Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 22

Aula 22: Energia Solar Activa
Aula Prática

Problema 22.1

Calcular o número de colectores solares planos selectivos [$F'(\tau\alpha) = 0,75$; $F'U_L = 4,5$ W/m²·ºC] para uma vivenda unifamiliar de 6 pessoas, que funcionam 6 horas por dia durante 30 dias por mês, com a temperatura de utilização de 45 ºC, a temperatura da rede de 25 ºC e a temperatura ambiente de 28 ºC, localizada numa zona poluída de uma grande cidade. A irradiação média diária é de 17,96 MJ/m²·dia, as perdas globais são de 10%, o factor de inclinação é de 0,8, a área do colector é de 2 m² e o calor específico da água é de 4,186 kJ/kg·K.

Problema 22.1 (Resolução I)

Tabela 21.2 – Consumos diários de referência a 60 ºC

Consumos	Litros/dia a 60ºC
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

Problema 22.1 (Resolução II)

1. Consumo diário a 60 ºC (Tabela 21.2):

$$C_{60} = N_{consumidores} \times C_{ref} = 6 \times 30 = 180 \text{ litros/dia}$$

2. Consumo equivalente à temperatura de utilização de 45 ºC (21.6):

$$m = C_{60} \frac{T_{ref} - T_{rede}}{T_{util} - T_{rede}} = 180 \times \frac{60 - 25}{45 - 25} = 315 \text{ litros/dia}$$

3. As necessidades energéticas diárias (21.7):

$$Q = m\, c_p\, \Delta t = 315 \cdot 4{,}186 \cdot (45 - 25)/1000 = 26{,}37 \text{ MJ/dia}$$

Problema 22.1 (Resolução III)

As necessidades energéticas mensais ($E_{n,m}$) calculam-se pela expressão (21.8):

$$E_{n,m} = Q \times \text{dias do mês} = 26{,}37 \times 30 = 791{,}2 \text{ MJ/mês}$$

Onde:

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

Q - Necessidade energética diária [MJ/dia]

Problema 22.1 (Resolução IV)

A irradiação horizontal média corrigida (21.10) – zona poluída de uma grande cidade, coeficiente 0,95:

$$H_{corrigida} = H \times Coef_{correcção} = 17{,}96 \times 0{,}95 = 17{,}06 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$$

Onde:

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

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

$Coef_{Correcção}$ - Coeficiente correcção [Adimensional]

Problema 22.1 (Resolução V)

A energia aproveitável (21.11) multiplica-se por 0,94 para descontar ≈ 6% de energia perdida no início e no fim do dia, quando o sol está baixo:

$$E_{ap} = H_{corrigida} \times f \times 0{,}94$$

$$E_{ap} = 17{,}06 \times 0{,}8 \times 0{,}94 = 12{,}83 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$$

Problema 22.1 (Resolução VI)

A intensidade útil sobre o colector calcula-se de (21.12):

$$I = \frac{E_{ap}}{n_{hs}}$$

$$I = \frac{12{,}83 \times 10^6}{6 \times 3600} = 594{,}0 \text{ W/m}^2$$

Sendo:

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

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

n_{hs} - Número de horas de sol [s]

Problema 22.1 (Resolução VII)

Escolha do colector (Tabelas 21.4 e 21.5):

• Temperatura de utilização de 45 ºC → gama 40–70 ºC: colector plano selectivo (Tabela 21.5).

• Colector selectivo (Tabela 21.4): $F'(\tau\alpha) = 0{,}7–0{,}8$ e $F'U_L = 3–6$ W/m²·ºC. Adoptam-se os valores do enunciado: $F'(\tau\alpha) = 0{,}75$ e $F'U_L = 4{,}5$ W/m²·ºC.

• O rendimento calcula-se pela recta característica do colector (21.20), e não por ábaco; deve ficar acima de 40%.

Problema 22.1 (Resolução VIII)

- O rendimento do colector calcula-se pela recta característica (21.20):

$$t_f = \frac{T_{rede} + T_{util}}{2} = \frac{25 + 45}{2} = 35\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

$$\eta_r = F'(\tau\alpha) - F' U_L \frac{t_f - t_{amb}}{I} = 0{,}75 - 4{,}5 \times \frac{35 - 28}{594{,}0} = 0{,}697$$

- O rendimento real do colector é $\eta_r \approx 0{,}70$ (> 40%): a escolha do colector é adequada.

Problema 22.1 (Resolução IX)

Com a energia aproveitável (E_{ap}), o rendimento real do colector (η_r) e as perdas globais do sistema, calcula-se a energia diária captada por m² ($E_{Col.d}$) pela expressão (21.21):

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

$$E_{Col.\,d} = 12{,}83 \cdot 0{,}697 \cdot (1 - 0{,}10) = 8{,}05 \text{ MJ/m}^2$$

Onde:

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

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

η_r- Rendimento real do colector [%]

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

Problema 22.1 (Resolução X)

A energia mensal captada por m² obtém-se multiplicando $E_{Col.d}$ pelos dias do mês (21.22):

$$E_{Col.m} = E_{Col.d} \times \text{dias do mês}$$

$$E_{Col.m} = 8{,}048 \times 30 = 241{,}4 \text{ MJ/m}^2\text{mês}$$

em que:

$E_{col.m}$- Energia captada durante o mês por m² de colector [MJ/m²mês]

Problema 22.1 (Resolução XI)

A área de superfície colectora teórica A_{sc} é o quociente das necessidades energéticas mensais ($E_{n,m}$) pela energia captada no mês por m² de colector ($E_{Col.m}$) (21.23):

$$A_{sc} = \frac{E_{n,m}}{E_{Col.m}} = \frac{791{,}2}{241{,}4} = 3{,}28 \text{ m}^2$$

Onde:

A_{sc} - Área de superfície colectora teórica [m²]

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

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

Problema 22.1 (Resolução XII)

Sabendo a área útil de captação do colector (A_c), calcula-se o número teórico de colectores (N_{ct}) (21.24):

$$N_{ct} = \frac{A_{sc}}{A_c} = \frac{3{,}28}{2} = 1{,}64 \quad \Rightarrow \quad N_{cr} = 2$$

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]

Problema 22.1 (Resolução XIII)

Definido o número real de colectores (N_{cr} = 2), calcula-se a energia efectiva captada por mês (21.25):

$$E_{Col.e} = E_{Col.m} \times A_c \times N_{cr} = 241{,}4 \times 2 \times 2 = 965{,}8 \text{ MJ/mês}$$

Em que:

$E_{Col.e}$ – energia efectiva captada por mês [MJ/mês]

$E_{Col.m}$ – energia captada durante o mês por m² de colector [MJ/m²·mês]

A_c – área útil de captação do colector [m²]

N_{cr} – número real de colectores

Com 2 colectores cobrem-se 122% das necessidades (965,8 > 791,2 MJ); com 1 colector apenas 61%. Escolhem-se 2 colectores (4 m²).

Problema 22.2

Dimensionar um sistema fotovoltaico autónomo para uma residência em Maputo, com os seguintes electrodomésticos: 4 lâmpadas de 60 W, usadas 4 horas por dia; 1 geleira duplex, usada 5 horas por dia; uma televisão, usada 5 horas por dia; um computador, usado 4 horas por dia; e um aparelho de AC de 8500 BTU/h, que funciona 5 horas por dia. O rendimento do inversor, juntamente com o regulador, é de 0,85, e o das cablagens é de 0,97. Os módulos são de 640 W (Vmax = 37,5 V; Imax = 17,07 A) e as baterias são TLS4 da PowerSafe, de 12 V/220 Ah, com rendimento de 80% e profundidade de descarga de 0,6. Podem ocorrer 3 dias sem sol.

Problema 22.2 (Resolução I)

Tabela 21.6 – Estimativa do consumo diário de energia

Equipamentos	Número	Horas de uso/dia	Potência (W)	Energia diária (Wh/d)
Lâmpadas de leitura	4	4	60	960
Frigorifico	1	5	300	1500
Televisão	1	5	200	1000
Computador	1	4	200	800
AC	1	5	1300	6500
TOTAIS			**ΣPi = 2240**	**WD = 10760**

WD = 10,76 kWh/dia; o AC representa 60% do consumo diário.

Problema 22.2 (Resolução II)

Tabela 21.7 – Produção FV média em Maputo por kW instalado (orientação Norte, inclinação fixa ≈ 24º)

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

Fonte: Aula 21 (profileSOLAR, a partir de dados NASA POWER). EM para 30 dias. Dimensiona-se para o mês mais desfavorável (Inverno): EM = 4,31 × 30 ≈ 129 kWh/(kW·mês).

Problema 22.2 (Resolução III)

A potência do gerador FV calcula-se de (21.27), com o rendimento do sistema (§ 21.7.2) e a produção de Inverno (Tabela 21.7):

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

$$W_M = W_D \times 30 = 10{,}76 \times 30 = 322{,}8 \text{ kWh/mês}$$

$$P_{FV} = \frac{W_M}{\eta_{sist}\,E_M} = \frac{322{,}8}{0{,}66 \times 129} = 3{,}79 \text{ kW}$$

Onde:

η_{sist} – rendimento do sistema

W_M – energia consumida por mês [kWh/mês]

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

Problema 22.2 (Resolução IV)

Tensão do sistema: $W_D = 10{,}76$ kWh/dia > 4 kWh/dia → $V_{DC} = 48$ V (§ 21.7.5). O número de módulos por fileira calcula-se de (21.28):

$$N_S > \frac{V_{bat}}{V_{\max}}$$

$$N_S > \frac{48}{37{,}5} = 1{,}28 \simeq 2$$

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

Problema 22.2 (Resolução V)

Número de Módulos por Fileira

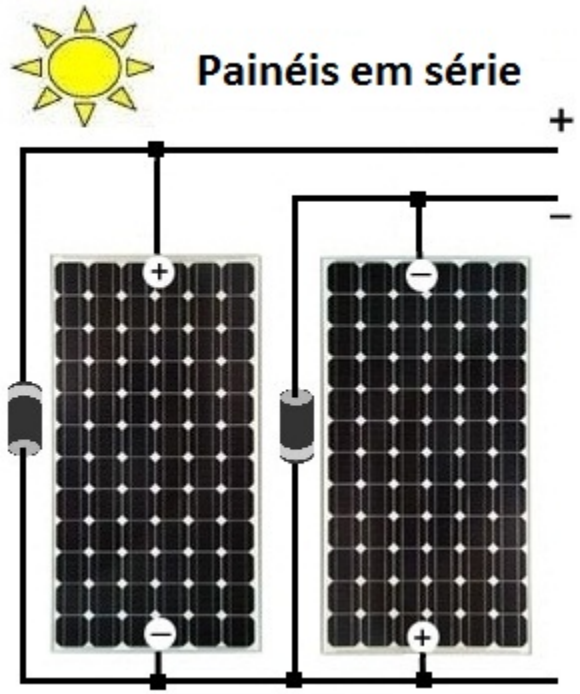


Figura 21.7 – Ligação de painéis em série

Se conectarmos um painel a outro em série (Figura 21.7) - (positivo de um painel com o negativo do outro), a cada painel adicionado a corrente se mantém e as tensões se somam.

Problema 22.2 (Resolução VI)

onde N_F representa o número de fileiras ligadas em paralelo e I_{max} corresponde à corrente máxima do módulo medida em condições padrão. Por outro lado, a potência do gerador FV corresponde ao produto entre a tensão do gerador ($N_s \times V_{max}$) e a corrente total:

$$P_{FV} = \left(N_S \cdot V_{max}\right) \times I_T \Rightarrow I_T = \frac{P_{FV}}{N_S \times V_{max}}$$

Problema 22.2 (Resolução VII)

O número de fileiras em paralelo calcula-se de (21.31):

$$N_F = \frac{P_{FV}}{N_S\, V_{max}\, I_{max}} = \frac{3\,791}{2 \times 37{,}5 \times 17{,}07} = 2{,}96 \;\Rightarrow\; N_F = 3$$

$$P_{FV,\,inst} = N_F\, N_S\, P_m = 3 \times 2 \times 640 = 3\,841 \text{ W} \quad (6 \text{ módulos})$$

Onde:

P_{FV} – potência do gerador fotovoltaico [W]

N_S – número de módulos em série por fileira

V_{max}, I_{max} – tensão e corrente no ponto de potência máxima do módulo

Problema 22.2 (Resolução VIII)

Número de Fileiras em Paralelo

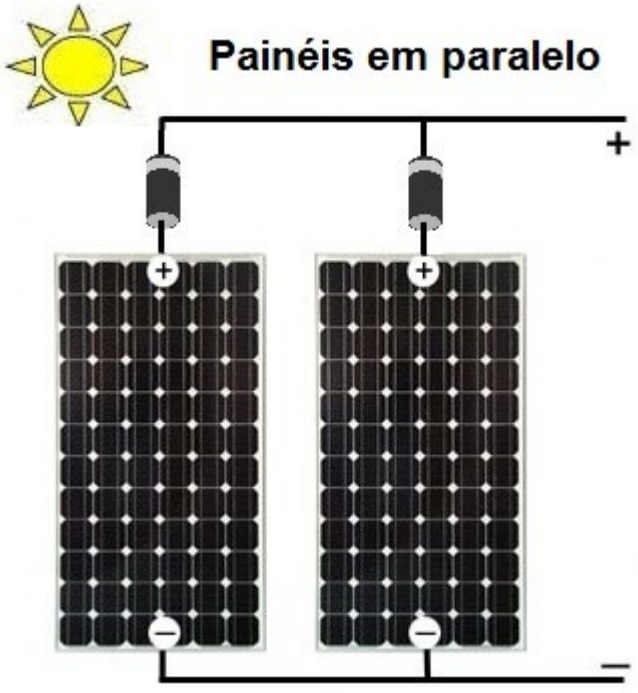


Figura 21.8 – Ligação de painéis em paralelo

Se conectarmos um painel a outro em paralelo (Figura 21.8) - (positivo com positivo e negativo com negativo), a cada painel adicionado, a tensão se mantém e as correntes se somam;

Problema 22.2 (Resolução IX)

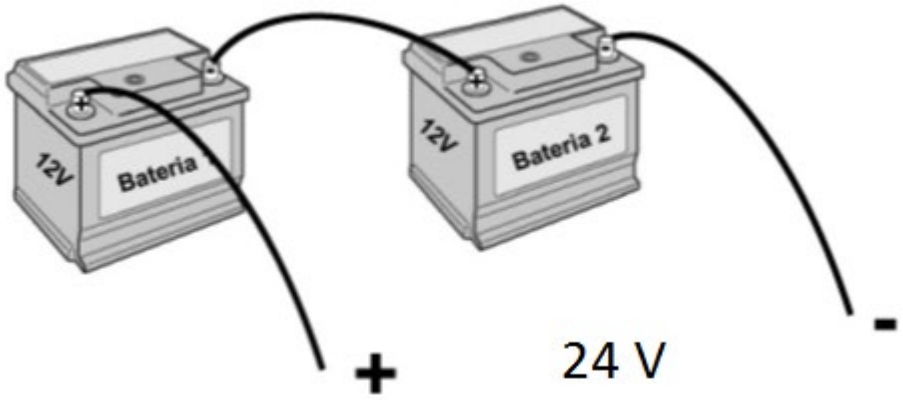


Figura 21.10 – Ligação de baterias em série

A ligação de baterias em série resulta numa capacidade constante, porém a tensão terminal aumenta. Como pode ser observado na Figura 21.10, o valor de tensão dobrou a capacidade manteve-se constante.

Problema 22.2 (Resolução X)

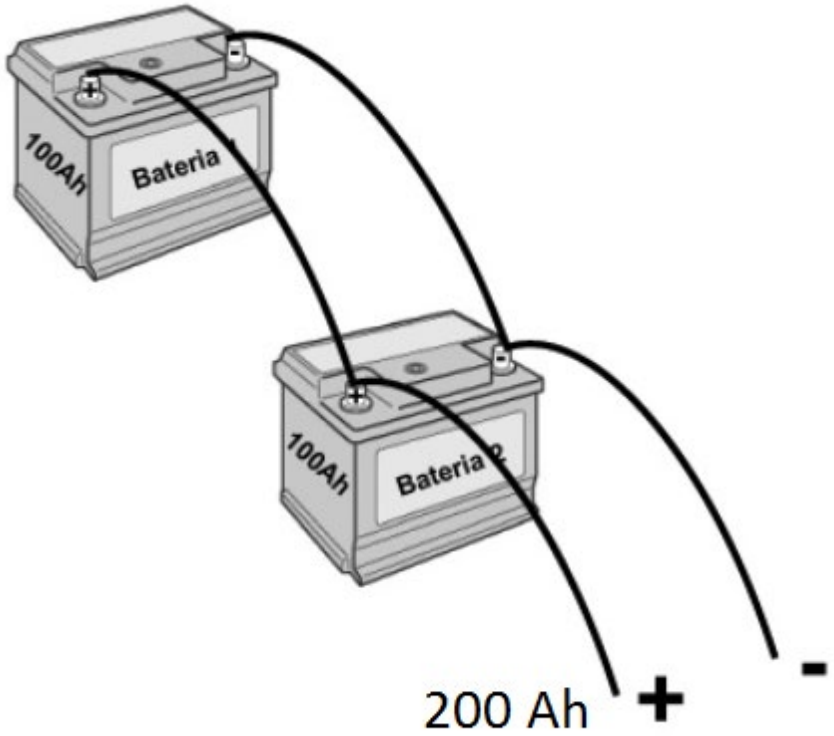


Figura 21.11 – Ligação de baterias em paralelo

A ligação de baterias em paralelo resulta no aumento da capacidade do sistema, porém a tensão terminal continua a mesma. Como pode ser observado na Figura 21.11, o valor de tensão não muda, supondo que a capacidade de uma bateria seja 100Ah, o sistema total teria uma capacidade de 200Ah.

Problema 22.2 (Resolução XI)

Capacidade da bateria de acumuladores

Numa bateria ideal ($K_{bat} = K_D = 1$), a carga eléctrica fornecida num dia, W(Ah), seria (21.32):

$$W_{(Ah)} = \frac{W_D}{U} = \frac{10\,760}{48} = 224{,}2 \text{ Ah}$$

Contudo, em situações reais a eficiência da bateria nunca atinge 100% (por exemplo, para baterias de chumbo – ácido, os valores correntes são de 80%, e a profundidade de descarga máxima de segurança (para não se danificar a bateria) é normalmente de 60%.

Problema 22.2 (Resolução XII)

Capacidade real da bateria de acumuladores

A capacidade de uma bateria real, C_B, inclui a autonomia, a eficiência e a profundidade de descarga (21.33):

$$C_B = \frac{W_D\, N_d}{U\, K_{bat}\, K_D} = \frac{10\,760 \times 3}{48 \times 0{,}80 \times 0{,}60} = 1\,401 \text{ Ah}$$

Com baterias de 12 V/220 Ah: 48/12 = 4 em série e 1 401/220 = 6,4 → 7 fileiras em paralelo, isto é, 28 baterias (48 V/1 540 Ah). O AC, com 60% do consumo, é o que mais pesa no banco de baterias.

Problema 22.2 (Resolução XIII)

Selecção do regulador de carga MPP

A corrente máxima do regulador MPPT, $I_{max\ DC}$, deve cobrir a corrente de carga I_T e a corrente máxima do gerador $N_F \cdot I_{max}$ (21.34–21.36):

$$I_T = \frac{P_{FV}}{V_{DC}} = \frac{3\,841}{48} = 80{,}0\ \text{A} \ \geq \ N_F\, I_{max} = 3 \times 17{,}07 = 51{,}2\ \text{A}$$

$$N_{reg} = \frac{I_T}{I_{max\,DC}} = \frac{80{,}0}{60} = 1{,}33 \ \Rightarrow \ 2 \text{ reguladores MPPT } 48 \text{ V/60 A}$$

Problema 22.2 (Resolução XIV)

Selecção do inversor

A potência do inversor deve cobrir a soma das potências simultâneas, com 25% de margem (21.37):

$$P_{inv} \geq 1{,}25\,\Sigma P_i = 1{,}25 \times (240 + 300 + 200 + 200 + 1300) = 2\,800\ \text{W}$$

Escolhe-se um inversor de onda sinusoidal pura de 3 kW (48 V CC / 230 V, 50 Hz), com potência de pico ≥ 6 kW para o arranque dos compressores do AC e da geleira.