.11)$$



21.6.4 Intensidade Útil

Intensidade média sobre o colector durante as horas úteis de sol:

$$I = \frac{E_{ap}}{n_{hs}} \quad (21.12)$$

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]



21.6.5 Rendimento do Colector Solar

Fracção da radiação incidente transferida para o fluido; diminui quando a temperatura do colector sobe.

O Rendimento térmico obtém-se de:

$$\eta_{(T)} = \frac{q_{ext}}{A_c I} \quad (21.13)$$

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

$$q_{ext} = q_{abs} - q_{perdas}(T) \quad (21.14)$$

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

$$q_{abs} = A_c I \tau \alpha \quad (21.15)$$



21.6.5 Rendimento do Colector Solar

As Perdas na placa absorsora em $[W/m^2]$ obtém-se como:

$$q_{perdas} = A_c U(T)(T - t_{amb}) \quad (21.16)$$

Obtêm-se então:

$$\eta_{(T)} = \frac{A_c I \tau \alpha - A U(T)(T - t_{amb})}{A I} \quad (21.17)$$

Logo:

$$\eta_{(T)} = \tau \alpha - U_L(T) \frac{(T - t_{amb})}{I} \quad (21.18)$$



21.6.5 Rendimento do 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 absorsora [adimensional]

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

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

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

F' - Factor de Irrigação [adimensional]



21.6.5 Curva de Rendimento

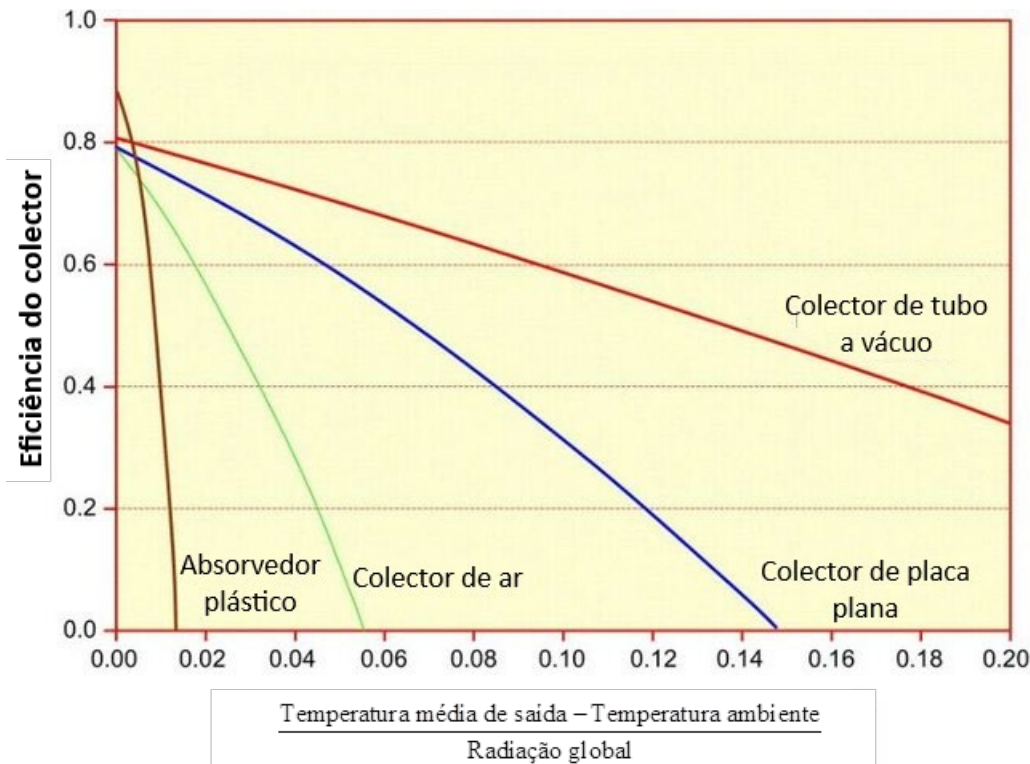


Figura 21.15 – Curvas de rendimento de coletores solares

- Na origem ($t^* = 0$, fluido à temperatura ambiente):
rendimento óptico
 η_0 .
- η diminui quando a temperatura média do fluido t_f sobe.
- $\eta = 0$: **temperatura de estagnação**, a máxima que o coletor atinge.



21.6.5 Rendimento Óptico e Factor de Irrigação

- **Rendimento óptico:** depende apenas da transmitância τ do vidro e da absorptância α da placa.
- Na prática, usa-se a temperatura média do fluido $t_f < T$; corrige-se com o **factor de irrigação** $F' < 1$.
- A recta característica é válida até $\approx 90^\circ\text{C}$; vidro, superfície selectiva e vácuo reduzem as perdas U_L .

$$\eta_o = \tau\alpha \quad (21.19)$$

$$\eta = F'\tau\alpha - F'U_L \frac{(t_f - t_{amb})}{I} \quad (21.20)$$



21.6.5 Características dos Colectores

Valores típicos de rendimento óptico $F'(\tau\alpha)$ e de perdas $F'U_L$ [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]:

Tabela 21.4 – Rendimentos ópticos e coeficientes de perdas térmicas de colectores

Tipo de colector	Características	
	$F'(\tau\alpha)$	$F' \times U_L$
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		



21.6.5 Escolha do Tipo de Colector

Escolhe-se o colector pela temperatura de utilização, garantindo rendimento superior a 40%:

Tabela 21.5 – 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



21.6.6 Perdas e Energia Útil

- Perdas nos componentes (tubagens, depósito): na falta de cálculo específico, $P_g \approx 10\%$.
- Energia captada por m^2 de colector, por dia e por mês:

$$E_{Col.d} = E_{ap} \eta_r (1 - P_g) \quad (21.21)$$

$$E_{Col.m} = E_{Col.d} \times \text{dias do mês}_g \quad (21.22)$$

$E_{Col.d}$ – energia captada por dia e por m^2 de colector $[MJ/m^2]$

E_{ap} – energia aproveitável por m^2 $[MJ/m^2]$

η_r – rendimento real do colector

P_g – perdas globais do sistema ($\approx 0,10$)

$E_{Col.m}$ – energia captada no mês por m^2 de colector $[MJ/m^2]$



21.6.7 Área Colectora e Número de Colectores

Calcula-se para cada mês; o número real N_{cr} escolhe-se atendendo aos meses de menor irradiação e ao custo-benefício.

$$A_{sc} = \frac{E_{n.m}}{E_{Col.m}} \quad (21.23)$$

$$N_{ct} = \frac{A_{sc}}{A_c} \quad (21.24)$$

$$E_{Col.e} = E_{Col.m} \times A_c \times N_{cr} \quad (21.25)$$

A_{sc} – área colectora teórica [m^2]; $E_{n,m}$ – necessidades mensais [MJ]

$E_{Col.m}$ – energia captada no mês por m^2 de colectador [MJ/ m^2]

A_c – área útil de um colectador [m^2]

N_{ct} – número teórico de colectores; N_{cr} – número real (inteiro)

$E_{Col.e}$ – energia efectiva captada no mês [MJ]



Exemplo 21.1 – AQS para uma Família em Maputo

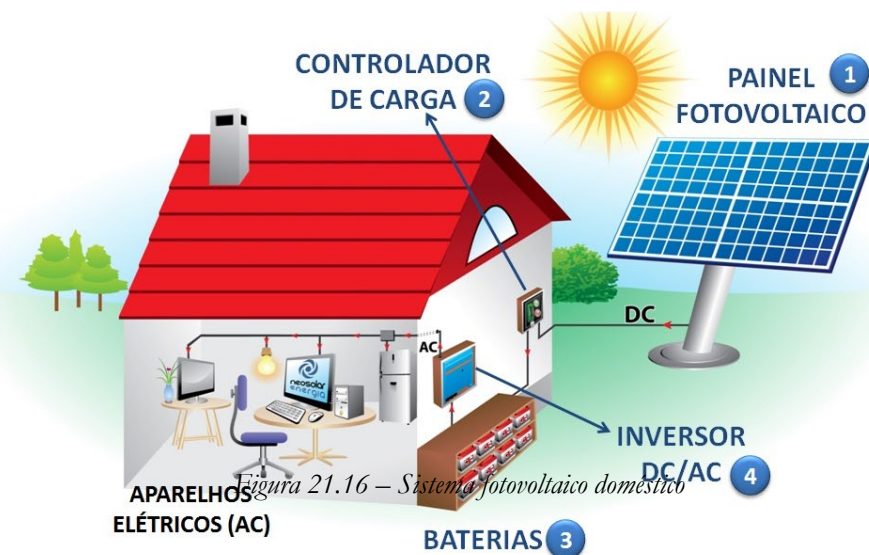
Moradia com 4 pessoas; mês de dimensionamento: **Junho** (menor irradiação); água da rede a 20 °C; colector plano selectivo de 2,0 m² orientado a Norte.

Passo	Cálculo	Resultado
Consumo a 60 °C	$4 \times 30 \text{ L}$	120 L/dia
Consumo a 45 °C (21.6)	$120 \times (60 - 20) / (45 - 20)$	192 L/dia
Energia diária (21.7)	$192 \times 4,186 \times 25$	20,1 MJ/dia
Necessidades de Junho (21.8)	$20,1 \times 30$	603 MJ
Inclinação (21.9)	$26^\circ - 5^\circ$	21°, a Norte
Energia aproveitável (21.10–21.11)	$11,6 \times 0,95 \times 1,30 \times 0,94$	13,47 MJ/m ² ·dia
Intensidade (21.12)	$13,47 \cdot 10^6 / (8 \times 3600)$	468 W/m ²
Rendimento (21.20)	$0,75 - 4,5 \times (40 - 22) / 468$	57,7%
Energia útil (21.21–21.22)	$13,47 \times 0,577 \times 0,90 \times 30$	210 MJ/m ²
Área e nº de colectores (21.23–21.24)	$603 / 210 = 2,87 \text{ m}^2; / 2,0$	$N_{ct} = 1,44 \rightarrow 2$

Com 1 colector cobre-se ≈ 70% de Junho; com 2, toda a necessidade (excedente no Verão).

21.7 Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

- Alimentam cargas isoladas da rede todo o ano; dimensionam-se para o mês com menos horas de sol.
- **(1) Módulos FV** – produzem energia eléctrica em CC.
- **(2) Regulador de carga** – gere a carga e protege as baterias.
- **(3) Baterias** – alimentam as cargas à noite e em dias sem sol.
- **(4) Inversor** – converte CC em CA (230 V, 50 Hz).
- Casos simples dimensionam-se à mão; uma moradia de 4–5 pessoas justifica software.



21.7 Configurações do Sistema Autónomo

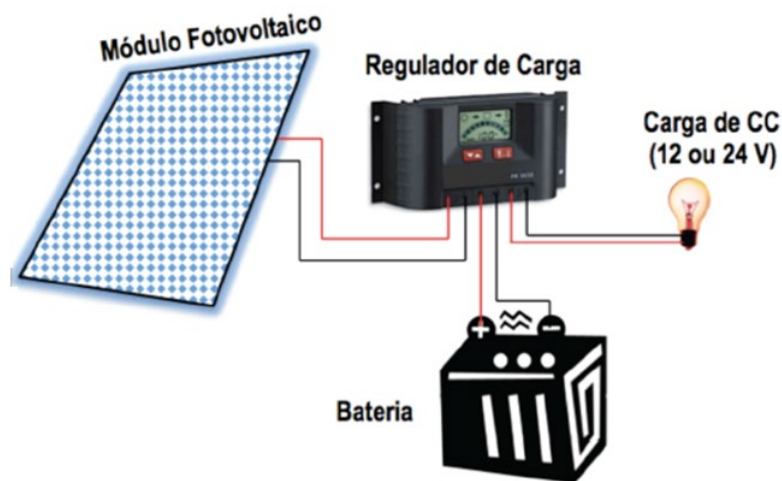


Figura 21.17 – Sistema só com cargas CC

Só cargas CC (12, 24 ou 48 V):
módulos + regulador + baterias.
Sem inversor: sistema mais
económico e eficiente.

Cargas CC e CA (230
V, 50 Hz): acrescenta-se
o inversor. As baterias
ficam em paralelo com
o fluxo de energia.

Figura 21.18 – Sistema com cargas CC e CA



21.7 Dimensionamento: Marcha de Cálculo

1. Energia diária e mensal $W_D = \sum P_i t_i$ $W_M = W_D \times \text{dias}$ (21.26)

2. Rendimento do sistema $\eta_{sist} = \eta_{cabo} \eta_{reg + inv} \eta_{bat} \approx 0,66$ (§ 21.7.2)

3. Produção do mês desfavorável $E_M = \min (E_{M, \text{mês}})$ (Tab. 21.7)

4. Potência do gerador $P_{FV} = \frac{W_M}{\eta_{sist} E_M}$ (21.27)

5. Módulos em série e fileiras $N_S \geq \frac{V_{bat}}{V_{\max}}$ $N_F = \frac{P_{FV}}{N_S P_m}$ (21.28, 21.31)

6. Capacidade das baterias $C_B = \frac{W_D N_d}{U K_{bat} K_D}$ (21.33)

7. Regulador de carga $I_T = \frac{P_{FV}}{V_{DC}}$ $I_{\max DC} \geq I_T$ (21.34–21.35)

8. Inversor $P_{inv} > \sum P_i (+20\text{--}25\%)$ (21.37)



21.7.1 Energia Diária Consumida

Para cada equipamento: número, potência P_i e horas de uso t_i .

Tabela 21.6 – Estimativa do consumo diário de energia

Equipamentos	Número	Horas de uso/dia	Potência (W)	Energia diária (Wh/dia)
Lâmpadas de leitura				
Frigorífico				
Televisão				
Computador				
TOTAIS			ΣP_i	W_D

$$W_D = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i \left[\frac{kWh}{dia} \right] \quad (21.26)$$

$$W_M = W_D \times dias \text{ do mês} \left[\frac{kWh}{mês} \right]$$

W_D , W_M – energia consumida por dia e por mês [kWh]; P_i – potência do equipamento i [W]; t_i – horas de uso por dia



21.7.2 Rendimento do Sistema

As principais perdas estão nas cablagens, no regulador e inversor e na bateria:

- Cablagens: $\eta_{\text{cabo}} = 0,97$
- Regulador + inversor: $\eta_{\text{reg+inv}} = 0,85$
- Bateria: $\eta_{\text{bat}} = 0,80$

$$\eta_{\text{sist}} = \eta_{\text{cabo}} \times \eta_{\text{reg+inv}} \times \eta_{\text{bat}} = 0,97 \times 0,85 \times 0,80 \approx \mathbf{0,66}$$

Como a radiação varia muito ao longo do ano, o gerador dimensiona-se para o **mês mais desfavorável**.



21.7.3 Radiação Solar Disponível em Maputo

- Dados mensais por local: **PVGIS** (re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools) ou **NASA POWER** (power.larc.nasa.gov).
- Módulos orientados a **Norte**, com inclinação fixa $\approx 24^\circ$ (próxima da latitude).
- Usa-se a produção E_M do mês mais desfavorável (Inverno).

Tabela 21.7 – Produção FV média em Maputo por kW instalado (inclinação óptima fixa)

Estação	kWh/dia por kW	E_M [kWh/(kW·mês)]
Verão	6,14	184
Outono	5,48	164
Inverno	4,31	129
Primavera	5,71	171

Fonte: profileSOLAR, a partir de dados NASA POWER ($-25,97^\circ$; $32,60^\circ$); E_M para 30 dias. Irradiação global medida (INAM): de $11,6 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ em Junho a $25,5 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ em Fevereiro.

21.7.4 Potência do Gerador FV

O gerador FV deve satisfazer o consumo (Tabela 21.6) no mês de menor produção E_M (Tabela 21.7):

$$P_{FV} = \frac{W_M}{\eta_{sistema} \times E_M} [kW] \quad (21.27)$$

η_{sist} – rendimento do sistema ($\approx 0,66$)

W_M – energia consumida por mês [kWh/mês]

E_M – produção mensal de 1 kW instalado no mês desfavorável [kWh/(kW·mês)]



21.7.5 Tensão do Sistema e Módulos em Série

- Tensão do sistema V_{DC} : até 1 kWh/dia → **12 V**; 1 a 4 kWh/dia → **24 V**; mais de 4 kWh/dia → **48 V**.
- Em série as tensões somam-se e a corrente mantém-se.
- A tensão do gerador deve ser igual ou superior à da bateria, que ele tem de carregar:

$$N_s > \frac{V_{bat}}{V_{max}} \quad (21.28)$$

Onde:

V_{bat} Tensão em corrente contínua da bateria (V)

V_{max} corresponde à tensão máxima do módulo medida em condições padrão.



21.7.6 Fileiras em Paralelo

Em paralelo as correntes somam-se e a tensão mantém-se.

Corrente total:
$$I_T = N_F \times I_{\max} \Rightarrow N_F = \frac{I_T}{I_{\max}} \quad (21.29)$$

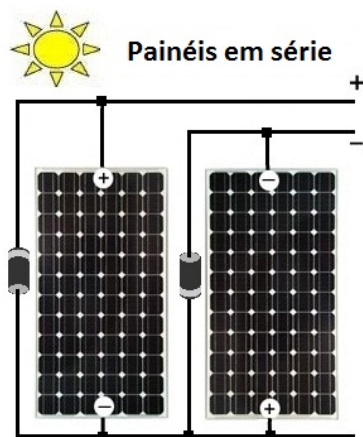
Potência do gerador:
$$P_{FV} = (N_S \cdot V_{\max}) \times I_T \Rightarrow I_T = \frac{P_{FV}}{N_S \times V_{\max}} [A] \quad (21.30)$$

Número de fileiras:
$$N_F = \frac{P_{FV}}{N_S \times V_{\max} \times I_{\max}} = \frac{P_{FV}}{N_S \times P_m} \quad (21.31)$$

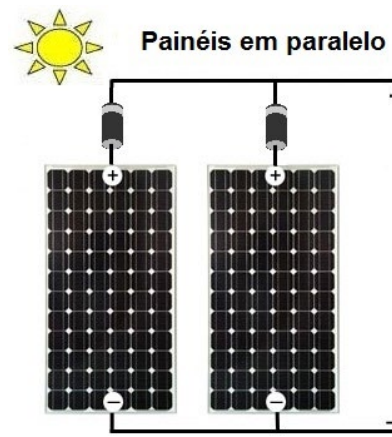
N_F – número de fileiras em paralelo; N_S – módulos em série por fileira
 $V_{\max}, I_{\max}$ – tensão e corrente no ponto de potência máxima do módulo (ficha técnica)
 P_m – potência nominal do módulo [W]; P_{FV} – potência do gerador [W]



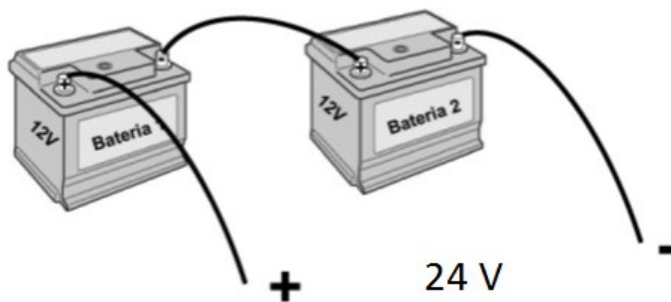
21.7.6 Associação em Série e em Paralelo



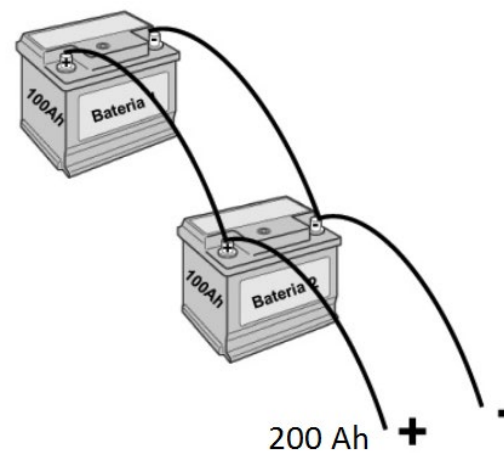
Módulos em série: tensões somam-se



Módulos em paralelo: correntes somam-se



Baterias em série: tensão duplica, capacidade igual



Baterias em paralelo: capacidade duplica, tensão igual



21.7.7 Baterias de Acumuladores

Estado de Carga (State of charge – %): A quantidade de energia eléctrica armazenada pela bateria e um determinado tempo em relação a sua condição 100%. Essa medida depende de sua taxa de descarga;

Tensão de circuito aberto (Open-circuit voltage – V): É a medição convencional da tensão da bateria, sem ligações a circuitos.

Capacidade: Carga eléctrica que a bateria pode fornecer, em Ah (ampere-hora); diminui quando a taxa de descarga aumenta;

Capacidade nominal: É uma característica dependente dos componentes internos da bateria; estes influenciam a quantidade de carga que a bateria pode fornecer dentro de 20 h, até que a tensão de descarga seja 10,5 V, com corrente de descarga constante, além de temperatura ambiente de 25 °C.

Electrólito: É uma solução electrolítica composta de 34% de ácido sulfúrico e 66% de água destilada, com densidade ρ igual a 1,20 g/cm³ à 26°C.





21.7.8 Regulador de Carga

- Controla a carga da bateria, evitando sobrecargas.
- Impede a corrente inversa da bateria para o painel durante a noite.
- Evita descargas profundas, protegendo sobretudo baterias de chumbo-ácido.
- Compensa a temperatura da bateria, ajustando a tensão de carga.
- **PWM**: liga o painel à bateria por impulsos; é simples e económico, mas aproveita menos energia.
- **MPPT**: segue o ponto de potência máxima e aproveita melhor a energia do painel, sobretudo quando a sua tensão é superior à da bateria.

21.7.8 Regulador de Carga

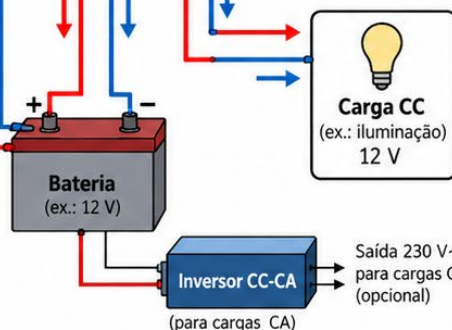
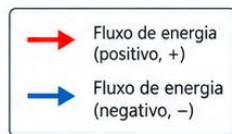
Ligação com regulador PWM

(Modulação por Largura de Impulsos)

Painel fotovoltaico
(ex.: 100 Wp)



V_{PV} (típico) = 17–22 V
(aproxima-se da tensão da bateria devido ao PWM)



- **PWM:** comutação por impulsos; a tensão do painel aproxima-se da da bateria.
- O painel fica praticamente ligado directamente à bateria através do regulador.
- **Simple e económico.**

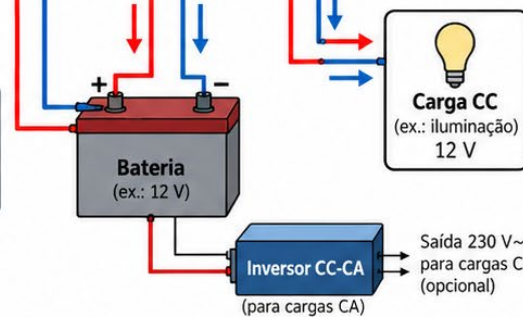
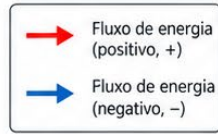
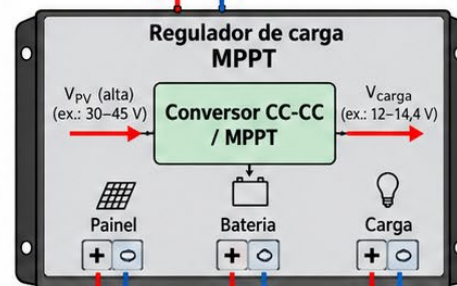
Ligação com regulador MPPT

(Seguimento do Ponto de Potência Máxima)

Painel fotovoltaico
(ex.: 100 Wp)



V_{PV} (típico) = 30–45 V
(tensão mais alta que a da bateria)



- **MPPT:** segue o ponto de potência máxima e converte a tensão extra em mais corrente de carga.
- Permite maior aproveitamento de energia do painel fotovoltaico.
- **Maior aproveitamento de energia.**

21.7.9 Seleção do Regulador de Carga MPPT

A corrente máxima do regulador deve cobrir a corrente de carga da bateria e a corrente do gerador:

$$I_{\max DC} \geq I_T \quad \text{e} \quad I_{\max DC} \geq N_F I_{\max} \quad (21.34)$$

Corrente de carga:

$$I_T = \frac{P_{FV}}{V_{DC}} [A] \quad (21.35)$$

Número de reguladores:

$$\text{Número de Controladores} = \frac{I_T}{I_{\max DC}} \quad (21.36)$$

I_T – corrente de carga [A];
 P_{FV} – potência do gerador [W];
 V_{DC} – tensão do sistema [V];
 $N_F \cdot I_{\max}$ – corrente máxima do gerador;
 $I_{\max DC}$ – corrente máxima do regulador.



21.7.10 Inversor CC/CA

- Converte a CC do gerador e das baterias em CA de **230 V / 50 Hz**, a tensão da rede em Moçambique.
- Os equipamentos de 12 ou 24 V existem, mas são caros e pouco usados.
- A potência do inversor deve cobrir a soma das potências simultâneas ΣP_i :

$$P_{inv} > \sum P_i \quad (21.37)$$

Na prática: margem de 20–25% sobre ΣP_i e capacidade de pico para o arranque de motores (frigoríficos, bombas). Preferir inversores de onda sinusoidal pura.



Exemplo 21.2 – FV Autónomo em Maputo (1)

Moradia isolada da rede; cargas em CA; dimensionamento para o Inverno.

Equipamento	Nº	Horas/dia	Potência (W)	Energia (Wh/dia)
Lâmpadas LED	6	5	9	270
Frigorífico	1	10	100	1000
Televisão	1	4	80	320
Computador portátil	1	4	60	240
Totais			$\Sigma P_i = 294$	$W_D = 1830$

Grandeza	Cálculo e resultado
Energia mensal W_M (21.26)	$1830 \times 30 = 54,9 \text{ kWh/mês}$
Rendimento η_{sist}	$0,97 \times 0,85 \times 0,80 \approx 0,66$
Produção de Inverno E_M	$4,31 \times 30 \approx 129 \text{ kWh/(kW}\cdot\text{mês)}$
Potência do gerador P_{FV} (21.27)	$54,9 / (0,66 \times 129) = \mathbf{643 \text{ W}}$



Exemplo 21.2 – FV Autónomo em Maputo (2)

$W_D = 1,83 \text{ kWh/dia} \rightarrow V_{DC} = 24 \text{ V}$; módulo de 330 W ($V_{max} = 34,0 \text{ V}$; $I_{max} = 9,71 \text{ A}$).

Componente	Cálculo e resultado
Módulos em série N_s (21.28)	$24 / 34,0 = 0,71 \rightarrow 1$
Fileiras N_F (21.31)	$643 / (1 \times 330) = 1,95 \rightarrow 2$ (660 W instalados)
Carga diária (21.32)	$1830 / 24 = 76,2 \text{ Ah}$
Capacidade C_B (21.33)	$1830 \times 3 / (24 \times 0,8 \times 0,6) = 477 \text{ Ah}$
Banco de baterias	$4 \times 12 \text{ V}/250 \text{ Ah}$: 2 em série $\times$ 2 em paralelo = 24 V/500 Ah
Corrente de carga I_T (21.35)	$660 / 24 = 27,5 \text{ A}$ ($\geq N_F \cdot I_{max} = 19,4 \text{ A}$)
Regulador (21.34, 21.36)	MPPT 24 V / 40 A $\rightarrow$ 1 regulador
Inversor (21.37)	$\Sigma P_i = 294 \text{ W}$; com 25% de margem 368 W $\rightarrow$ 500 W (pico $\geq 1\,000 \text{ W}$)

