

## SOLUZIONE ESERCIZI

1. Modulo Siemens SM55:

a) Calcolo rendimento:

Area modulo:  $A = 1,293 \cdot 0,329 = 0,4254 \text{ m}^2$

Rendimento:  $\eta = \frac{P[\text{W}]}{A[\text{m}^2] \cdot 1000[\text{W}/\text{m}^2]} = \frac{55\text{W}}{425,4\text{W}} = 0,1293 \Rightarrow \eta = 12,93\%$

**⇒ Il rendimento è del 12.93 %**

b) Calcolo potenza:

Fill Factor (dati fabbricante):  $FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{55}{21,7 \cdot 3,45} = 0,7347 \Rightarrow FF = 73,47\%$

Peff (potenza effettiva erogata):  $P_{eff} = FF \cdot V_{oc_{mis}} \cdot I_{sc_{mis}} = 0,7347 \cdot 21,65 \cdot 2,48 = 39,45 \text{ W}$

$P_{corr_{STC}}$  (potenza corretta):  $P_{corr_{stc}} = P_{eff} \frac{1000}{G_{mis}} = 39,45 \frac{1000}{720} = 54,8 \text{ W}$

**⇒ La potenza dichiarata dal fabbricante è corretta**

---

2. Potenza massima effettiva:

a. Con  $G = 600 \text{ W}/\text{m}^2$  e  $T_c = 60^\circ\text{C}$

Nota:  $k = \frac{\Delta P}{\Delta T} = -\frac{0,4\%}{^\circ\text{C}}$

$$P_{eff} \cong (P_{n,STC} + k(T_c - 25) \cdot P_{n,STC}) \frac{G_{mis}}{G_{STC}} = (120 + (-0,004) \cdot (60 - 25) \cdot 120) \cdot \frac{600}{1000} = (120 - 0,14 \cdot 120) \cdot 0,6 = 61,92 \text{ W}$$

b. Alle condizioni NOCT: vedi (a), con  $G = 800 \text{ W}/\text{m}^2$  e  $T_c = 45^\circ\text{C} \Rightarrow P_{eff} \cong 88,32 \text{ W}$

**⇒ La potenza massima effettiva erogata è di circa (a) 61,92 W rispettivamente (b) 88,32 W**

3. Si vuole realizzare un impianto PV su una falda di un tetto di 30 m<sup>2</sup>. Sono stati scelti moduli da 50 W e con un rendimento del 14%.

a) **Potenza totale dell'impianto:**  $P_n [kW] = \eta_{stc} [-] \cdot A_{tot} [m^2] = 0.14 \cdot 30 = 4.2 \text{ kW}$

Oppure:

$$A_{mod} [m^2] = \frac{P_{mod.} [kW]}{\eta [-]} = \frac{50}{0.14} = 0.3571 m^2 \quad (\text{area di un modulo})$$

$$N^{\circ} \text{ mod.} = \frac{A_{tot.} [m^2]}{A_{mod.} [m^2]} = \frac{30}{0.3571} = 84 \text{ moduli} \quad (\text{numero di moduli})$$

$$P_{imp.} = n^{\circ} \text{ mod.} \cdot P_{mod.} = 84 \cdot 50 = 4'200 \text{ W} \quad (\text{potenza impianto})$$

b) **Energia prodotta annualmente** (dati: PR 82% ; l'insolazione annua sul piano dei moduli 1420 kWh/m<sup>2</sup>):

$$E [kWh/a] = P_n [kW] \cdot H [kWh/m^2 a] \cdot PR [-] = 4.2 \cdot 1'420 \cdot 0.82 = 4'890.5 \text{ kWh}$$

c) **Indice di produzione annuo:**  $Y_f \left[ \frac{kWh}{kW \cdot a} \right] = \frac{E [kWh/a]}{P_n [kW]} = \frac{4'890.5}{4.2} = 1'164 \text{ kWh/kW.a}$

4. Si vuole integrare nella falda di un tetto di un'abitazione a Lugano (orientamento 60° est, inclinazione 70°) un impianto PV allo scopo di **coprire il consumo annuo** di elettricità (4'200 kWh/a). La superficie sfruttabile è di 41 m<sup>2</sup>.

Se si utilizzano dei moduli SM55 (P<sub>n</sub>=55W, dimensioni: 1.293 x 0.329 m) il progetto è fattibile?

$$FT (70^{\circ}, -60^{\circ}) = 0.82 \quad \Rightarrow \quad H = 1'143 \cdot 0.82 = 937.26 \text{ kWh/m}^2 \cdot a$$

$$A_{mod} = 1.293 \cdot 0.329 = 0.4254 \text{ m}^2 \quad \Rightarrow \quad \eta_{stc,mod} [-] = \frac{P_n [kW]}{A [m^2]} = \frac{0.055}{0.4254} = 0.1293$$

$$\eta_{reale,mod} = \eta_{stc} \cdot PR = 0.129 \cdot 0.8 = 0.10344$$

$$E = \eta_{reale} \cdot H \cdot A_{tot} = 0.10344 \cdot 937.26 \cdot 41 = 3'975 \text{ kWh/a} \Rightarrow \text{Non si riesce a coprire il consumo annuo!!}$$

**Transposition Factors for Lugano ( )**

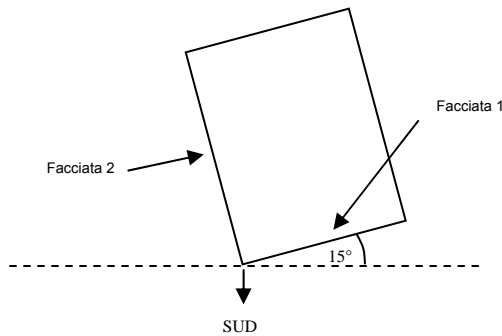
Period : Whole year --- Horizontal Global Irrad. **1143 kWh/m<sup>2</sup>**

Azimuth	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Tilt													
90°	0.54	0.60	0.66	0.71	0.75	0.78	0.80	0.80	0.78	0.75	0.70	0.64	0.58
80°	0.61	0.68	0.74	0.80	0.85	0.89	0.91	0.90	0.88	0.84	0.79	0.72	0.65
70°	0.68	0.75	0.82	0.89	0.94	0.98	1.00	1.00	0.97	0.93	0.87	0.80	0.72
60°	0.75	0.82	0.90	0.96	1.01	1.05	1.07	1.07	1.04	1.00	0.94	0.86	0.78

5. L'architetto Rossi ha proposto 2 varianti relative ad un nuovo impianto fotovoltaico:

- Variante 1: impianto integrato nella facciata 1 (lunghezza **10 m**)
- Variante 2: impianto integrato nella facciata 2 (lunghezza **13 m**)

quale delle 2 varianti è migliore in termini di produzione d'energia?



Sia:

$$E_1 = P_1 \cdot H_1 \cdot PR_1$$

$$E_2 = P_2 \cdot H_2 \cdot PR_2$$

Si ha:

$$PR_1 = PR_2 = PR$$

$$P_2 = 1.3 P_1$$

$$H_1 = H_{max} \cdot 0.68 \quad (15^\circ \text{ est} \Rightarrow -15^\circ ; \text{ tilt} = 90^\circ)$$

$$H_2 = H_{max} \cdot 0.56 \quad (75^\circ \text{ ovest} \Rightarrow +75^\circ ; \text{ tilt} = 90^\circ)$$

Sostituendo :

$$E_1 = P_1 \cdot (H_{max} \cdot 0.68) \cdot PR \quad , \quad E_2 = (1.3 P_1) \cdot (H_{max} \cdot 0.56) \cdot PR$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{P_1 \cdot (H_{max} \cdot 0.68) \cdot PR}{(1.3 P_1) \cdot (H_{max} \cdot 0.56) \cdot PR} = \frac{0.68}{1.3 \cdot 0.56} = \frac{0.68}{0.728} = 0.93$$

⇒ L'impianto sulla facciata 2 produce più energia!!

		AZ											
Tilt	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
90°	47	52	57	62	65	68	70	70	68	65	61	56	50
80°	53	59	64	70	74	77	79	78	77	73	69	63	57
70°	59	65	71	77	82	85	87	87	84	81	76	70	63
60°	65	71	78	83	88	91	93	93	90	87	82	75	68

6. Sia dato un impianto con le seguenti caratteristiche:

$$P_n = 8.9 \text{ kW}$$

$$E = 9130 \text{ kWh/a}$$

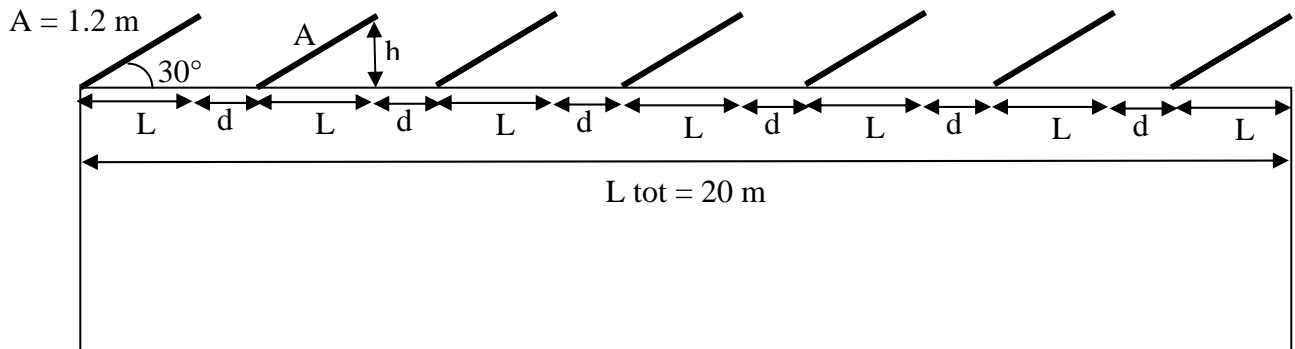
$$H = 1325 \text{ kWh/m}^2\text{a}$$

Se confrontato con l'impianto dell'esercizio 3, quale dei due impianti ha la miglior "resa energetica"?

$$PR [-] = \frac{E [\text{kWh/a}]}{P_n [\text{kW}] \cdot H [\text{kWh/m}^2\text{a}]} = \frac{9130}{8.9 \cdot 1325} = 0.77 = 77\%$$

⇒ L'impianto dell'esercizio 3 ha una miglior "resa energetica" (PR=82%)

7. Su un tetto piano lungo 20 m si vuole installare un impianto PV in sheds (file parallele identiche). I moduli nelle file sono inclinati a 30° e la dimensione A di ogni fila è di 1.20 m (vedi disegno).
- Quante file di moduli si possono installare al massimo?
  - Qual è in questo caso l'indice di sfruttamento in %?



$$L = A \cdot \cos 30^\circ = 1,2 \cdot \cos 30^\circ = 1,04 \text{ m}$$

$$h = A \cdot \sin 30^\circ = 1,2 \cdot \sin 30^\circ = 0,6 \text{ m}$$

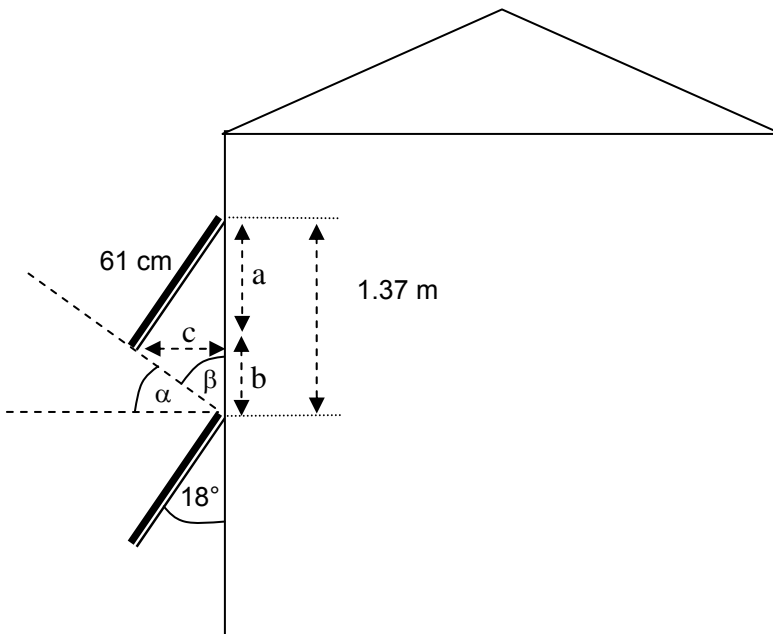
Se n file:  $\Rightarrow d = \frac{L_{tot} - n \cdot L}{n - 1}$

dev'essere:  $\boxed{d \geq 3h}$        $3h = 3 \cdot 0,6 = 1,8 \text{ m}$

- |  |  |
|--|--|
| 6 file: $d = (20 - 6 \cdot 1,04) : 5 = 2,75 \text{ m}$ | $2,75 \text{ m} > 1,8 \text{ m} \Rightarrow \text{OK}$     |
| 7 file: $d = (20 - 7 \cdot 1,04) : 6 = 2,12 \text{ m}$ | $2,12 \text{ m} > 1,8 \text{ m} \Rightarrow \text{OK}$     |
| 8 file: $d = (20 - 8 \cdot 1,04) : 7 = 1,67 \text{ m}$ | $1,67 \text{ m} < 1,8 \text{ m} \Rightarrow \text{NO !!!}$ |

- Si possono installare al massimo 7 file!
- Indice sfruttamento =  $A(\text{coll})/A(\text{ground}) = 7 \cdot 1,20 / 20 = 8,4 / 20 = 0,42 \Rightarrow 42\%$

8. I moduli sono installati correttamente?



$$a = 61 \cdot \cos 18^\circ = 58.01 \text{ cm}$$

$$c = 61 \cdot \sin 18^\circ = 18.85 \text{ cm}$$

$$b = 137 - a = 137 - 58.01 = 78.99 \text{ cm}$$

$$\text{tg } \beta = \frac{c}{b} \Rightarrow \beta = \text{arctg} \frac{c}{b} = 13.42^\circ$$

$$\Rightarrow \alpha = 90^\circ - \beta = 90^\circ - 13.42^\circ \cong 76.58^\circ$$

$\Rightarrow$  I moduli sono installati correttamente perché  $\alpha = 76.58^\circ > 70^\circ$  (angolo limite)

9. Si vuole integrare in modo ottimale un impianto fotovoltaico in un edificio. I moduli PV hanno la doppia funzione di produttori di energia e di elementi impermeabili. Non è possibile predisporre una ventilazione sul retro dei moduli. Che tecnologia di moduli è più idonea per questa applicazione? Perché?

**Moduli al silicio amorfo, perché:**

- i moduli a-Si hanno un coefficiente negativo di temperatura minore
- i moduli a-Si recuperano parte del degrado a temperature più elevate

10. Di un impianto fotovoltaico sono noti i seguenti dati:

Moduli:	6 Fr/W, potenza nominale 140 W, dimensioni: 1.25 x 0.82 m
Impianto:	61.5 m <sup>2</sup> (superficie attiva)
Ondulatore:	5'900 Fr
Strutture supporto:	5'000 Fr
Cavi e altro:	2'500 Fr
Montaggio:	7'500 Fr
Progettazione:	2'500 Fr
Indice di produzione:	1'100 kWh/kW.a
Durata di vita prevista:	25 anni
Tasso d'interesse sul prestito:	3 %

Calcolare:

- a) Il costo al m<sup>2</sup> dei moduli [Fr/m<sup>2</sup>]
- b) Il costo al m<sup>2</sup> dell'impianto [Fr/m<sup>2</sup>]
- c) Il costo medio di produzione dell'energia [Fr/kWh]

$$a) C_{\text{mod.}} = 6 \left[ \frac{\text{Fr}}{\text{W}} \right] \cdot \frac{140}{1,25 \cdot 0,82} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \cong 819,5 \left[ \frac{\text{Fr}}{\text{m}^2} \right]$$

$$b) C_{\text{imp.}} = \frac{819,5 \left[ \frac{\text{Fr}}{\text{m}^2} \right] \cdot 61,5 \left[ \text{m}^2 \right] + (5'900 + 5'000 + 2'500 + 7'500 + 2'500) [\text{Fr}]}{61,5 \left[ \text{m}^2 \right]} = \frac{73'800}{61,5} \left[ \frac{\text{Fr}}{\text{m}^2} \right] = 1'200 \left[ \frac{\text{Fr}}{\text{m}^2} \right]$$

$$c) \text{Potenza tot. impianto: } P_{\text{tot}} = 60 \cdot 140 = 8,4 \text{ [kW]}$$

$$\text{Costo al } W_p \text{ installato: } C_{Wp} = \frac{73'800 \text{ Fr}}{8'400 \text{ W}} \cong 8,79 \left[ \frac{\text{Fr}}{\text{W}} \right]$$

$$\text{Ammortamento annuo dell'investimento: } A = \frac{C}{t} \left[ \frac{\text{CHF}}{\text{anni}} \right] = \frac{8,79 \text{ CHF}}{25 \text{ anni}} = 0,35 \left[ \frac{\text{CHF}}{\text{anno}} \right] \text{ corrispondente ad un}$$

$$\text{tasso di ammortamento annuo pari al 4\%, ossia } \frac{0,35}{8,79} \left[ \frac{\text{CHF}}{\text{CHF}} \right] \cdot 100$$

Il costo reale dell'impianto al  $W_p$  installato è quindi uguale al costo al  $W_p$  sommato all'importo degli interessi pagati sul prestito.

Per calcolare l'importo totale degli interessi pagati si utilizza la formula:  $I = C \cdot i \cdot \left( \frac{t+1}{2} \right)$

dove  $C$  = capitale prestato (8.79 CHF)

$i$  = tasso di interessi (3%)

$t_n$  = periodo di ammortamento del prestito, corrispondente alla durata di vita dell'impianto (25 anni)

$$\text{si ottiene quindi: } 8,79 \left[ \frac{\text{CHF}}{\text{W}} \right] \cdot 0,03 \cdot \left( \frac{25+1}{2} \right) = 3,4 \left[ \frac{\text{CHF}}{\text{W}} \right]$$

Vale a dire che sull'arco di 25 anni il totale degli interessi pagati su un prestito di 8,79 CHF corrisponde a 3.4 CHF. Il **costo reale dell'impianto al  $W_p$  installato**, comprendente gli interessi, sarà dunque uguale a **12.19 CHF** (ossia, 8.79 CHF + 3.4 CHF).

La produzione totale di energia sull'arco di vita dell'impianto corrisponde invece a:

$$E_{n_{tot}} = 8,4 \text{ [kW]} \cdot 1100 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kW} \cdot \text{a}} \right] \cdot 25 \text{ anni} = 231000 \text{ [kWh]}$$

Costo medio di produzione dell'energia ( $c_{en}$ ):

$$c_{en} = \frac{8,4 \text{ [kW]} \cdot 12.19 \left[ \frac{\text{CHF}}{\text{Wp}} \right]}{231000 \text{ [kWh]}} = \frac{8'400 \text{ [W]} \cdot 12.19 \left[ \frac{\text{CHF}}{\text{Wp}} \right]}{231000 \text{ [kWh]}} = 0,44 \left[ \frac{\text{CHF}}{\text{kWh}} \right]$$

- ⇒ Il costo dei moduli è di 819,5 Fr/m<sup>2</sup>
- ⇒ Il costo dell'impianto è di 1'200 Fr/m<sup>2</sup>
- ⇒ Il costo medio dell'energia è di 0,44 Fr/kWh

11. Si vuole realizzare un impianto PV collegato alla rete, utilizzando i moduli SM55 (per i dati vedi es. 1). Si sa che, in quella zona, la temperatura di funzionamento dei moduli ( $T_{cella}$ ) varia da  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$ . L'ondatale scelto ha le seguenti caratteristiche:

- Range di tensione d'entrata MPP ondatale: 75-150Vdc
- Tensione massima ondatale: 250 Vdc

**Quanti moduli possono essere collegati in serie?**

$$\Delta T_1 = (-10^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) = -35^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_2 = (70^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) = 45^{\circ}\text{C}$$

$$V_{oc,max} = V_{oc,sc} + \beta \cdot 36 \cdot \Delta T_1 = 21.7 \text{ V} + (-2,05/1'000) \cdot 36 \cdot (-35) \cong 24.3 \text{ V}$$

$$V_{m,min} = V_{m,sc} + \beta \cdot 36 \cdot \Delta T_2 = 17.4 \text{ V} + (-2,05/1'000) \cdot 36 \cdot (45) \cong 14.1 \text{ V}$$

$$V_{m,max} = V_{m,sc} + \beta \cdot 36 \cdot \Delta T_1 = 17.4 \text{ V} + (-2,05/1'000) \cdot 36 \cdot (-35) \cong 20.0 \text{ V}$$

- 5 moduli in serie:  $V_{oc} = 121.4 \text{ V}$ ;  $V_m = 70.4 \text{ V} - 99.9 \text{ V} \Rightarrow \text{NO}$
- ✓ 6 moduli in serie:  $V_{oc} = 145.7 \text{ V}$ ;  $V_m = 84.5 \text{ V} - 119.9 \text{ V} \Rightarrow \text{SI}$
- ✓ 7 moduli in serie:  $V_{oc} = 170.0 \text{ V}$ ;  $V_m = 98.6 \text{ V} - 139.9 \text{ V} \Rightarrow \text{SI}$
- 8 moduli in serie:  $V_{oc} = 194.3 \text{ V}$ ;  $V_m = 112.6 \text{ V} - 159.9 \text{ V} \Rightarrow \text{NO}$

⇒ Possono essere collegati in serie 6 o 7 moduli