



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Architettura

-

Laurea magistrale in  
Architettura a ciclo unico

**Corso di fisica tecnica ambientale**

**LEZIONE 18:  
IMPIANTI SOLARI  
TERMICI E FOTOVOLTAICI**

Ing. Marco Cecconi

[marco.cecconi@ingenergia.it](mailto:marco.cecconi@ingenergia.it)

## Obiettivo

- Conoscere le **tecniche di sfruttamento dell'energia solare**.
- Effettuare un **dimensionamento di massima del solare termico e del solare fotovoltaico**.

## Indice

### 18 Impianto solari termici e fotovoltaici

• <b>Energia solare</b> .....	4
○ Radiazione solare extra-atmosferica .....	5
○ Radiazione solare al suolo .....	7
○ Irraggiamento utile .....	21
○ Impianti di sfruttamento dell'energia solare .....	27
• <b>Solare termico</b> .....	28
○ Componenti del sistema .....	30
○ Configurazioni di impianto .....	38
○ Criteri di dimensionamento .....	41
○ Dimensionamento semplificato .....	46

## ...indice..

- **Solare fotovoltaico** ..... 54
  - Tipologie di impianto ..... 56
  - Componenti di impianto ..... 59
  - Campi fotovoltaici ..... 69
  - Criteri di dimensionamento ..... 74
  - Esempi di installazione ..... 82

# 1.

## ENERGIA SOLARE

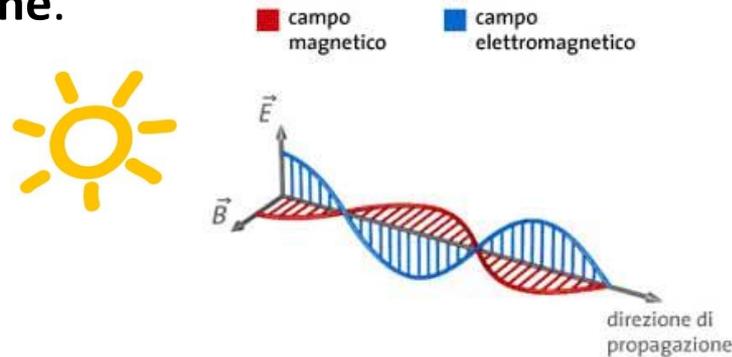
### INDICE DEL CAPITOLO 1

• <b>Energia solare</b> .....	4
○ Radiazione solare extra-atmosferica .....	5
○ Radiazione solare al suolo .....	7
○ Irraggiamento utile .....	21
○ Impianti di sfruttamento dell'energia solare .....	27

# Energia solare

## DEFINIZIONE

- L'**energia solare** è l'energia fornita dal sole sotto forma di **onde elettromagnetiche**.



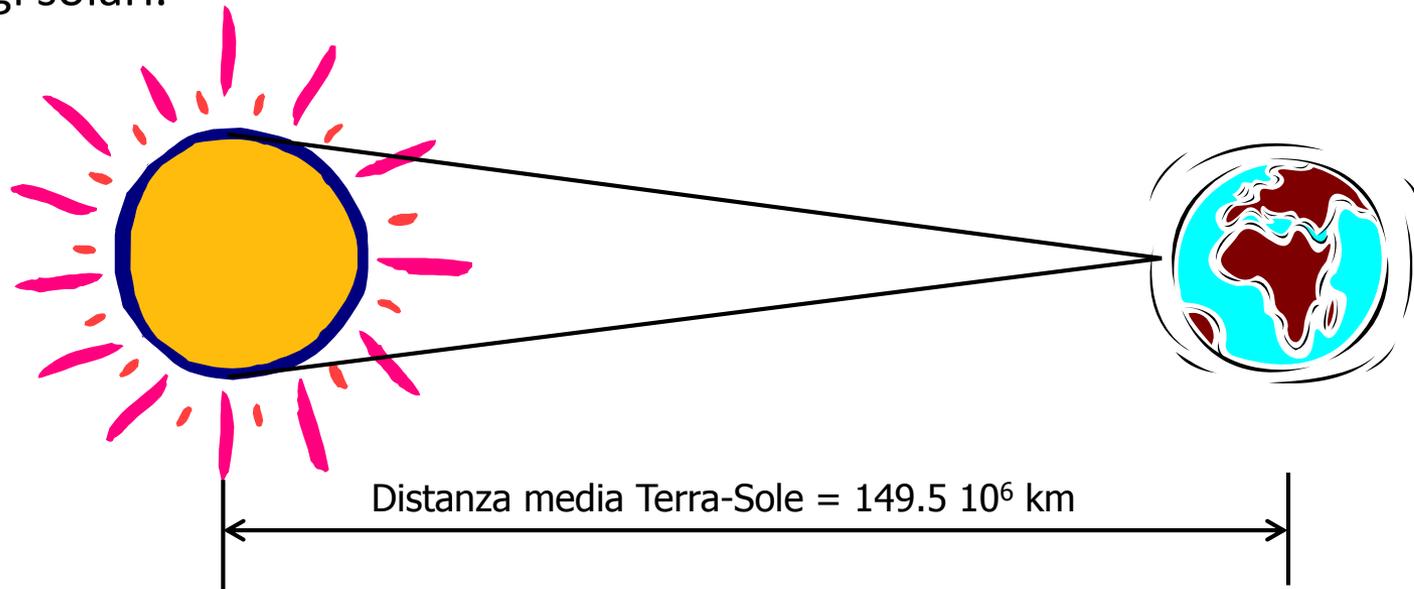
## CONSIDERAZIONI

- Il sole rigenera continuamente tutte le altre forme di energia rinnovabile (vento, maree, biomasse, corsi d'acqua, ecc).
- Il sole ha generato in ere passate anche le principali fonti non rinnovabili (petrolio, gas e carbone derivanti dalla decomposizione di materie organiche).

# Costante solare

## DEFINIZIONE

- La **costante solare** è la **potenza radiante** per unità di superficie che incide la superficie superiore dell'atmosfera terrestre su un **piano perpendicolare** ai raggi solari.



- La **costante solare** ( $\omega_0$ ) è assunta pari a  **$1'367 \text{ W/m}^2$**  (valore medio annuale).
- E' considerata una costante perché, non essendo influenzata dai fenomeni atmosferici, varia solamente di circa il 7% durante l'anno a causa della diversa distanza sole-terra e a causa di lievi variazioni nell'emissione solare.

# Radiazione al suolo

## FATTORI DETERMINANTI

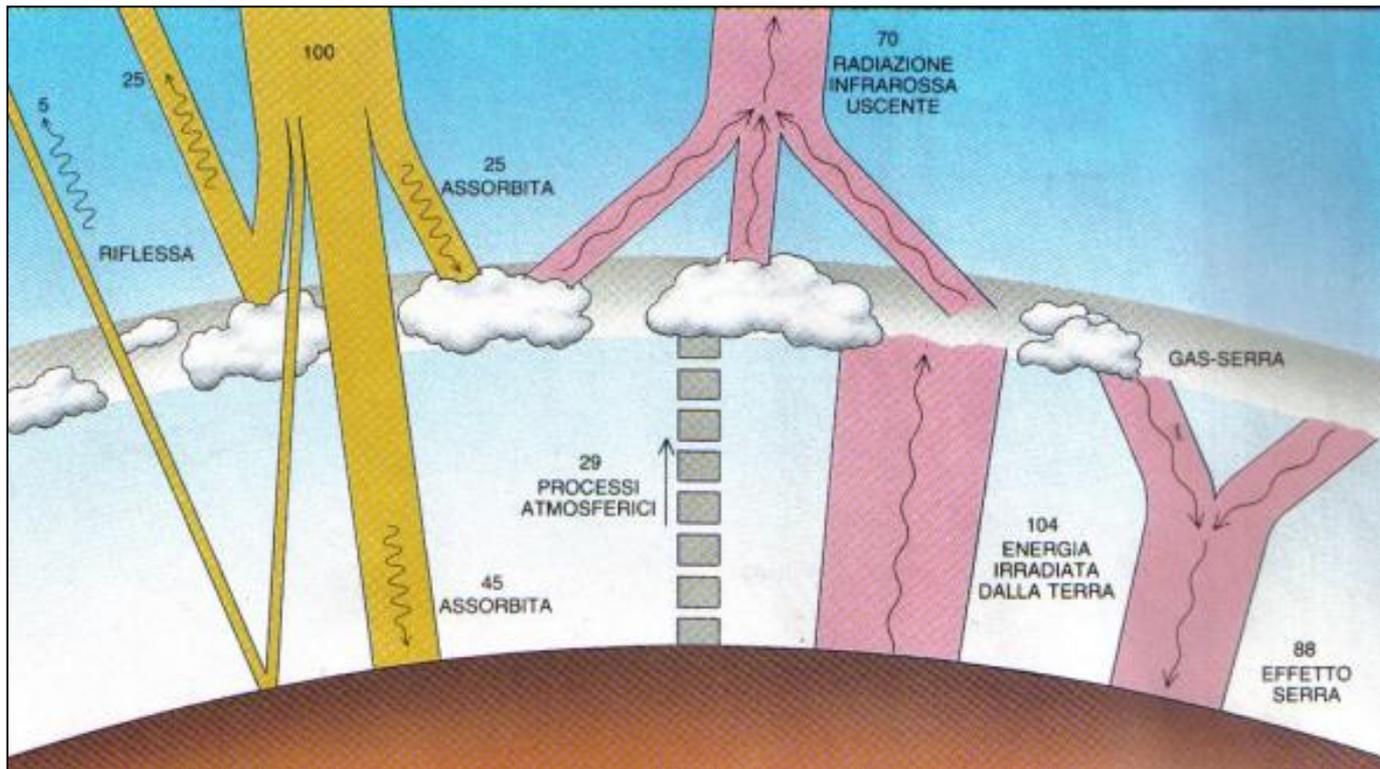
La **potenza sfruttabile** a livello della crosta terrestre è **notevolmente più bassa** rispetto a quella extra-atmosferica a causa di:

- **Trasparenza imperfetta** dell'atmosfera (vapore, nubi, inquinamento, ecc);
- **Latitudine** della località considerata (varia l'angolo di incidenza e la massa di aria attraversata dalla radiazione);
- **Rotazione** terrestre (alternanza giorno-notte);
- **Forma e posizione dell'oggetto** irraggiato;
- **Ombreggiamenti.**

# Radiazione al suolo

## TRASMISSIONE, RIFLESSIONE, ASSORBIMENTO

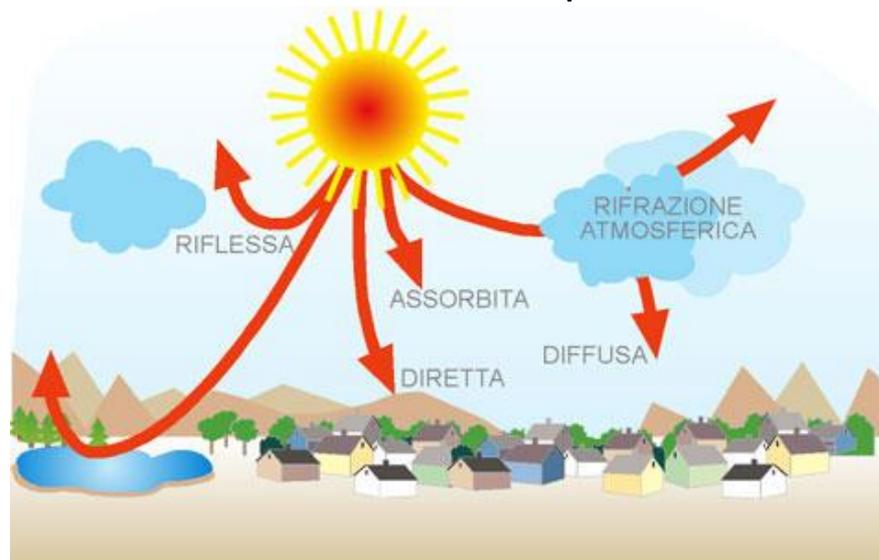
- La radiazione che arriva fino alla crosta terrestre è inferiore rispetto a quella esterna all'atmosfera: parte viene riflessa nello spazio o assorbita dall'atmosfera.



# Radiazione al suolo

## RADIAZIONE DIRETTA, DIFFUSA E RIFLESSA

- L'atmosfera ha un **effetto diffondente** sulla radiazione in transito. **Ciò fa sì che la luce non provenga solamente dal sole, ma da tutta la volta celeste.** Il fenomeno è particolarmente intenso in presenza di nubi o nebbia.



- La radiazione solare al suolo si può **suddividere** di:
  - **radiazione diretta**: non ha subito variazioni di direzione;
  - **radiazione diffusa**: ha subito variazioni di direzione a causa dell'atmosfera (non proviene direttamente dal sole ma dalla volta celeste);
  - **radiazione riflessa**: ha subito variazioni di direzione a causa di oggetti (proviene dagli oggetti sulla crosta terrestre).

# Radiazione al suolo

## RADIAZIONE DIRETTA, DIFFUSA E RIFLESSA

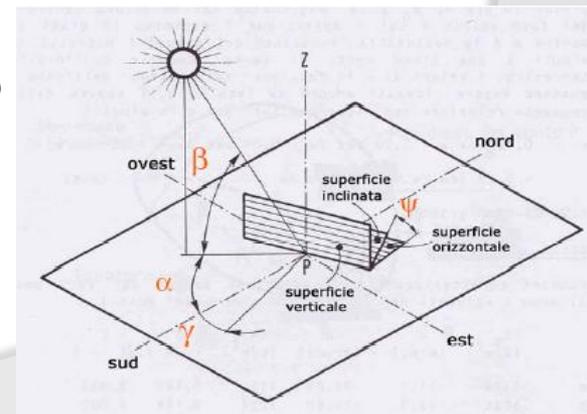
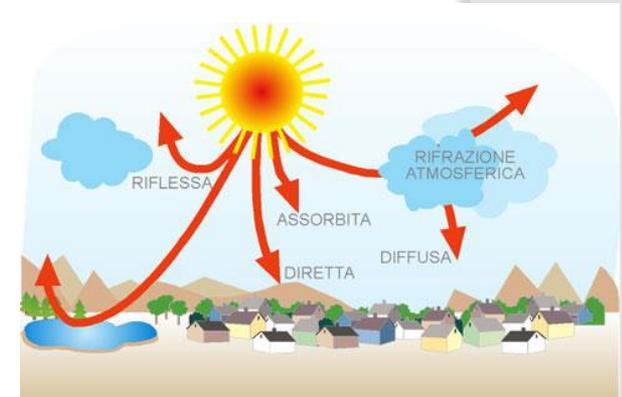
- La **radiazione globale** incidente su un oggetto collocato sulla crosta terrestre è la **somma delle componenti dirette, diffuse e riflesse (albedo)**:

$$I = I_{dir} + I_{dif} + I_a$$

dove:

- $I_{dir}$  = radiazione diretta del sole;
- $I_{dif}$  = radiazione diffusa dall'atmosfera;
- $I_a$  = radiazione di albedo o rinvio multiplo dovuta a riflessioni da parte dei corpi limitrofi.

- Il calcolo delle tre componenti è piuttosto complesso** ed è anche molto variabile in base alla località, all'ora del giorno, alle condizioni atmosferiche, alla posizione dell'oggetto, alle caratteristiche dell'ambiente circostante, ecc.

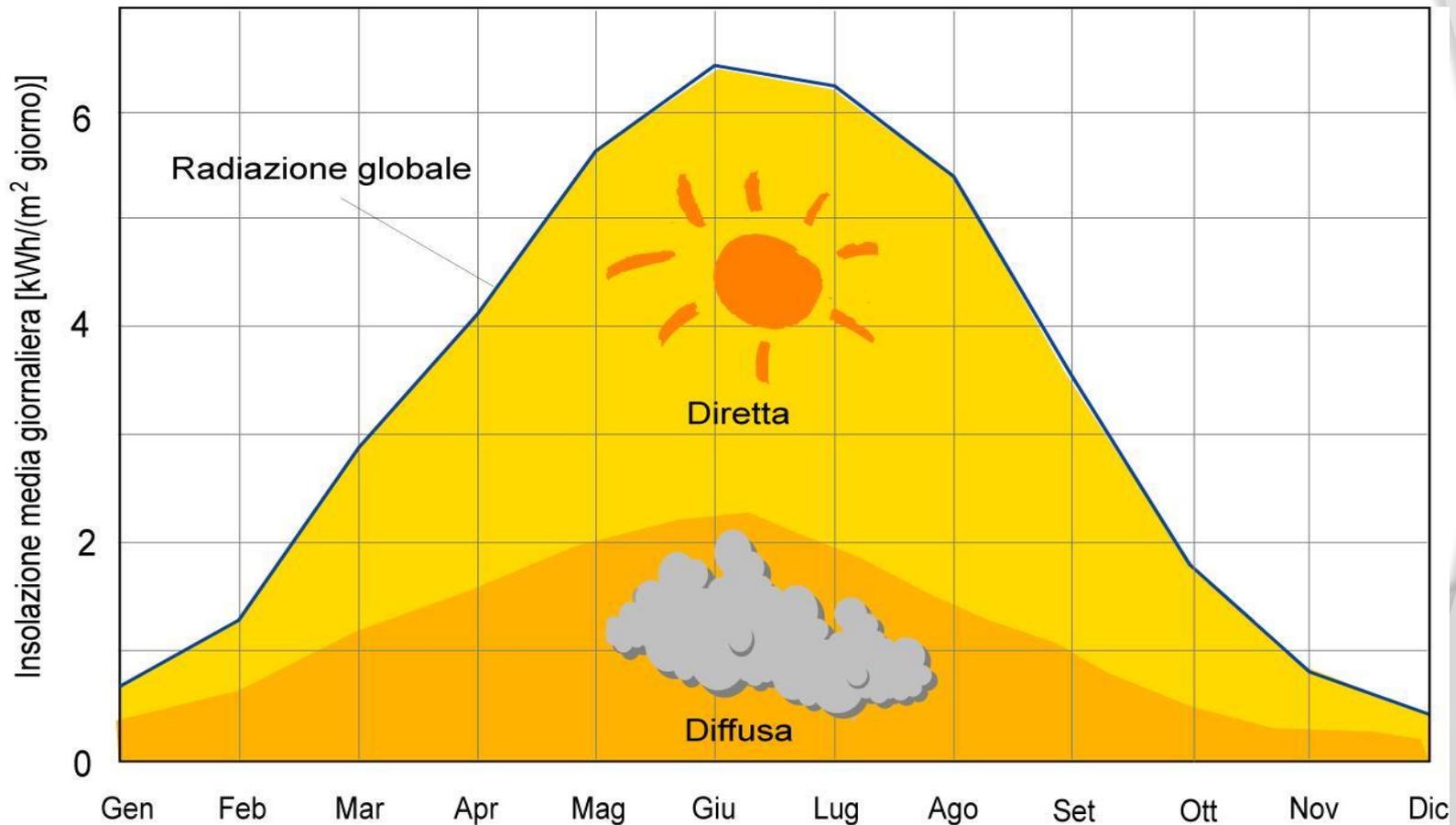


Parametri angolari per la definizione della posizione di una superficie nello spazio.

# Radiazione al suolo

## DETERMINAZIONE DELL'IRRAGGIAMENTO UTILE

- La componente diretta è superiore a quella diffusa nella stagione estiva e per climi soleggiati.



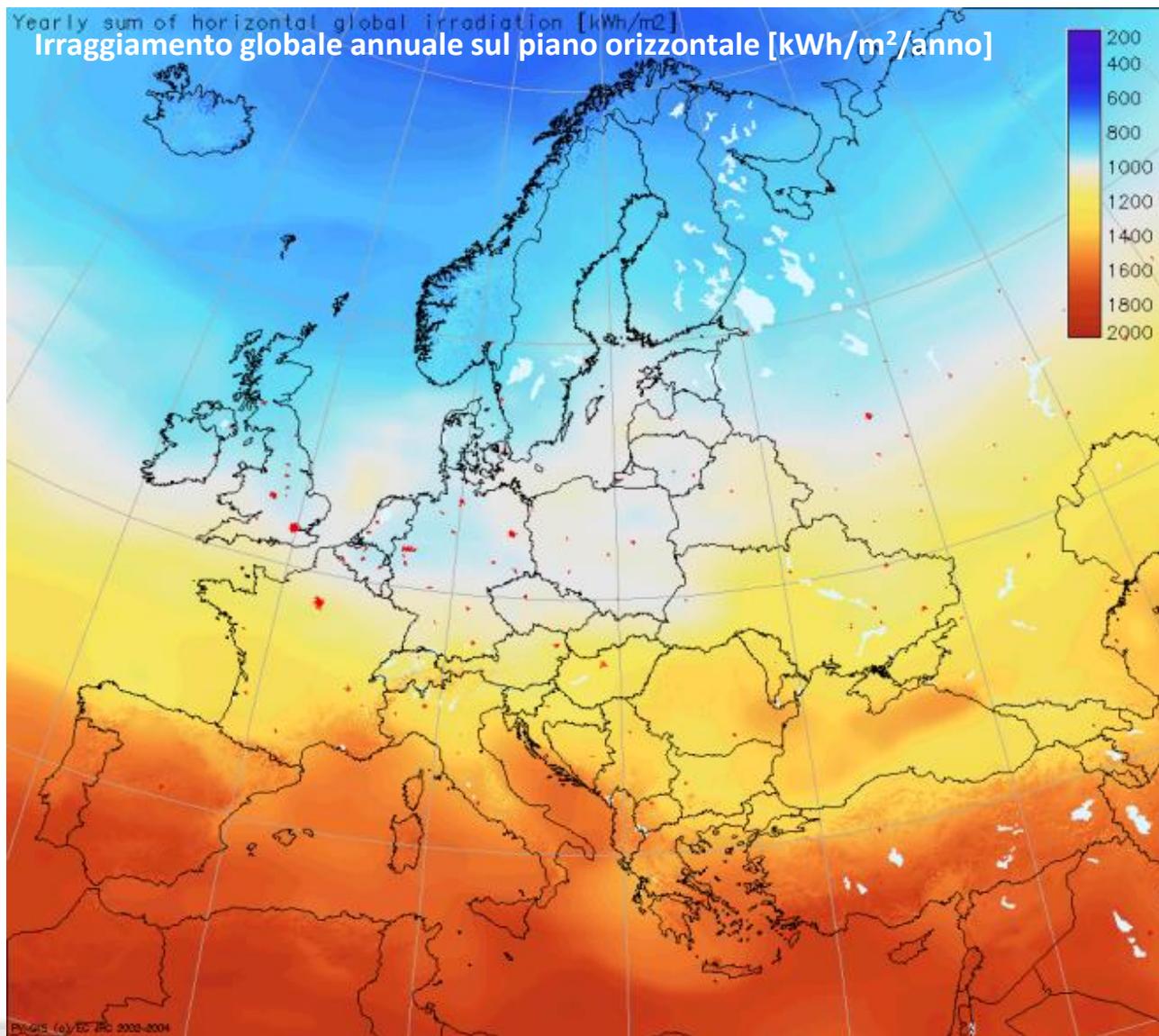
# Radiazione al suolo

## DETERMINAZIONE DELL'IRRAGGIAMENTO UTILE

- La determinazione dell'**irraggiamento utile** che incide su un oggetto può essere svolta secondo le **seguenti strade**:
  - **metodi di calcolo analitici**;
  - **mappe isoradiative** (irraggiamento medio annuale);
  - **norma UNI 10349** (irraggiamento medio mensile per ogni esposizione e per ogni località);
  - **misurazioni**.
- Nella pratica si possono utilizzare due **servizi web** gratuiti messi a disposizione da ENEA e dalla Commissione Europea:
  - **[www.solaritaly.enea.it](http://www.solaritaly.enea.it)**
  - **<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>**

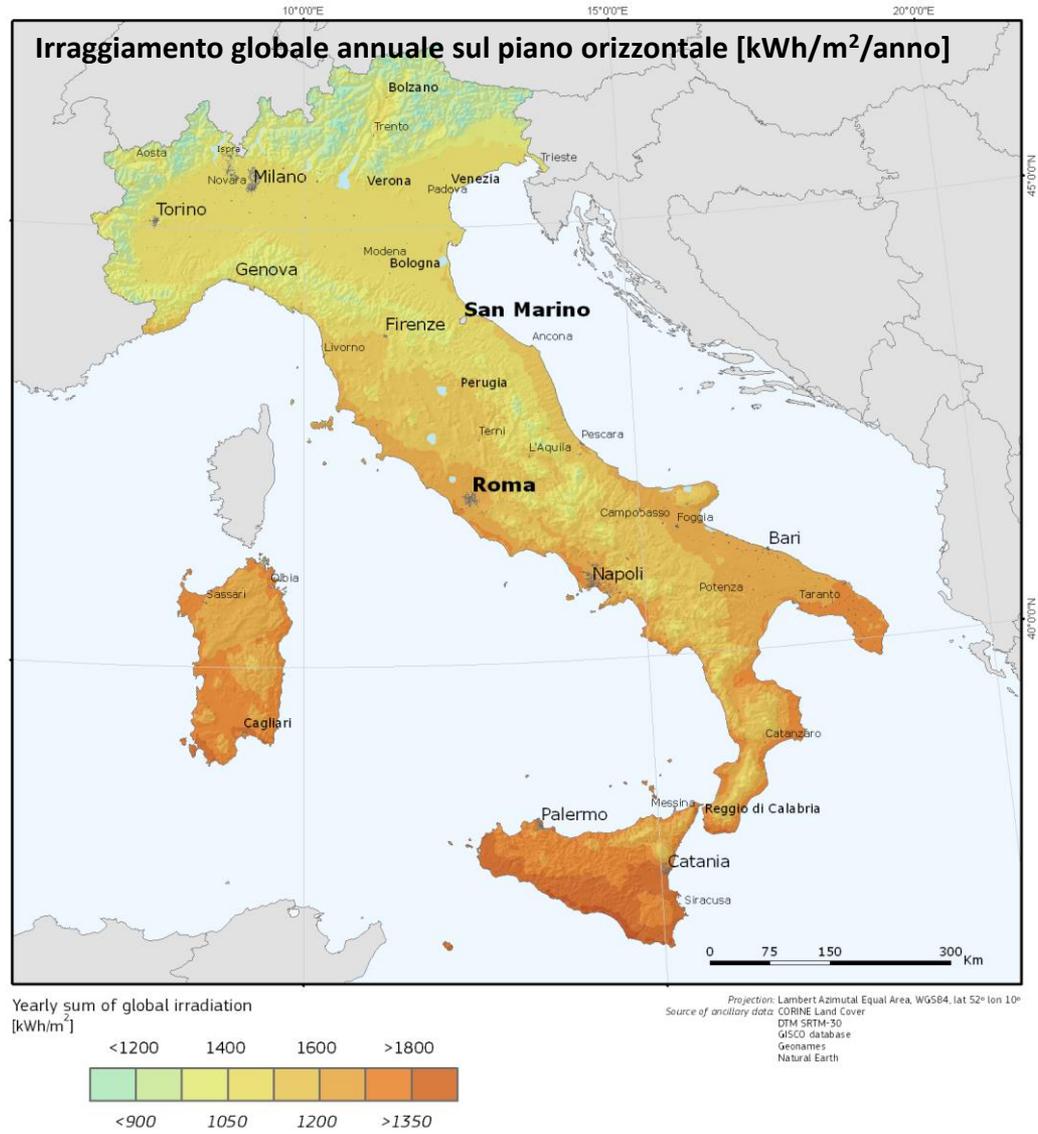
# Radiazione al suolo

## MAPPE ISORADIATIVE



# Radiazione al suolo

## MAPPE ISORADIATIVE



# Radiazione al suolo

## PV-GIS - Input




Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps



EUROPA > EC > JRC > IE > RE > SOLAREC > PVGIS > Interactive maps > europe
Contact
Important legal notice

New: PVGIS expanded to cover Asia. [Click here](#) to read about it.

e.g., "Ispra, Italy" or "45.256N, 16.9589E"

roma

Latitude:

Longitude:

cursor position:  
41.798, 12.524

selected position:  
41.903, 12.496



PV Estimation
Monthly radiation
Daily radiation
Stand-alone PV

### Monthly global irradiation data

Radiation database:

- Horizontal irradiation
- Irradiation at opt. angle
- Direct normal irradiation
- Irradiation at chosen angle:  deg.
- Linke turbidity
- Dif. / global radiation
- Optimal inclination angle

### Monthly ambient temperature data

- Average daytime temperature
- Daily average of temperature
- Number of heating degree days

### Output options

- Show graphs
- Web page

- Show horizon
- Text file
- PDF

[\[help\]](#)

Solar radiation
Temperature
Other maps

# Radiazione al suolo

## PV-GIS - Output irraggiamento (1/4)

### Monthly Solar Irradiation

#### PVGIS Estimates of long-term monthly averages

Location: 41°54'10" North, 12°29'46" East, Elevation: 65 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Optimal inclination angle is: 35 degrees

Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.0 %

Month	$H_h$	$H_{opt}$	$H(90)$	$DNI$	$I_{opt}$	$T_{24h}$
Jan	1800	3060	3110	2690	64	6.3
Feb	2810	4290	3930	3860	57	6.6
Mar	4140	5240	3940	4360	44	10.3
Apr	5310	5840	3420	5240	29	13.8
May	6540	6420	2940	6310	15	18.4
Jun	7480	6960	2660	7740	8	22.3
Jul	7750	7390	2910	8720	12	25.2
Aug	6720	7150	3660	7680	25	25.0
Sep	4900	5990	4130	5470	39	20.3
Oct	3400	4780	4060	3990	52	16.3
Nov	2100	3460	3410	3020	62	11.6
Dec	1630	2980	3170	2730	66	7.5
<b>Year</b>	4560	5300	3440	5160	35	15.3

$H_h$ : Irradiation on horizontal plane (Wh/m<sup>2</sup>/day)

$H_{opt}$ : Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m<sup>2</sup>/day)

$H(90)$ : Irradiation on plane at angle: 90deg. (Wh/m<sup>2</sup>/day)

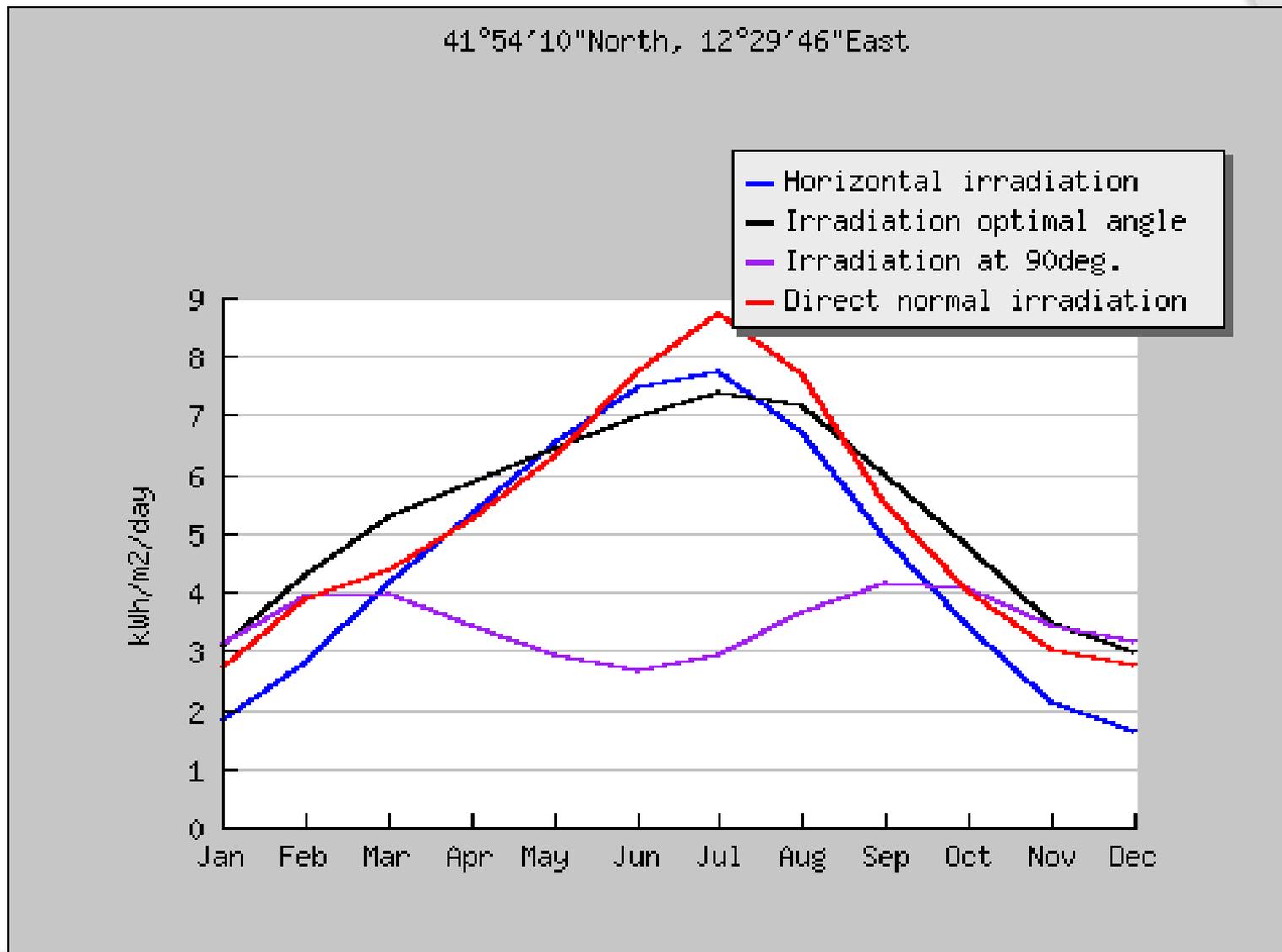
$DNI$ : Direct normal irradiation (Wh/m<sup>2</sup>/day)

$I_{opt}$ : Optimal inclination (deg.)

$T_{24h}$ : 24 hour average of temperature (°C)

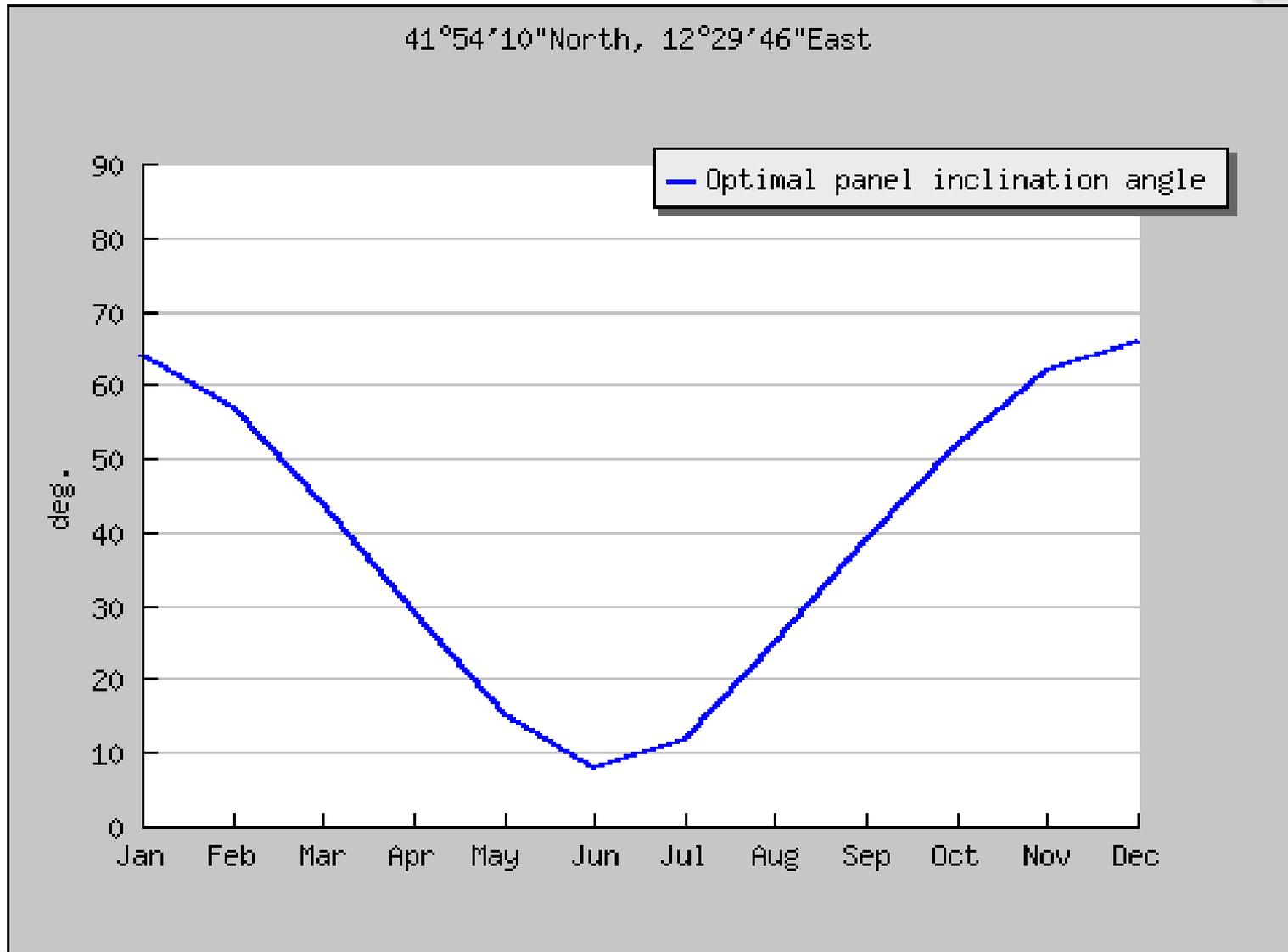
# Radiazione al suolo

## PV-GIS - Output irraggiamento (2/4)



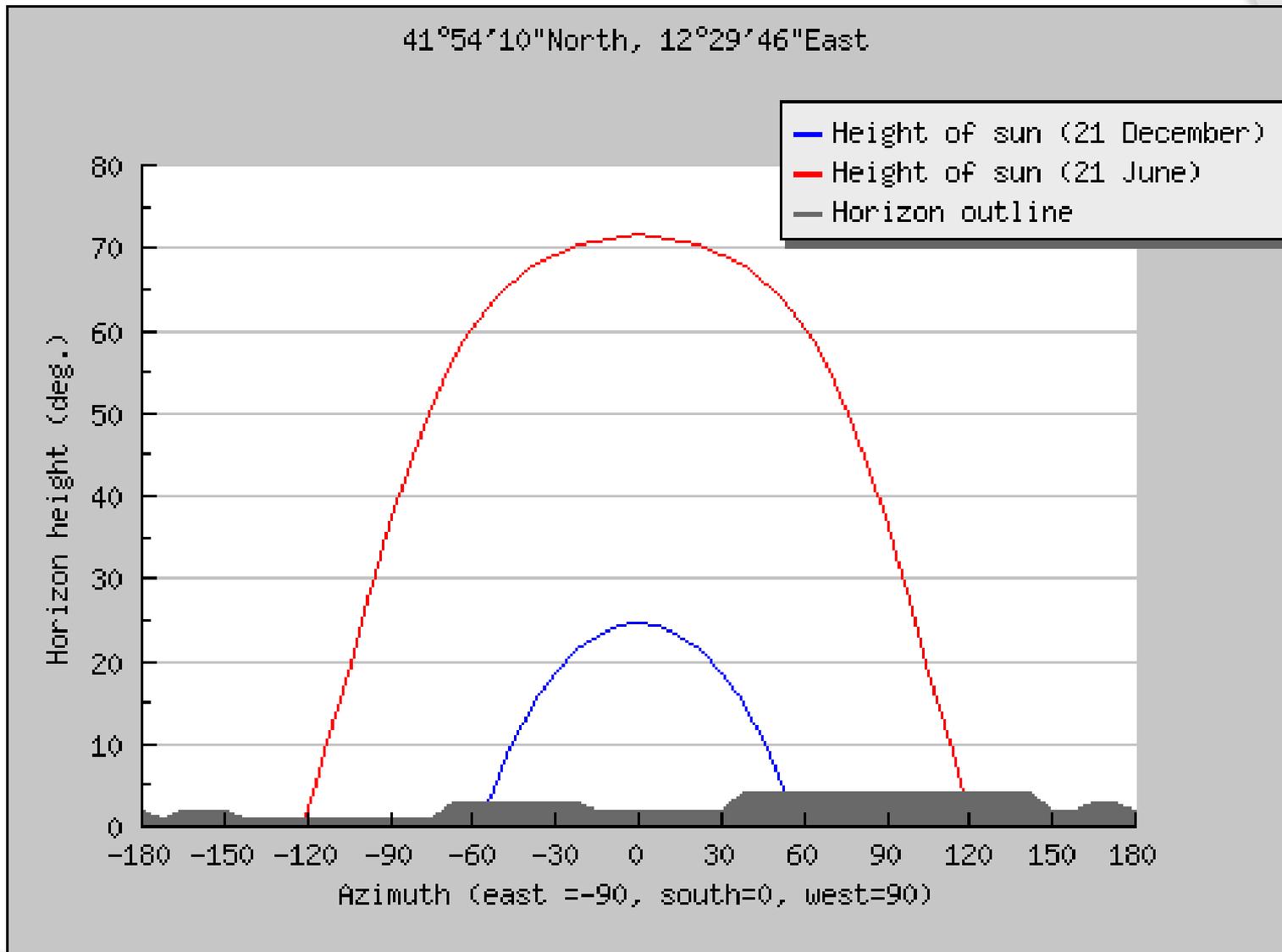
# Radiazione al suolo

## PV-GIS - Output irraggiamento (3/4)



# Radiazione al suolo

## PV-GIS - Output irraggiamento (4/4)



# Radiazione al suolo

## EFFETTO DELLE CONDIZIONI METEOROLOGICHE

- Le condizioni meteo **influenzano notevolmente** l'irraggiamento solare istantaneo.
- Per le latitudini italiane **l'irraggiamento orizzontale massimo è intorno a  $1000 \text{ W/m}^2$** , che può ridursi della metà in caso di cielo nuvoloso e scendere fino a meno di  $50 \text{ W/m}^2$  in giornate molto coperte.

Intensità approssimata della radiazione solare.

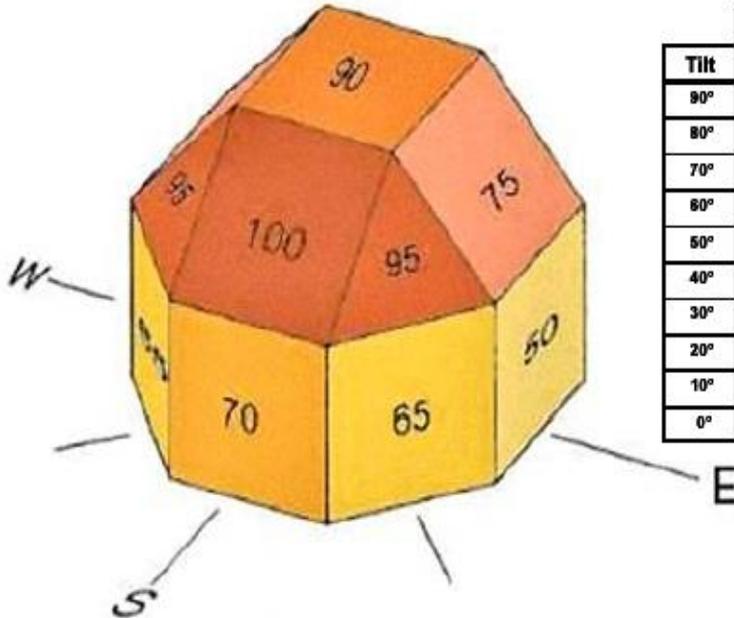
Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale								
	$1000 \text{ W/m}^2$	$600 \text{ W/m}^2$	$500 \text{ W/m}^2$	$400 \text{ W/m}^2$	$300 \text{ W/m}^2$	$200 \text{ W/m}^2$	$100 \text{ W/m}^2$	$50 \text{ W/m}^2$
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

# Radiazione su superfici orientate

## EFFETTO DI ORIENTAMENTO E INCLINAZIONE

- L'**orientamento** (o **Azimut**) è l'angolo compreso tra la normale della superficie irraggiata ed il sud geografico.
- L'**inclinazione** (o **Tilt**) è l'angolo compreso tra il piano della superficie irraggiata ed il piano orizzontale.

Percentuale di energia ricevuta annualmente da ciascuna superficie rispetto a quella della superficie ottimale.

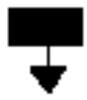


Tilt	AZ												
	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
90°	47	52	57	62	65	68	70	70	68	65	61	56	50
80°	53	59	64	70	74	77	79	78	77	73	69	63	57
70°	59	65	71	77	82	85	87	87	84	81	76	70	63
60°	65	71	78	83	88	91	93	93	90	87	82	75	68
50°	70	77	83	89	93	96	97	97	95	91	86	80	73
40°	76	82	87	91	96	98	100	99	97	94	90	84	78
30°	80	84	90	93	97	98	100	99	98	95	91	87	82
20°	83	87	90	93	95	97	97	97	97	94	91	89	85
10°	86	88	90	90	92	93	93	93	93	92	91	90	89
0°	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87

# Radiazione su superfici orientate

## EFFETTO DI ORIENTAMENTO E INCLINAZIONE

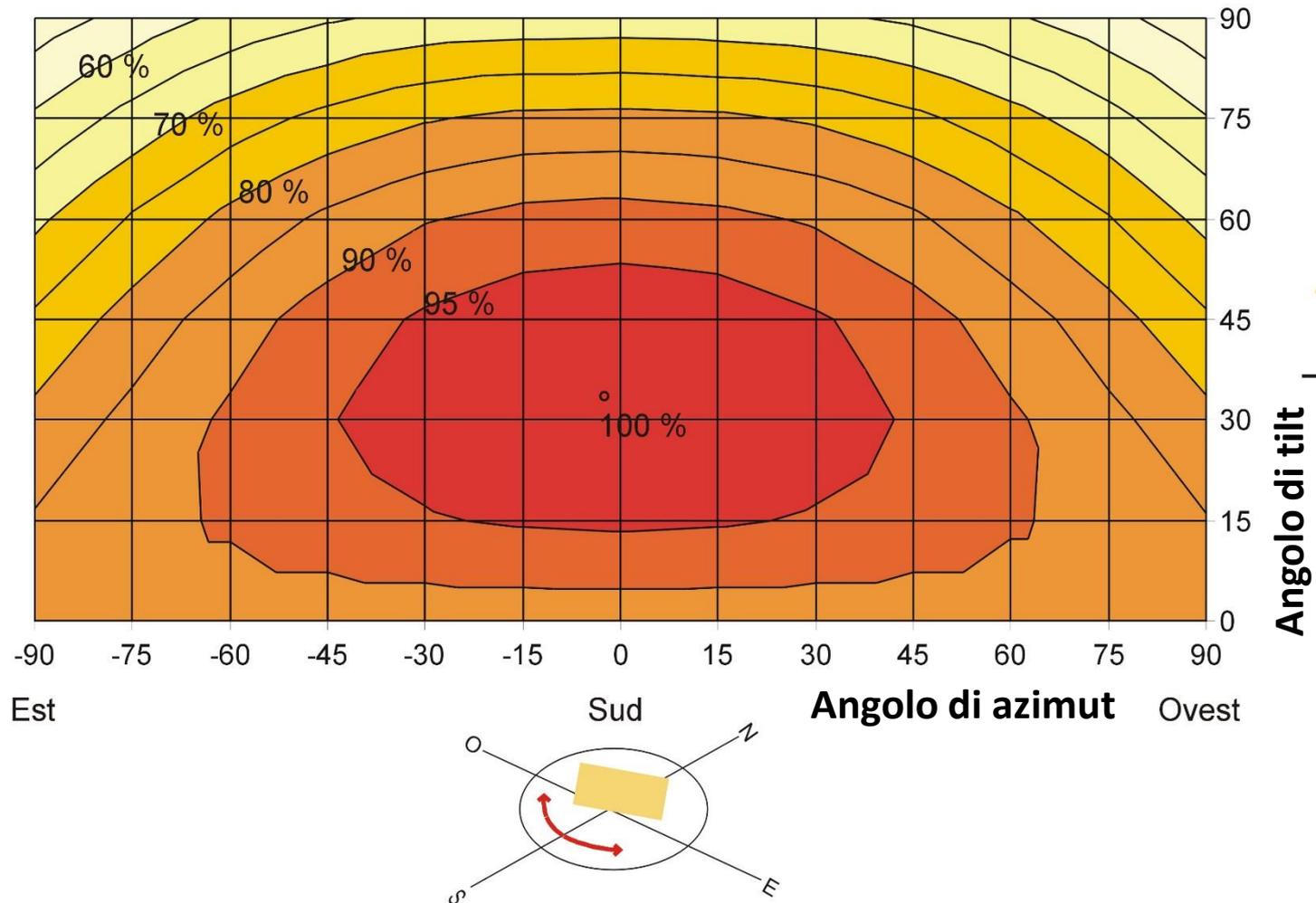
- Per le latitudini italiane la superficie che riceve maggiore energia durante l'anno è orientata a sud (azimut=0°) e inclinata di 36° sull'orizzontale.

INCLINAZIONE \ ORIENTAMENTO		 0° 	 30° 	 60° 	 90° 
		Est 	0,93	0,90	0,78
Sud-Est 	0,93	0,96	0,88	0,66	
Sud 	0,93	1,00	0,91	0,68	
Sud-Ouest 	0,93	0,96	0,88	0,66	
Ouest 	0,93	0,90	0,78	0,55	

- Non è detto che 36° sia sempre l'angolo ottimale, occorre ottimizzarlo in base alla località (presenza di ombreggiamenti, ecc) ed in base al periodo di utilizzo dell'energia (es. solare termico: più inclinato di 36° per avere maggiore energia d'inverno).

# Radiazione su superfici orientate

## EFFETTO DI ORIENTAMENTO E INCLINAZIONE



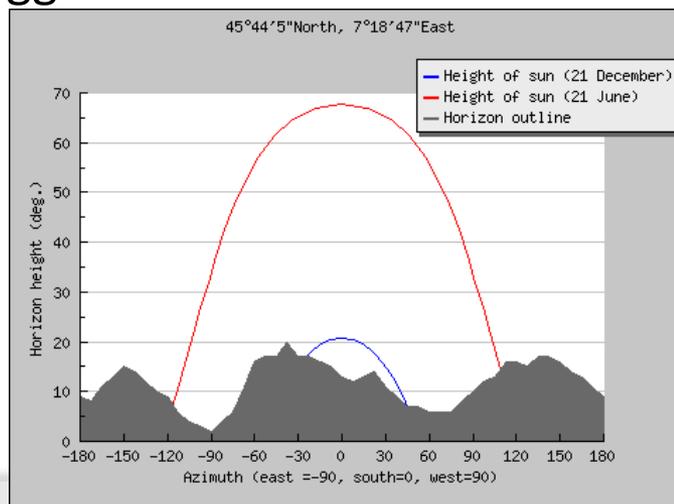
# Radiazione su superfici orientate e ombreggiate

## EFFETTO DEGLI OMBREGGIAMENTI

- Gli ombreggiamenti possono influire notevolmente sulla disponibilità di radiazione solare.
- L'ombreggiamento può essere suddiviso in due categorie:

### 1. Ombreggiamento generale

Si tratta di **oggetti all'orizzonte che schermano parte del cammino solare**. Di solito sono dovuti alla **configurazione orografica** del terreno (montagne, colline, ecc). Queste ombre sono facilmente prevedibili poiché fanno parte del territorio e schermano in modo uniforme tutta la superficie irraggiata. Lo stesso PV-GIS considera la presenza di montagne nel calcolo dell'irraggiamento.

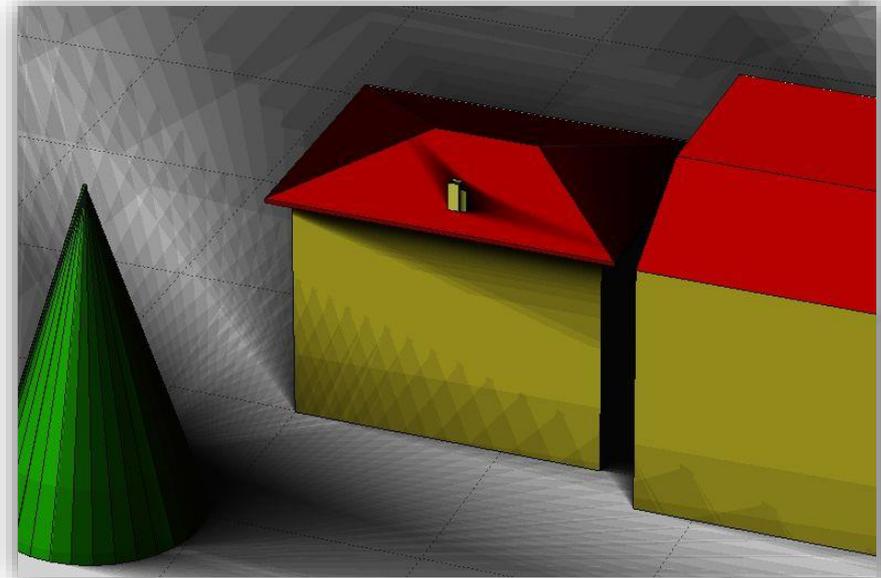
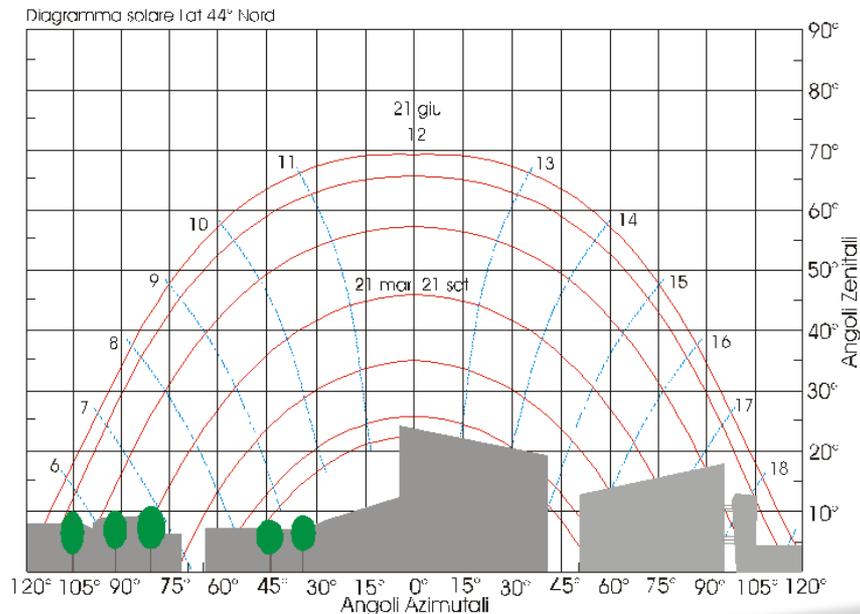


# Radiazione su superfici orientate e ombreggiate

## EFFETTO DEGLI OMBREGGIAMENTI

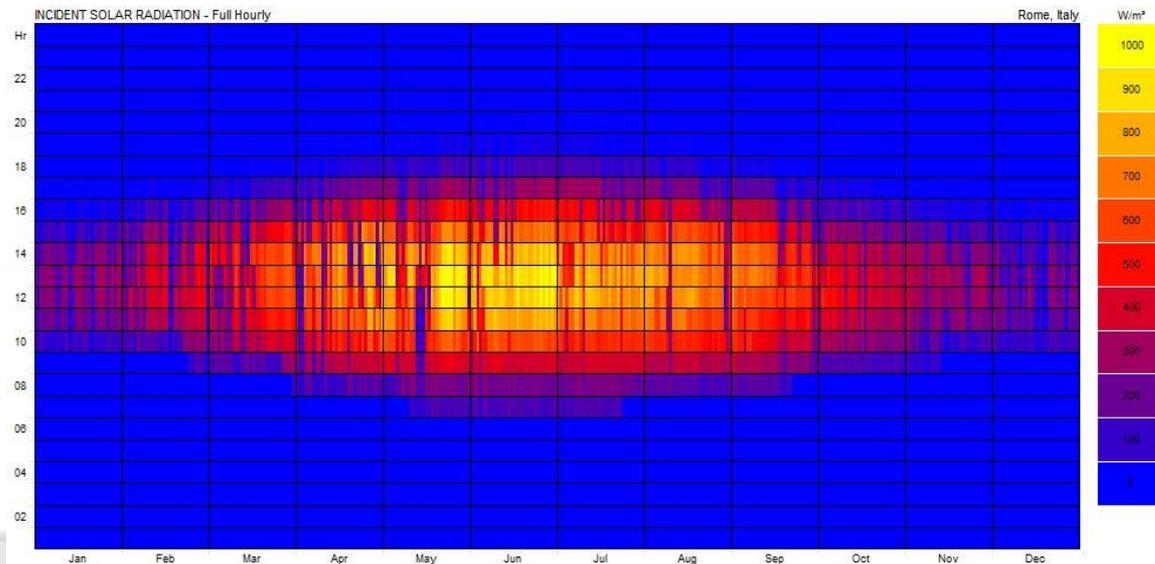
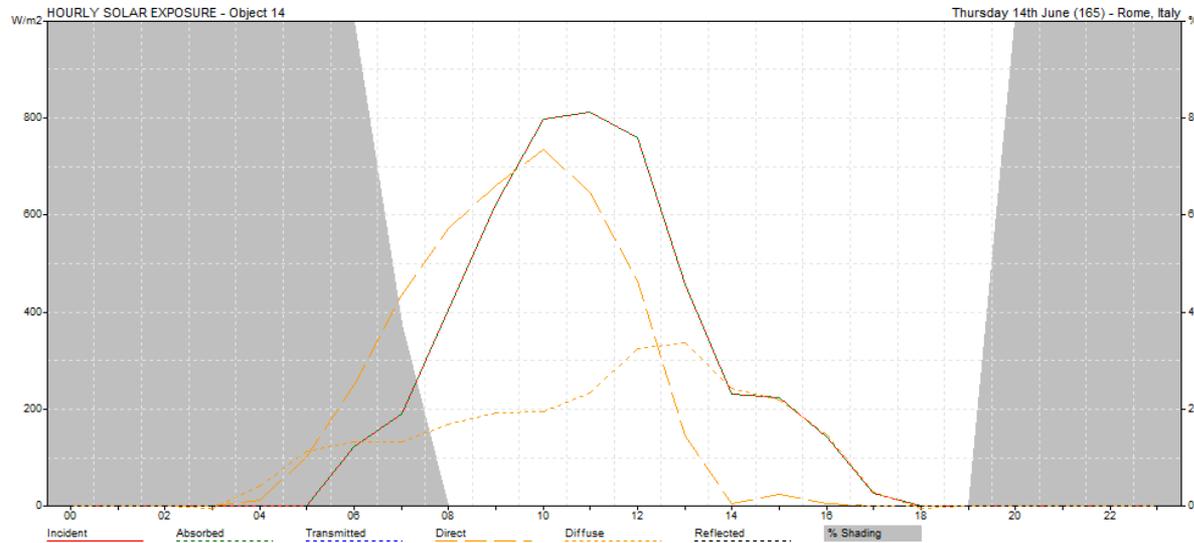
### 2. Ombreggiamento particolare

E' dovuto all'**effetto schermante di oggetti relativamente vicini** (es: edifici circostanti, comignoli, vegetazione, ecc) non prevedibili a priori. In questo caso è necessario costruire delle curve di ombreggiamento ad-hoc (fig.1). Inoltre, se tali oggetti ombreggiano solo parte della superficie interessata, allora è necessario un **calcolo dinamico tridimensionale** per effettuare valutazioni corrette.



# Radiazione su superfici orientate e ombreggiate

## EFFETTO DEGLI OMBREGGIAMENTI



# Utilizzo dell'energia solare

## IMPIANTI AD ENERGIA SOLARE

- L'energia radiante solare può essere convertita nelle seguenti **tipologie di energia utile**:
  - **Energia termica a bassa temperatura** (max 80°C): riscaldamento dell'acqua ai fini sanitari e/o di riscaldamento ambientale → **impianti solari termici**
  - **Energia termica ad alta temperatura** (centinaia di gradi): produzione di vapore ed espansione del vapore in turbina per la generazione di energia elettrica → **impianti solari termodinamici**
  - **Energia elettrica**: produzione di energia elettrica direttamente mediante l'effetto fotovoltaico → **impianti fotovoltaici**



# 2.

## SOLARE TERMICO A BASSA TEMPERATURA

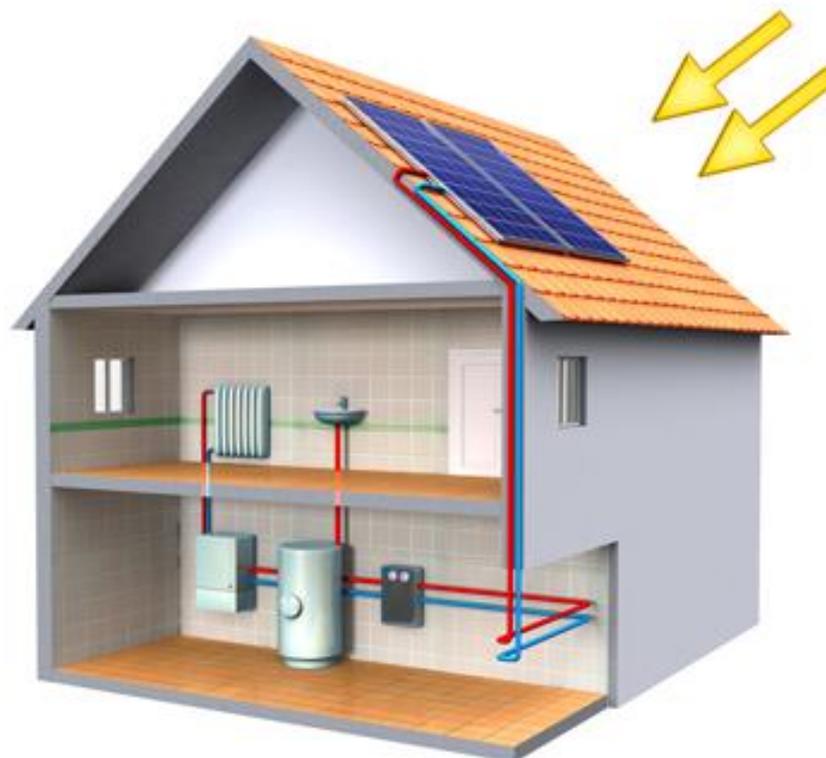
### INDICE DEL CAPITOLO 2

• <b>Solare termico</b> .....	28
○ Componenti del sistema .....	30
○ Configurazioni di impianto .....	38
○ Criteri di dimensionamento .....	41
○ Dimensionamento semplificato .....	46

# Impianti solari termici a bassa temperatura

## FUNZIONALITA' E OBIETTIVI

- L'impianto solare termico a bassa temperatura ha la funzione di **convertire l'energia elettromagnetica** contenuta nella radiazione solare **in energia termica** con l'obiettivo di **produrre acqua calda** per usi sanitari e/o per riscaldamento degli ambienti.



# Componenti di un impianto solare termico

## COMPONENTI

- L'impianto solare termico è composto dai seguenti **elementi principali**:
  - 1. Collettore solare** (o pannello solare termico)

Rappresenta l'elemento preposto alla captazione della radiazione solare, alla sua conversione in energia termica e alla successiva trasmissione al fluido termovettore (miscela di acqua e glicole propilenico).
  - 2. Serbatoio di accumulo**

Costituisce la riserva di acqua calda prodotta dall'impianto e pronta all'uso.
  - 3. (Eventuale) pompa di circolazione**

Serve alla movimentazione del fluido termovettore per impianti che non sfruttano la circolazione naturale.
  - 4. Tubazioni, valvole, carpenteria, sistemi di fissaggio, ecc**



# Collettori solari

## TIPOLOGIE DI COLLETTORI

- I collettori solari a bassa temperatura si distinguono in 3 macro-categorie (a complessità ed efficienza crescente):

### 1. Collettori non vetrati

Tutte le soluzioni, più o meno artigianali, che permettono di riscaldare l'acqua mediante radiazione solare.

**Pro:** semplicità, economicità

**Contro:** efficienza

**Utilizzi:** temporanei solo estivi (campeggi, case vacanze, chalet, ecc)



# Collettori solari

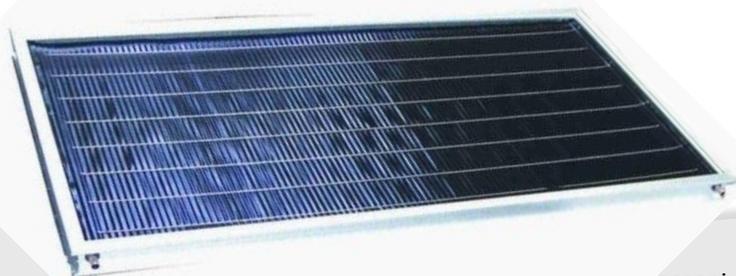
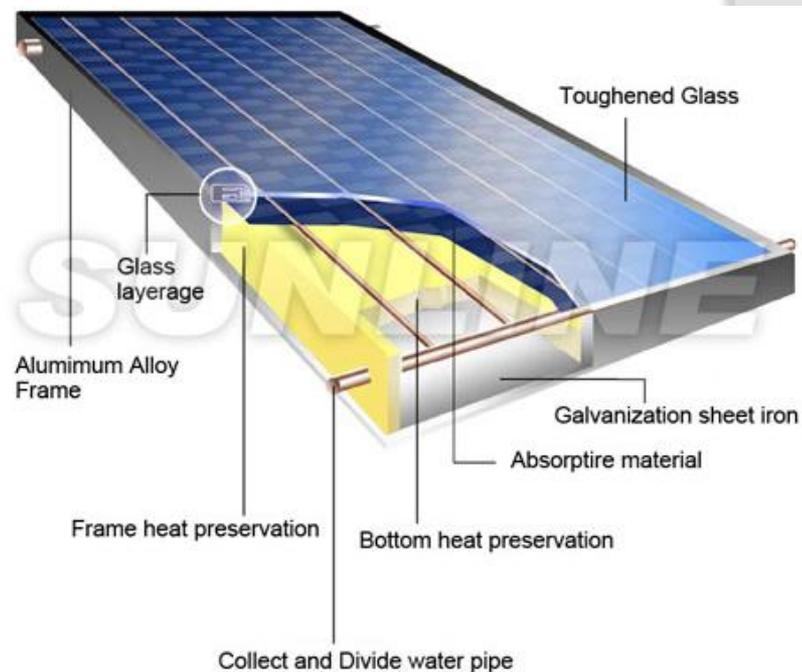
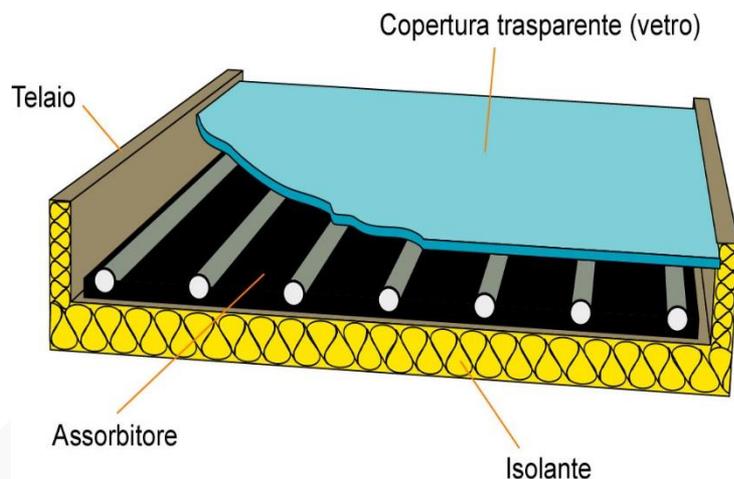
## TIPOLOGIE DI COLLETTORI

### 2. Collettori piani vetrati

Pannelli realizzati appositamente per assorbire radiazione solare e limitare al massimo le dispersioni verso l'ambiente esterno (grazie alla chiusura vetrata che realizza l'effetto serra).

**Pro:** discreta efficienza, buona resa estetica **Contro:** prezzo medio-alto

**Utilizzi:** sia estivi che invernali (residenze, piscine, centri sportivi, ecc)



# Collettori solari

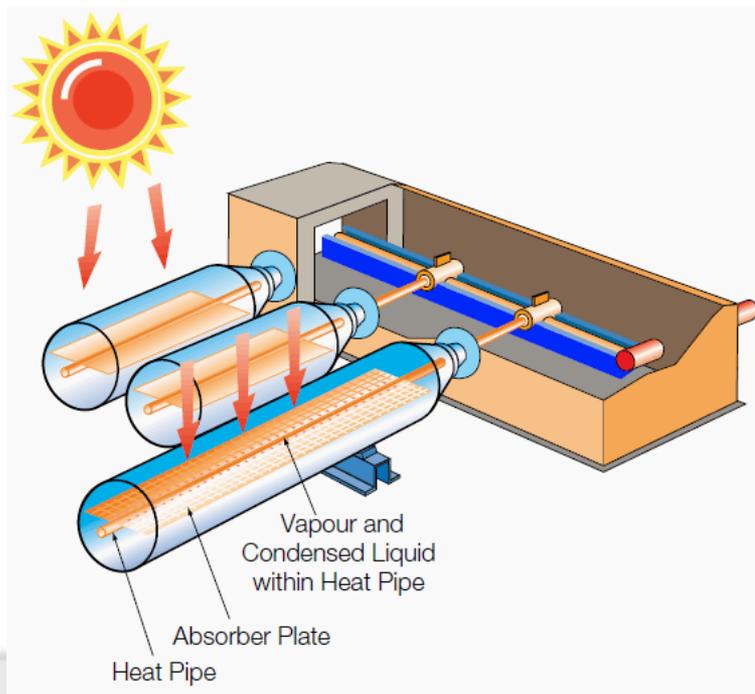
## TIPOLOGIE DI COLLETTORI

### 3. Collettori a tubi sottovuoto

Pannelli realizzati appositamente per assorbire radiazione solare e limitare al massimo le dispersioni verso l'ambiente esterno. L'elemento captante è costituito da *heat-pipes* poste all'interno di tubi in vetro sottovuoto (effetto serra + riduzione di conduzione e convezione).

**Pro:** buona efficienza, buona resa estetica    **Contro:** prezzo alto

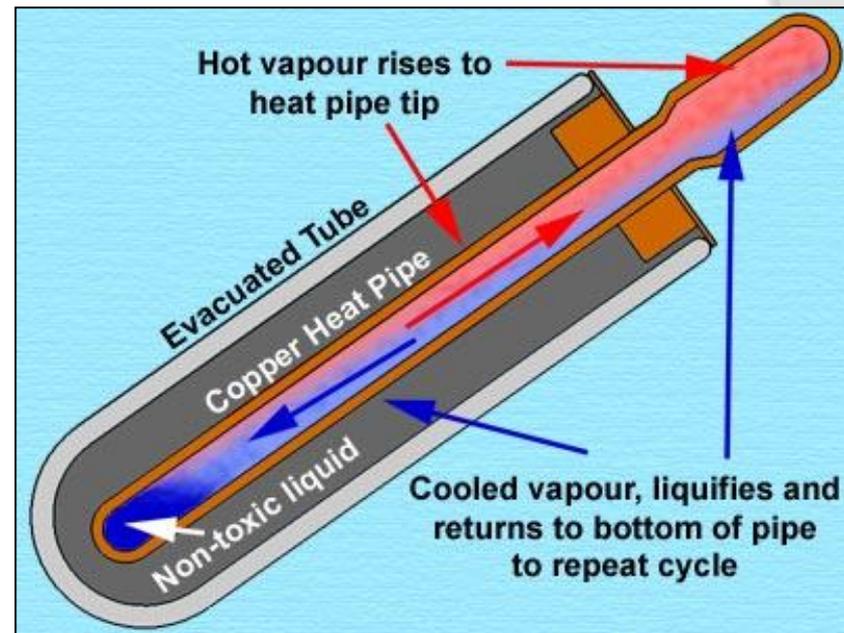
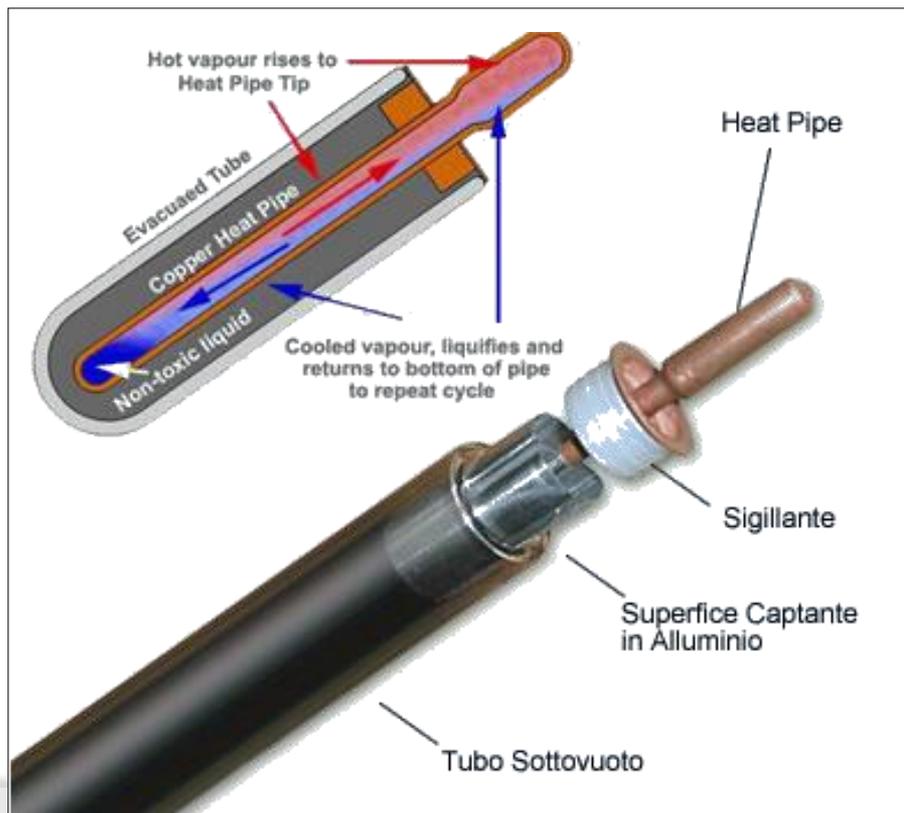
**Utilizzi:** sia estivi che invernali (residenze, piscine, centri sportivi, ecc)



# Collettori solari

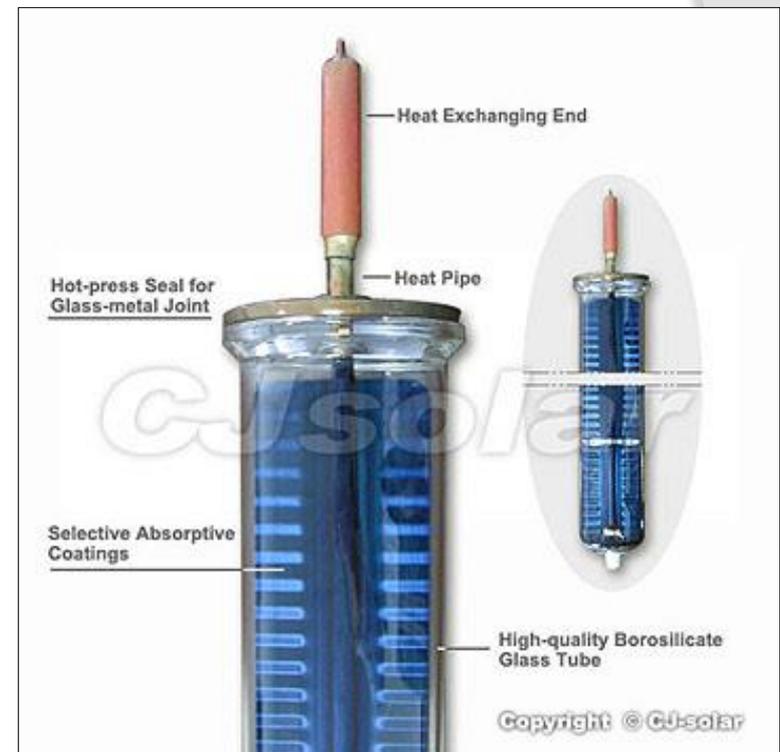
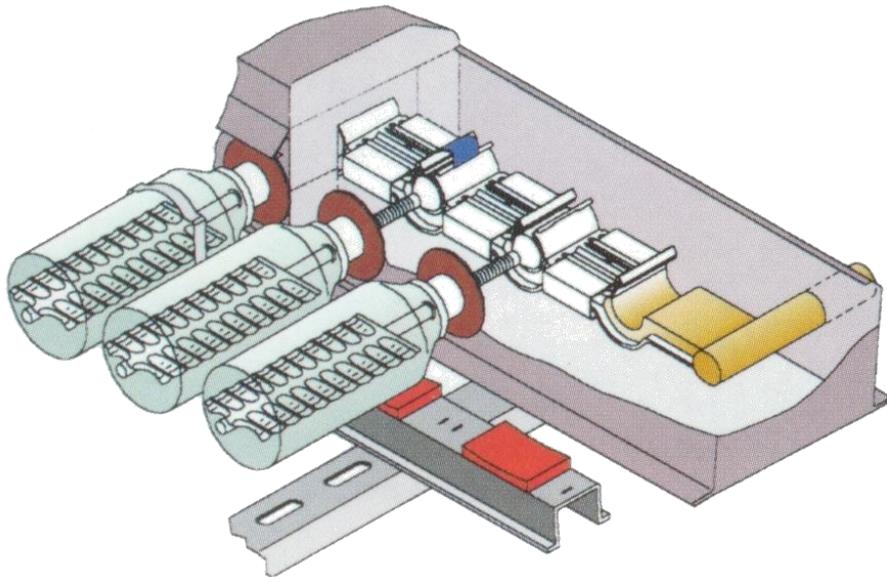
## TECNOLOGIA HEAT PIPES

- Le **heat pipes** sono letteralmente "tubi di calore".
- Sono tubi sigillati con all'interno un **liquido che evapora nella zona calda** (lungo il collettore) e **condensa nella zona fredda** (parte alta dove passa il flusso d'acqua). Sfruttano il passaggio di stato evaporazione-condensazione per aumentare lo scambio energetico.



# Collettori solari

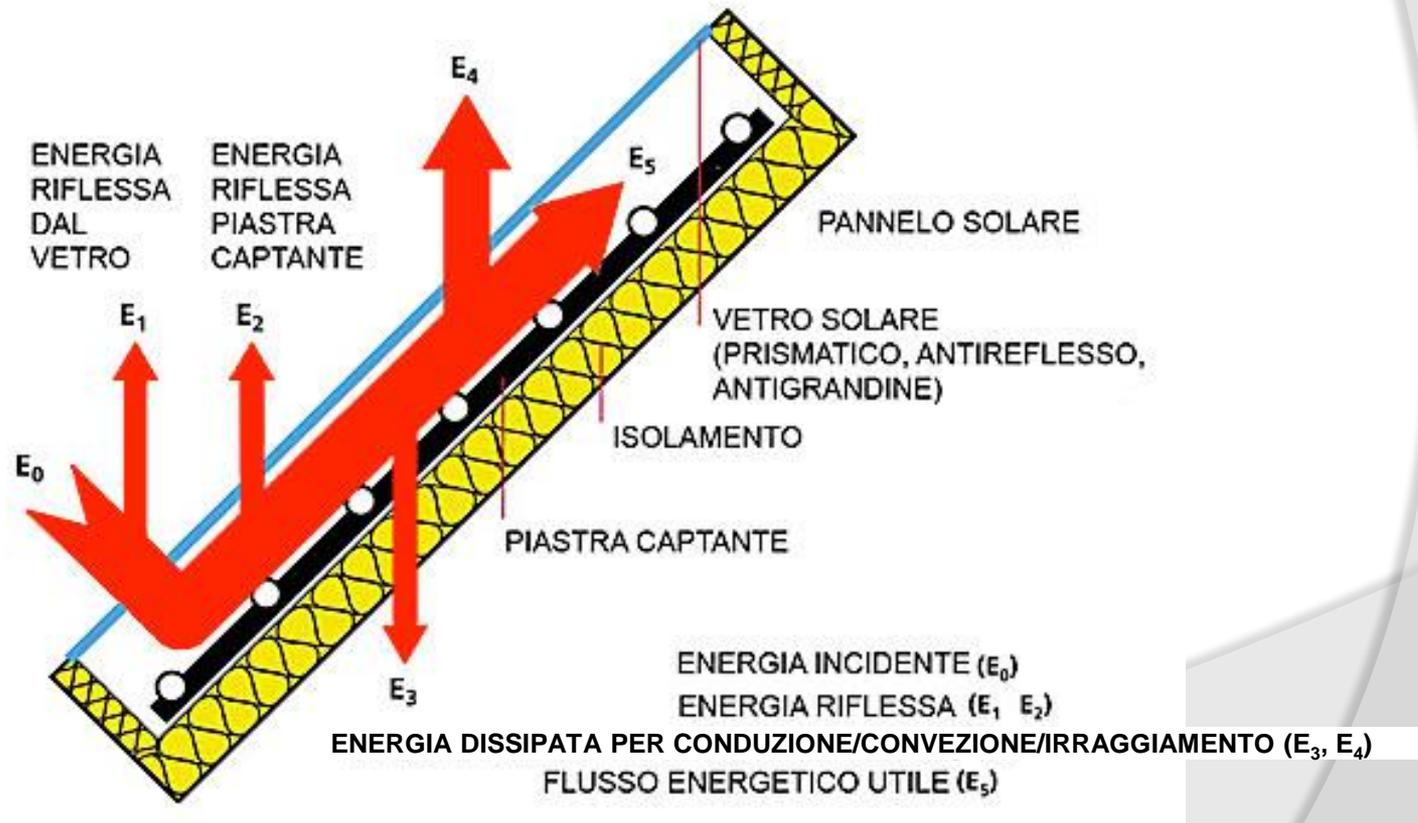
## TECNOLOGIA HEAT PIPES



# Collettori solari

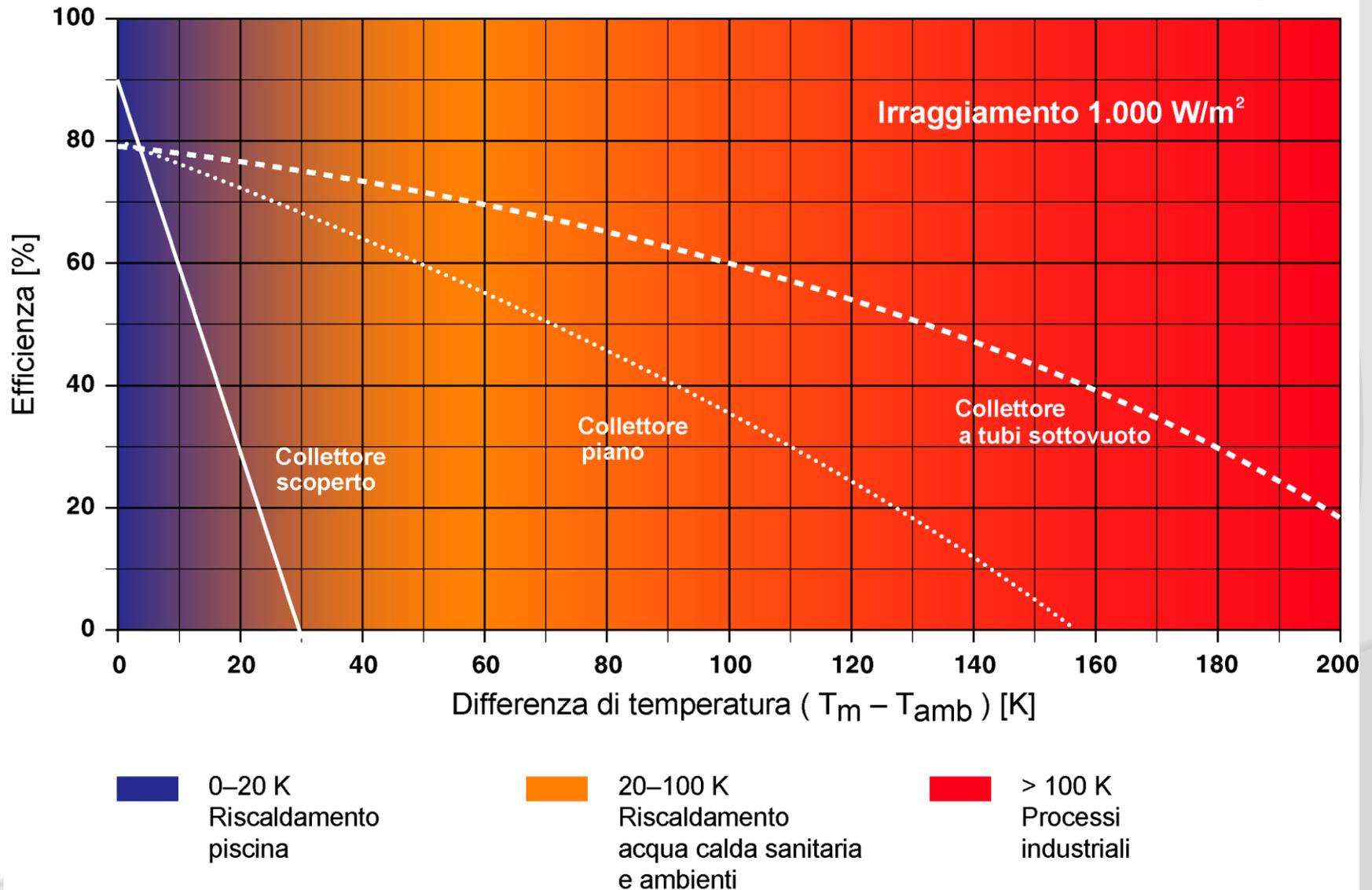
## EFFICIENZA DI CONVERSIONE

- L'**efficienza di conversione** della potenza radiante in potenza termica **dipende dalla capacità del collettore di assorbire energia senza disperderla nell'ambiente circostante.**



# Collettori solari

## CONFRONTO DI EFFICIENZA



# Configurazioni di impianto

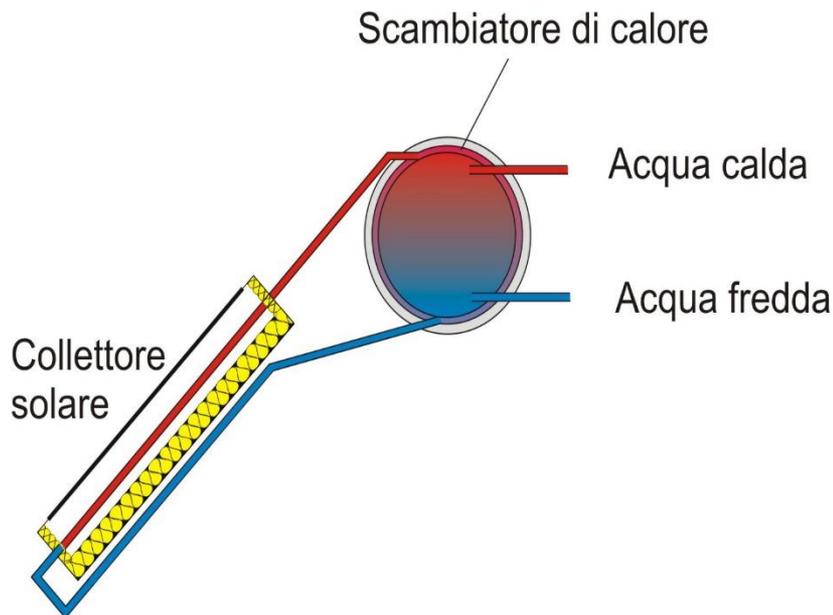
## CIRCOLAZIONE NATURALE

- Nell'impianto a **circolazione naturale** il movimento dell'acqua attraverso i pannelli è realizzato mediante **convezione naturale**, senza pompe.
- E' necessario che il serbatoio di accumulo sia posto al di sopra dei pannelli.

**Pro:** nessun consumo elettrico, minori costi

**Contro:** resa estetica

**Utilizzi:** piccoli impianti domestici



# Configurazioni di impianto

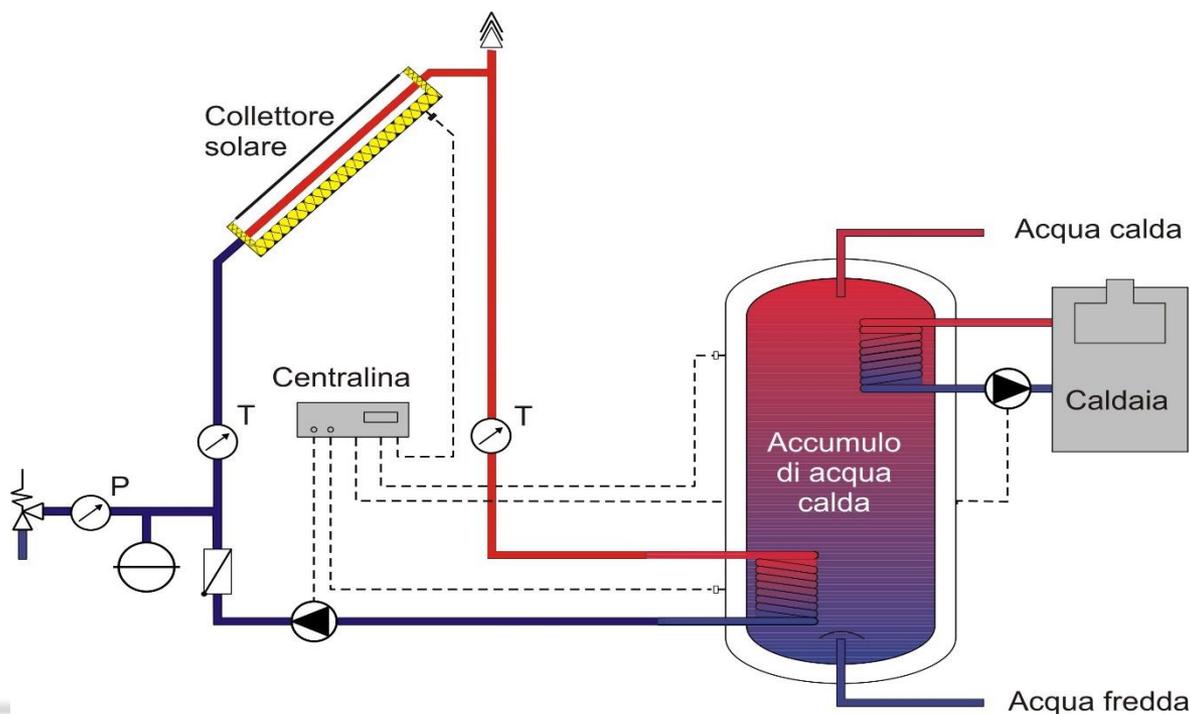
## CIRCOLAZIONE FORZATA

- Nell'impianto a **circolazione forzata** il movimento dell'acqua attraverso i pannelli è realizzato mediante una **pompa di circolazione**.
- Il serbatoio di accumulo può essere collocato in posizione qualsiasi.

**Pro:** flessibilità, maggiore resa estetica

**Contro:** costi, consumo elettrico

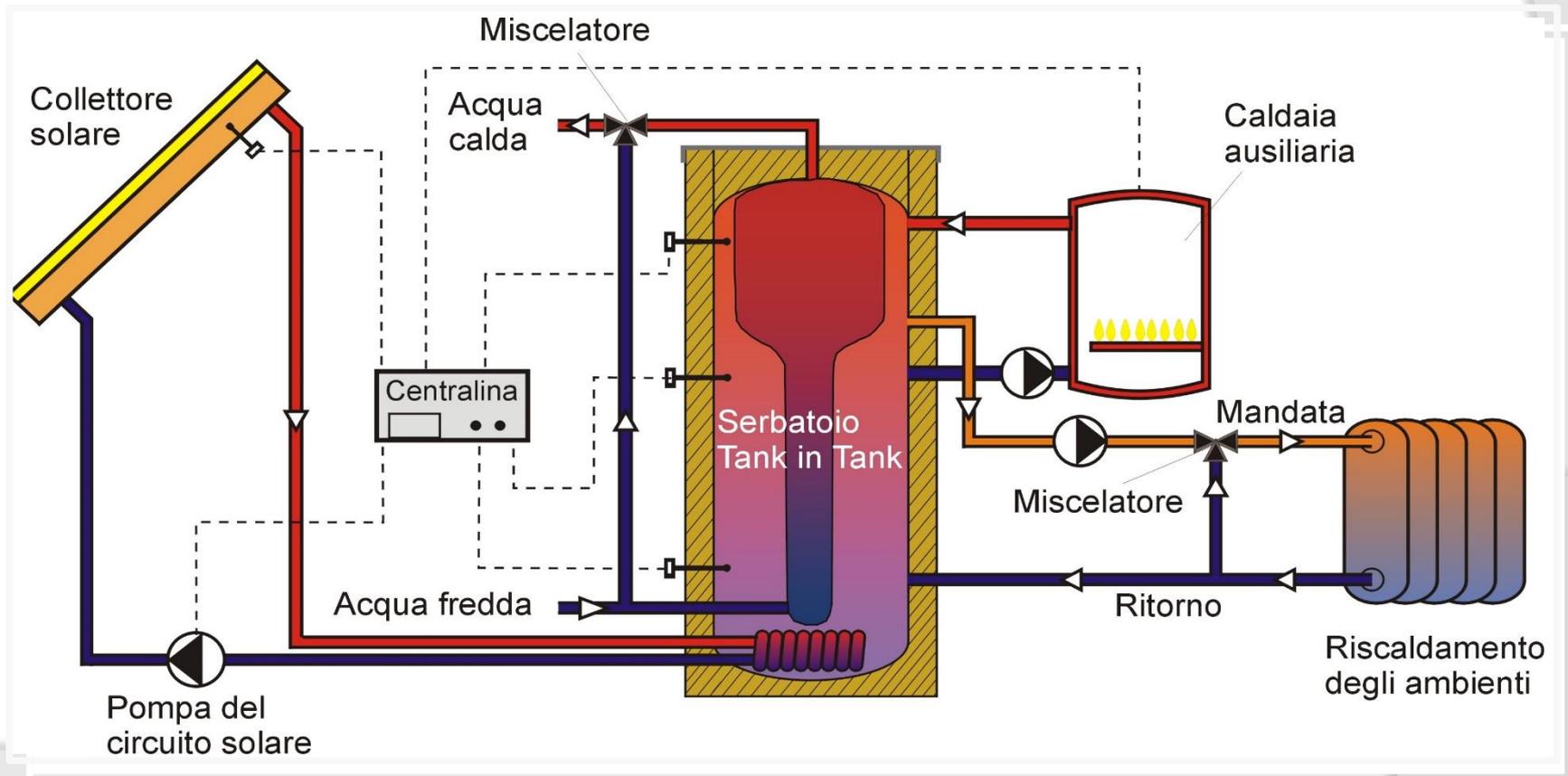
**Utilizzi:** impianti qualsiasi



# Configurazioni di impianto

## RISCALDAMENTO E ACQUA CALDA SANITARIA

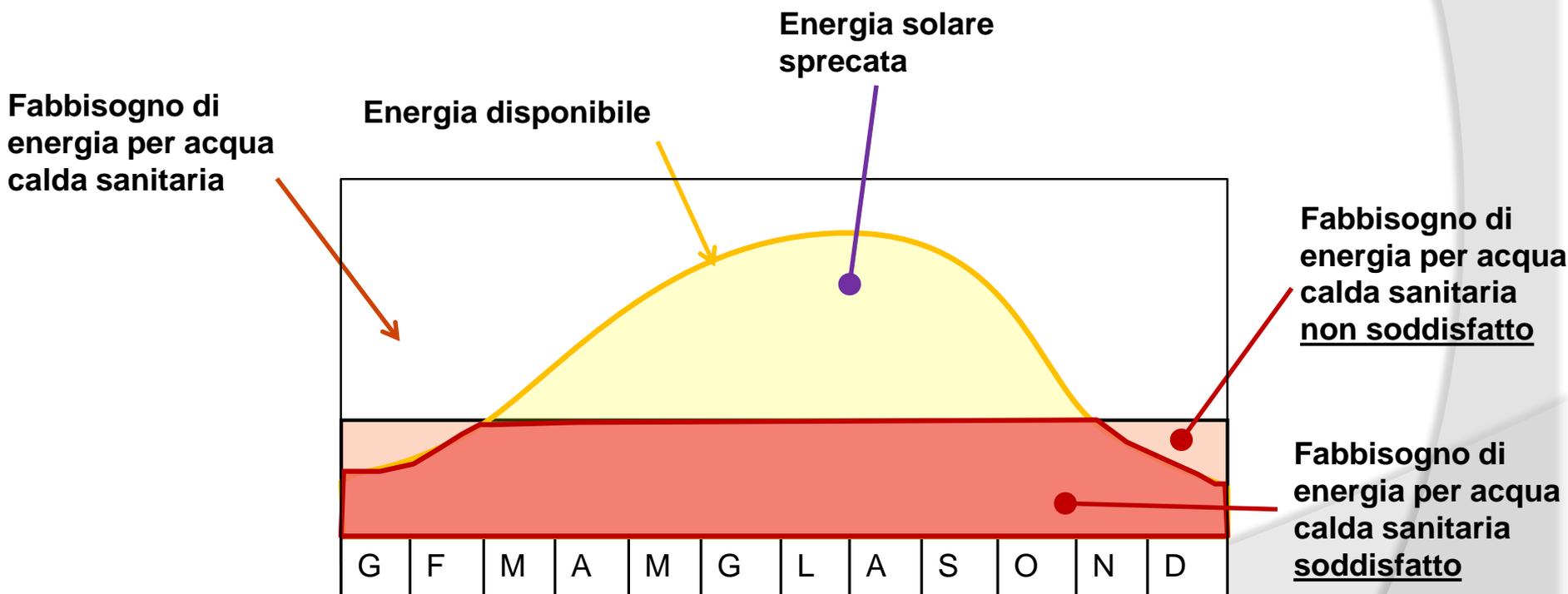
- Se l'impianto solare termico è adibito sia a riscaldamento che a produzione di acqua calda sanitaria è possibile un'**integrazione delle due funzionalità** con la presenza di un **riscaldatore ausiliario** (caldaia, resistenza elettrica o altro) in caso di insufficienza dell'energia solare.



# Dimensionamento solare termico

## CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

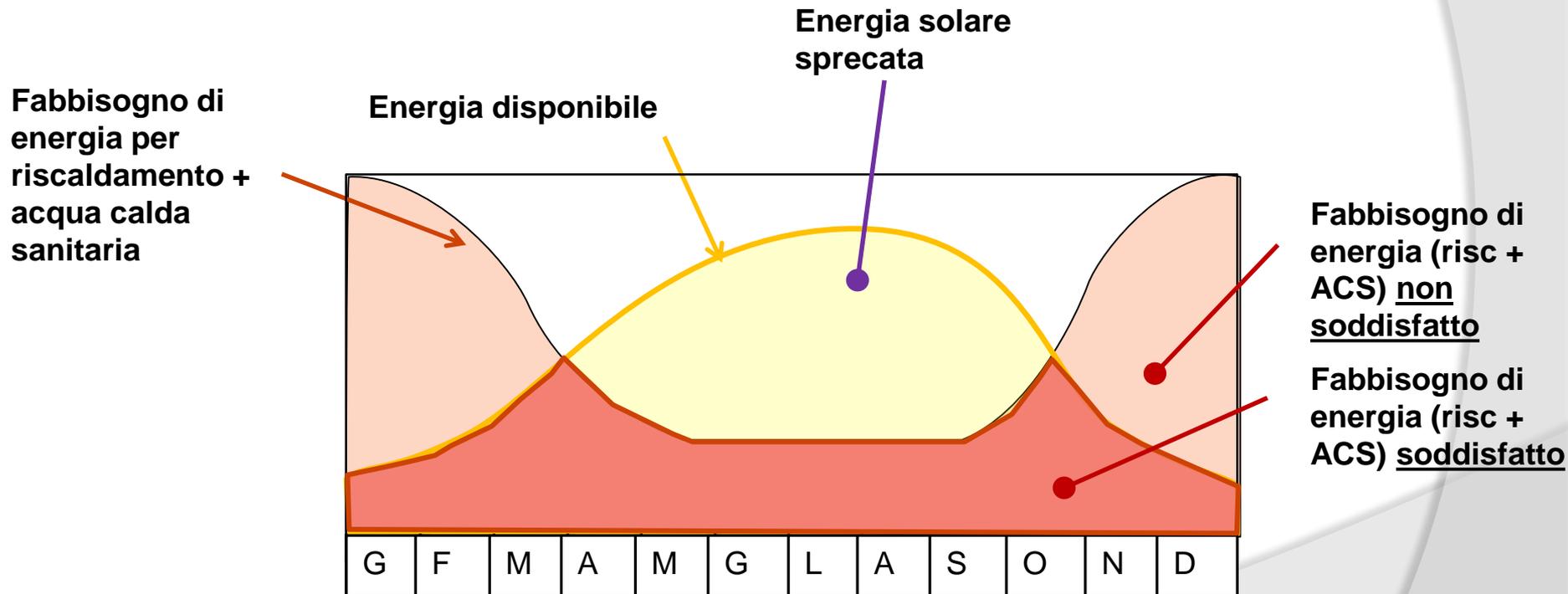
- **PROBLEMA:** la fonte solare è presente prevalentemente in estate, mentre i fabbisogni termici sono presenti prevalentemente in inverno, quindi: ci potrebbe essere un surplus (spreco) di energia in estate e/o mancanza di energia in inverno.



# Dimensionamento solare termico

## CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

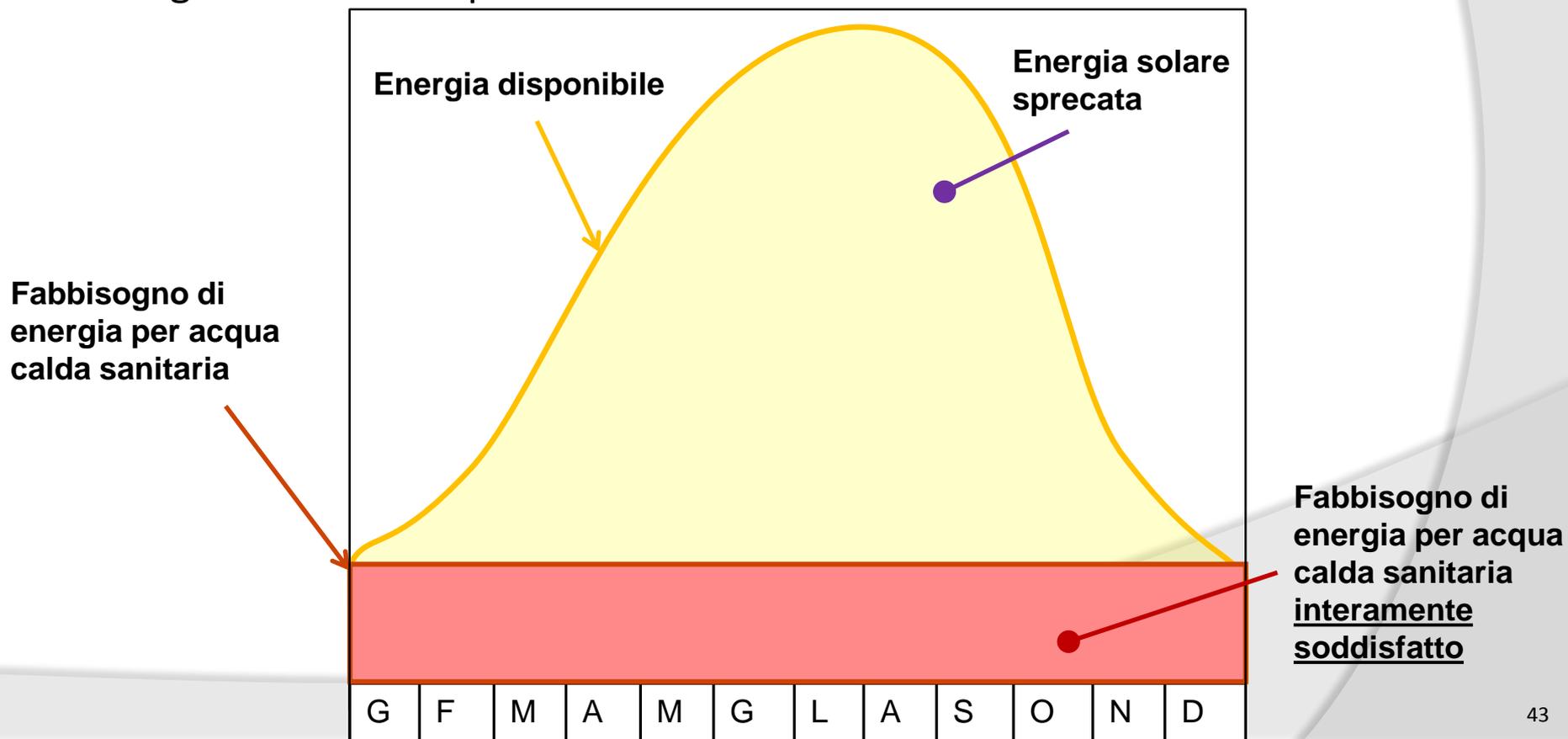
- Il problema si complica se oltre all'acqua calda sanitaria l'impianto deve soddisfare anche il fabbisogno di **riscaldamento degli ambienti**.



# Dimensionamento solare termico

## CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

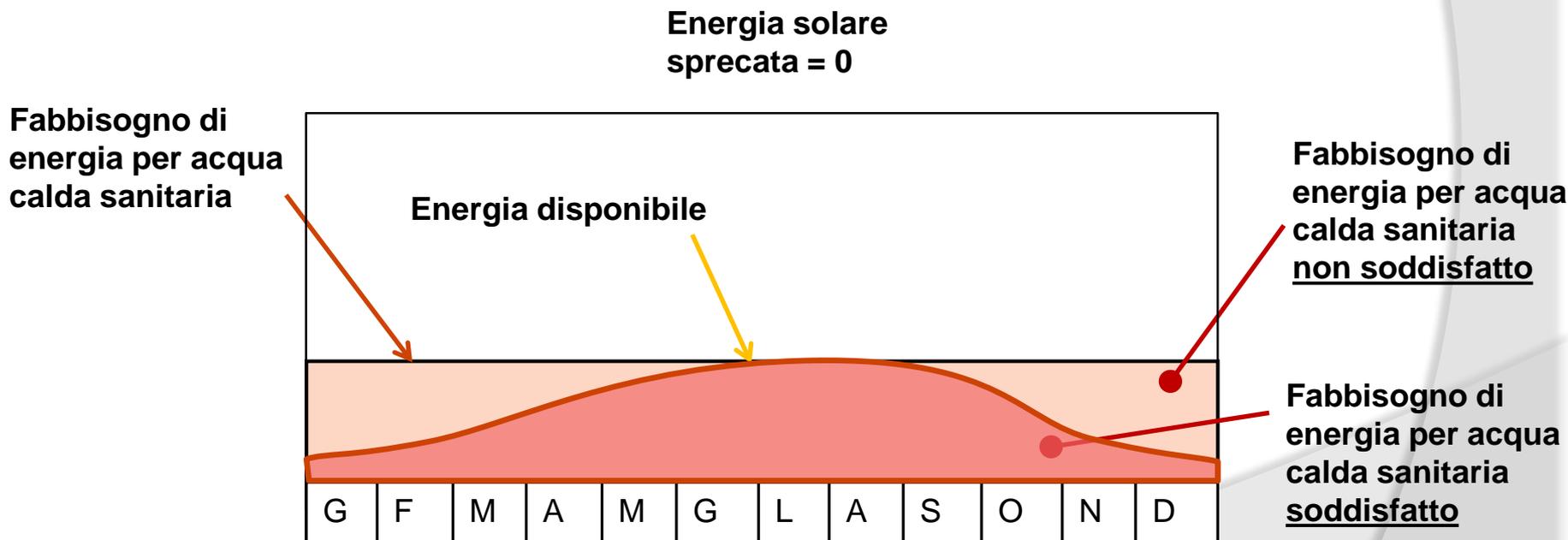
- Il **dimensionamento** degli impianti si può basare su due criteri diversi:
  1. **OTTIMO ENERGETICO**: Si dimensiona l'impianto per **coprire i fabbisogni energetici del periodo peggiore**. Sarà presente un forte spreco estivo.  
**Pro**: copertura energetica  $\approx 100\%$       **Contro**: costi elevati, problemi di gestione dell'acqua calda estiva inutilizzata



# Dimensionamento solare termico

## CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

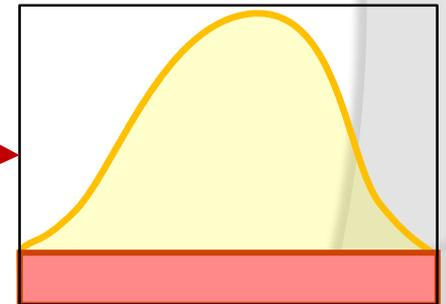
2. **OTTIMO ECONOMICO**: Si dimensiona l'impianto per **utilizzare sempre tutta l'energia fornita dall'impianto**. Buona parte del fabbisogno invernale dovrà essere soddisfatto in altro modo.
- Pro**: massima efficienza economica (-80% dei costi rispetto all'impianto precedente) **Contro**: ricorso importante a fonti ausiliarie (es. caldaia)



# Dimensionamento solare termico

## PROCEDIMENTO DI DIMENSIONAMENTO

1. Costruzione del diagramma mensile dei **fabbisogni energetici**.
2. **Calcolo della producibilità** energetica mensile di  $1 \text{ m}^2$  di collettori solari installati nella località in analisi con orientamento e inclinazione scelti.
3. **Determinazione del numero di  $\text{m}^2$**  necessari per soddisfare il fabbisogno energetico (estivo per l'ottimo economico, invernale per l'ottimo energetico).
4. Dimensionamento degli **altri componenti**.



# Dimensionamento solare termico

## CALCOLO SEMPLIFICATO PER SOLA ACQUA CALDA SANITARIA

- Per un **primo dimensionamento (di massima)** dei sistemi che producono esclusivamente acqua calda sanitaria per edifici residenziali è **possibile utilizzare la seguente formula:**

$$A_c = F_{acs} \cdot N_{pers} \cdot \frac{A_{rif}}{50} \cdot \frac{1}{f_{corr}}$$

$A_c$  = Superficie captante dei collettori solari necessaria [m<sup>2</sup>]

$F_{acs}$  = Fabbisogno giornaliero pro-capite di acqua calda sanitaria [litri/giorno/persona]

$N_{pers}$  = Numero di persone nell'abitazione

$A_{rif}$  = Valore di riferimento della superficie necessaria per ottenere 50 litri di ACS/giorno nelle diverse località [m<sup>2</sup>/50litri/giorno]

$f_{corr}$  = Fattore correttivo per inclinazioni diverse da 30° e orientamenti diversi dal sud [adim]

Livello di comfort	Facs [l/giorno/pers]
Basso	35
Medio	50
Alto	75

Zona	Arif [m <sup>2</sup> /50litri/giorno]
Nord Italia	1,2
Centro Italia	1,0
Sud Italia	0,8

# Dimensionamento solare termico

FATTORE  $f_{corr}$

Fattore $f_{corr}$	Inclinazione						
Orientamento	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0° (SUD)	0,89	0,97	1,00	0,99	0,93	0,83	0,69
± 15°	0,89	0,96	1,00	0,98	0,93	0,83	0,69
± 30°	0,89	0,96	0,99	0,97	0,92	0,82	0,70
± 45° (SO - SE)	0,89	0,94	0,97	0,95	0,90	0,81	0,70
± 60°	0,89	0,93	0,94	0,92	0,87	0,79	0,69
± 75°	0,89	0,91	0,91	0,88	0,83	0,76	0,66
± 90° (OVEST - EST)	0,89	0,88	0,87	0,83	0,78	0,71	0,62

## Dimensionamento solare termico

### ESEMPIO NUMERICO 1

- Calcolare l'area di collettori solari necessaria per soddisfare il fabbisogno di acqua calda di un'abitazione residenziale occupata da 3 persone e situata nel nord Italia, con livello di comfort medio, considerando di installare i pannelli con un azimut di  $-30^\circ$  e con un tilt di  $45^\circ$ . Calcolare inoltre il numero di collettori solari sapendo che ciascuno misura  $1000 \times 2000 \text{mm}$ .

**Area dei collettori:**

$$A_c = F_{acs} \cdot N_{pers} \cdot \frac{A_{rif}}{50} \cdot \frac{1}{f_{corr}} = 50 \cdot 3 \cdot \frac{1,2}{50} \cdot \frac{1}{0,97} = 3,71 \text{m}^2$$

**Numero di collettori:**

$$N_c = \frac{A_c}{A_{pannello}} = \frac{3,71}{1,00 \cdot 2,00} = 1,86 \rightarrow 2 \text{ collettori}$$

## Dimensionamento solare termico

### ESEMPIO NUMERICO 2

- Si intende installare un impianto solare termico sulla copertura di un'abitazione situata nel centro Italia, posizionando i pannelli in modalità complanare alla copertura. Il tetto è orientato a sud-ovest e inclinato di 15° rispetto al piano orizzontale e lo spazio disponibile per i pannelli è un rettangolo di larghezza 3,5 m e altezza 2,2 m. Considerando di avere a disposizione collettori solari che misurano ciascuno 1,00x2,00 metri, calcolare il numero massimo di collettori installabili e la quantità giornaliera di acqua calda disponibile (litri/giorno). Indicare inoltre che tipologia di impianto occorre installare (circolazione forzata o naturale).

#### Numero di collettori:

Visto che l'altezza disponibile è di poco superiore all'altezza del pannello si decide di installare i pannelli in posizione verticale (col lato corto verso il basso). Vista la larghezza disponibile di 3,5m e la larghezza dei collettori di 1,0m, il numero di collettori massimo sarà pari a 3.  $N_c = 3$

#### Quantità giornaliera di acqua calda

Considerando che il fattore  $F_{acs}$  è espresso in litri/giorno/persona, basterà ricavare tale fattore (invertendo l'equazione delle slides precedenti) e moltiplicarlo per il numero di persone. In questo modo si otterrà la quantità di acqua  $Q_{acs}$  in litri/giorno.

$$Q_{acs} = F_{acs} \cdot N_{pers} = \frac{50 \cdot A_c \cdot f_{corr}}{N_{pers} \cdot A_{rif}} \cdot N_{pers} = \frac{50 \cdot A_c \cdot f_{corr}}{A_{rif}} = \frac{50 \cdot 6,00 \cdot 0,94}{1,0} = 282 \text{ l/g}$$

**Tipo di impianto:** Considerando che non c'è spazio per il serbatoio di accumulo di acqua calda sopra i collettori (disponibili solo 20 cm), l'impianto dovrà essere a circolazione forzata.

## Dimensionamento solare termico

### ESEMPIO NUMERICO 3

- Calcolare l'area di collettori solari necessaria per soddisfare il fabbisogno di acqua calda di un'abitazione residenziale occupata da 5 persone e situata nel sud Italia, con livello di comfort alto, considerando di installare i pannelli su un tetto inclinato di 15° e orientato a SUD-EST. Calcolare inoltre il numero di collettori solari sapendo che ciascuno misura 800x1600mm. Ricalcolare la superficie effettiva dei collettori installata.

**Area dei collettori minima necessaria:**

$$A_c = F_{acs} \cdot N_{pers} \cdot \frac{A_{rif}}{50} \cdot \frac{1}{f_{corr}} = 75 \cdot 5 \cdot \frac{0,8}{50} \cdot \frac{1}{0,94} = 6,38m^2$$

**Numero di collettori:**

$$N_c = \frac{A_c}{A_{pannello}} = \frac{6,38}{0,80 \cdot 1,60} = 4,98 \rightarrow 5 \text{ collettori}$$

**Area dei collettori effettiva:**

$$A_c = N_c \cdot A_{pannello} = 5 \cdot 0,80 \cdot 1,60 = 6,40m^2$$

## Dimensionamento solare termico

### ESEMPIO NUMERICO 4

- Calcolare l'area di collettori solari necessaria per soddisfare il fabbisogno di acqua calda di un'abitazione residenziale occupata da 4 persone e situata nel centro Italia, con livello di comfort medio, considerando di installare i collettori su un tetto piano, con inclinazione e orientamento dei collettori ottimale in moto da ottenere la massima energia annua possibile. Calcolare inoltre il numero di pannelli solari sapendo che ciascuno misura 980x1980mm.

#### Orientamento e inclinazione ottimali:

L'unico parametro che dipende da inclinazione e orientamento è il fattore  $f_{corr}$  che si trova al denominatore. Più è grande, più l'area dei collettori necessaria sarà piccola. Occorre perciò individuare per quale combinazione di tilt/azimut si ottiene il valore massimo di  $f_{corr}$ . Dalle tabelle risultano tre possibilità: Tilt 30° con azimut 0° oppure ±15°. Si sceglie quindi in base a proprie considerazioni. In questo caso, essendo l'EST più irraggiato al mattino, si sceglie azimut -15° per favorire il riscaldamento dell'acqua nelle prime ore del giorno.

#### Area dei collettori minima necessaria:

$$A_c = F_{acs} \cdot N_{pers} \cdot \frac{A_{rif}}{50} \cdot \frac{1}{f_{corr}} = 50 \cdot 4 \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{1}{1} = 4,00 m^2$$

#### Numero di collettori:

$$N_c = \frac{A_c}{A_{pannello}} = \frac{4,00}{0,98 \cdot 1,98} = 2,06 \rightarrow 2 \text{ collettori}$$

Visto che l'area di collettori necessaria è di solo il 3% superiore a quella di 2 collettori, si sceglie di installarne solo 2.

## Dimensionamento solare termico

### ...continua ESEMPIO NUMERICO 4

- Se i due collettori dell'esempio 4 venissero installati uno dietro all'altro con il lato corto appoggiato a terra, a quale distanza dovrebbe essere installato il secondo per limitare fenomeni di ombreggiamento? Quali sarebbero le dimensioni minime del tetto piano necessarie per ospitare l'impianto? Si considera che la latitudine dell'impianto è di  $42,2^\circ$  Sud.

#### Interdistanza tra le file:

Occorre calcolare l'interdistanza minima necessaria per evitare l'ombreggiamento.

$$D_T = X [\cos \beta + \tan(\delta_m + L) \cdot \text{sen} \beta] = 1,98 \cdot [\cos 30 + \tan(23,5 + 42,2) \cdot \text{sen} 30] = 3,91m$$

#### Dimensioni minime del tetto:

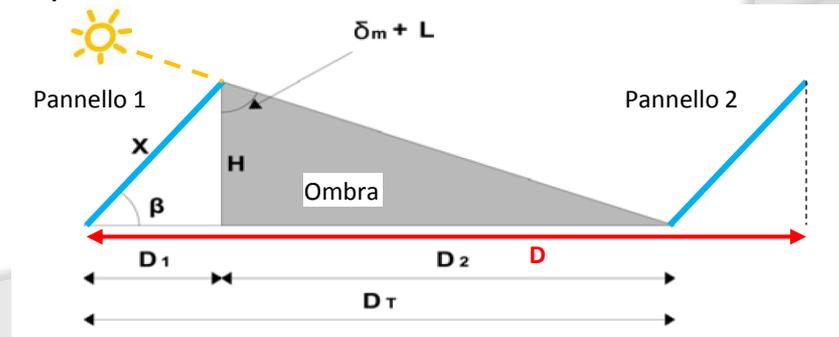
Considerando le modalità di installazione sopra descritte, l'ingombro in larghezza ( $L$ ) dell'impianto è di  $0,98m$ , ossia la larghezza di un pannello. L'ingombro in lunghezza ( $D$ ) è invece pari all'interdistanza tra le due file, sommata all'ingombro in pianta del pannello posteriore.

$$L = 0,98m$$

$$D = D_T + D_1 = D_T + X \cos \beta$$

$$= 3,91 + 1,98 \cdot \cos 30 = 5,62m$$

$$\text{Dimensioni minime tetto} = 0,98 \times 5,62m$$



## Dimensionamento solare termico

### ESEMPIO NUMERICO 5

- Si intende installare un impianto solare termico sulla copertura di un'abitazione situata nel nord Italia, posizionando i pannelli in modalità complanare alla copertura. Il tetto è orientato a EST, inclinato di 30° rispetto al piano orizzontale e lo spazio disponibile per i pannelli è un rettangolo di larghezza 2,1 m e altezza 4,2 m. Considerando di avere a disposizione collettori solari che misurano ciascuno 1,00x2,00 metri, calcolare il numero massimo di collettori installabili e le persone che potrebbero vivere nell'abitazione con un livello di comfort medio. Indicare inoltre che tipologia di impianto occorre installare (circolazione forzata o naturale).

#### Numero di collettori:

Visto che la larghezza disponibile è di poco superiore all'altezza del pannello si decide di installare i pannelli in posizione orizzontale (col lato lungo verso il basso). Vista l'altezza disponibile di 4,2m e la larghezza dei collettori di 1,0m, il numero di collettori massimo sarà pari a 4.  $N_c = 4$

#### Numero di persone con comfort medio

E' sufficiente ricavare la grandezza  $N_{pers}$  dall'equazione di dimensionamento.

$$N_{pers} = \frac{50 \cdot A_c \cdot f_{corr}}{F_{acs} \cdot A_{rif}} = \frac{50 \cdot 8,00 \cdot 0,87}{50 \cdot 1,2} = 5,8 \text{ persone}$$

**Tipo di impianto:** Considerando che i collettori sono disposti in orizzontale, l'impianto dovrà essere a circolazione forzata poiché l'eventuale accumulo di acqua calda (montato di fabbrica sul lato corto dei pannelli) deve sempre stare sopra i collettori e non di lato.

# 3.

## SOLARE FOTOVOLTAICO

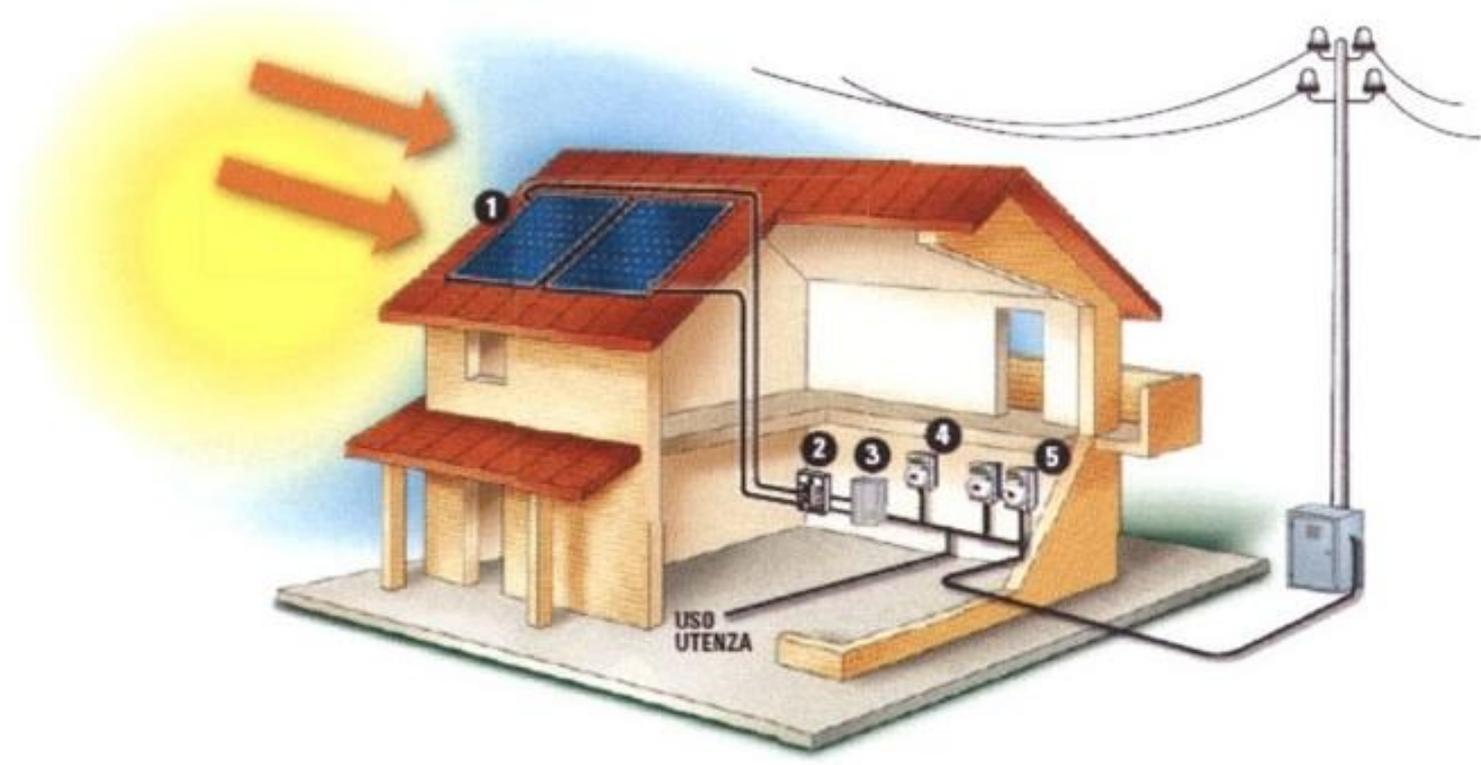
### INDICE CAPITOLO 3

• Solare fotovoltaico .....	54
○ Tipologie di impianto .....	56
○ Componenti di impianto .....	59
○ Campi fotovoltaici .....	69
○ Criteri di dimensionamento .....	74
○ Esempi di installazione .....	82

# Solare fotovoltaico

## FUNZIONALITA' E OBIETTIVI

- L'impianto solare fotovoltaico ha la funzione di **convertire l'energia elettromagnetica** contenuta nella radiazione solare in **energia elettrica** direttamente utilizzabile oppure vendibile alla rete elettrica nazionale.



# Configurazioni di un impianto fotovoltaico

## IMPIANTO CONNESSO ALLA RETE ELETTRICA NAZIONALE (**GRID-CONNECTED**)

- L'energia elettrica non può essere accumulata, quindi quella prodotta o viene immediatamente utilizzata dalle utenze dell'abitazione oppure viene ceduta alla rete.

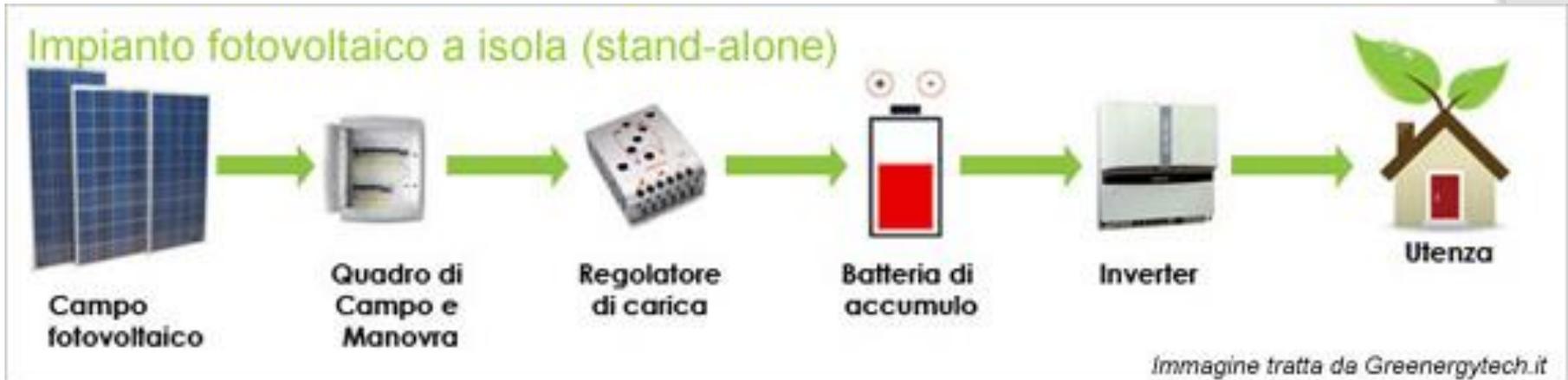
### Impianto fotovoltaico connesso alla rete (grid-connected)



# Configurazioni di un impianto fotovoltaico

## IMPIANTO IN ISOLA (**STAND-ALONE**)

- L'energia prodotta viene accumulata nelle batterie e può essere **utilizzata** dalle utenze in un **tempo successivo** a quello di produzione.



# Configurazioni di un impianto fotovoltaico

## CONFRONTO *GRID-CONNECTED* VS *STAND-ALONE*

GRID-CONNECTED	STAND-ALONE
<p><b>Pro</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuità di servizio: in mancanza di sole le utenze sono alimentate dalla rete elettrica.</li> <li>• Nessuno spreco di energia: quella in surplus viene venduta alla rete elettrica (GSE - Gestore Servizi Energetici).</li> <li>• Minori costi di investimento e manutenzione.</li> <li>• (In passato) Maggiori incentivi.</li> <li>• Ritorni economici vantaggiosi.</li> </ul> <p><b>Contro</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dipendenza dalla rete elettrica.</li> <li>• Necessità di contemporaneità produzione-consumi per poter utilizzare direttamente l'energia autoprodotta senza immetterla in rete (economicamente più conveniente).</li> </ul>	<p><b>Pro</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indipendenza dalla rete elettrica.</li> </ul> <p><b>Contro</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuità di servizio incerta se viene utilizzata più energia di quella prodotta dall'impianto e accumulata dalle batterie.</li> <li>• Possibile spreco di energia se viene prodotta più energia di quella accumulabile dalle batterie.</li> <li>• Maggiori costi sia di investimento che di manutenzione (le batterie sono costose e hanno vita breve).</li> </ul>

# Componenti di un impianto fotovoltaico

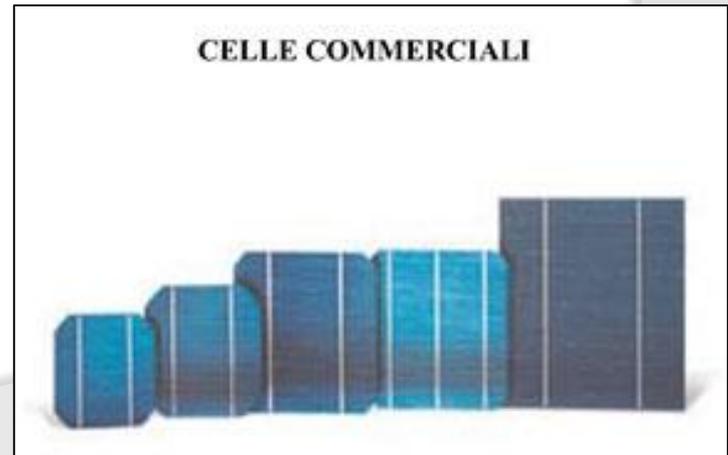
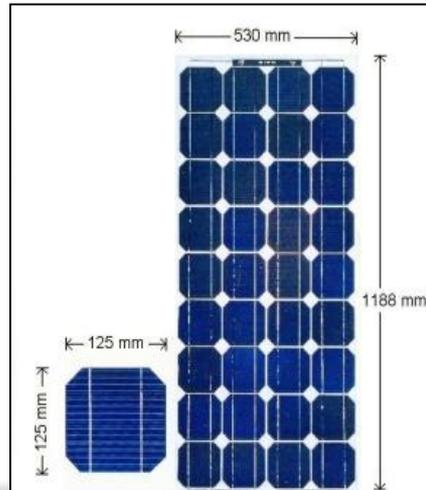
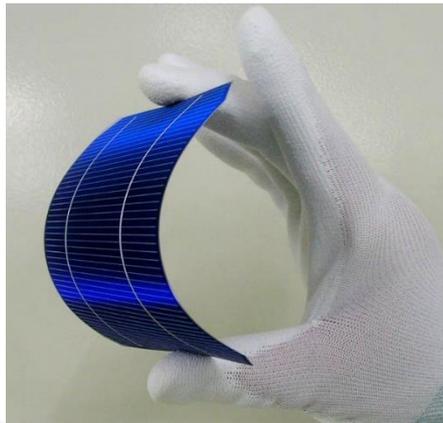
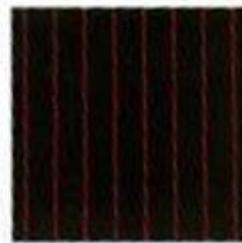
## COMPONENTI

- L'impianto fotovoltaico è composto dai seguenti **componenti principali**:
  1. **Modulo fotovoltaico** (o pannello fotovoltaico)  
Rappresenta l'elemento preposto alla captazione della radiazione solare e alla sua conversione in energia elettrica.
  2. **Sistemi di conversione (inverter)**  
Dispositivi elettronici in grado di permettere il funzionamento ottimale dei moduli nonché la connessione tra il sistema fotovoltaico (in corrente continua) ed il sistema elettrico nazionale (in corrente alternata).
  3. **(Eventuali) sistemi di accumulo** (batterie) e **regolatori di carica**  
Presenti solo nei sistemi non connessi alla rete elettrica nazionale (stand-alone), servono ad accumulare l'energia elettrica prodotta.
  4. **Sistemi di protezione e manovra** (quadri elettrici)  
Contengono gli interruttori automatici per la protezione dai guasti.
  5. **Contatori dell'energia**  
Contabilizzano l'energia prodotta, quella immessa e prelevata da rete.
  6. **Cavi, connettori, carpenteria, sistemi di fissaggio, ecc**

# Moduli fotovoltaici

## CELLE E MODULI FOTOVOLTAICI

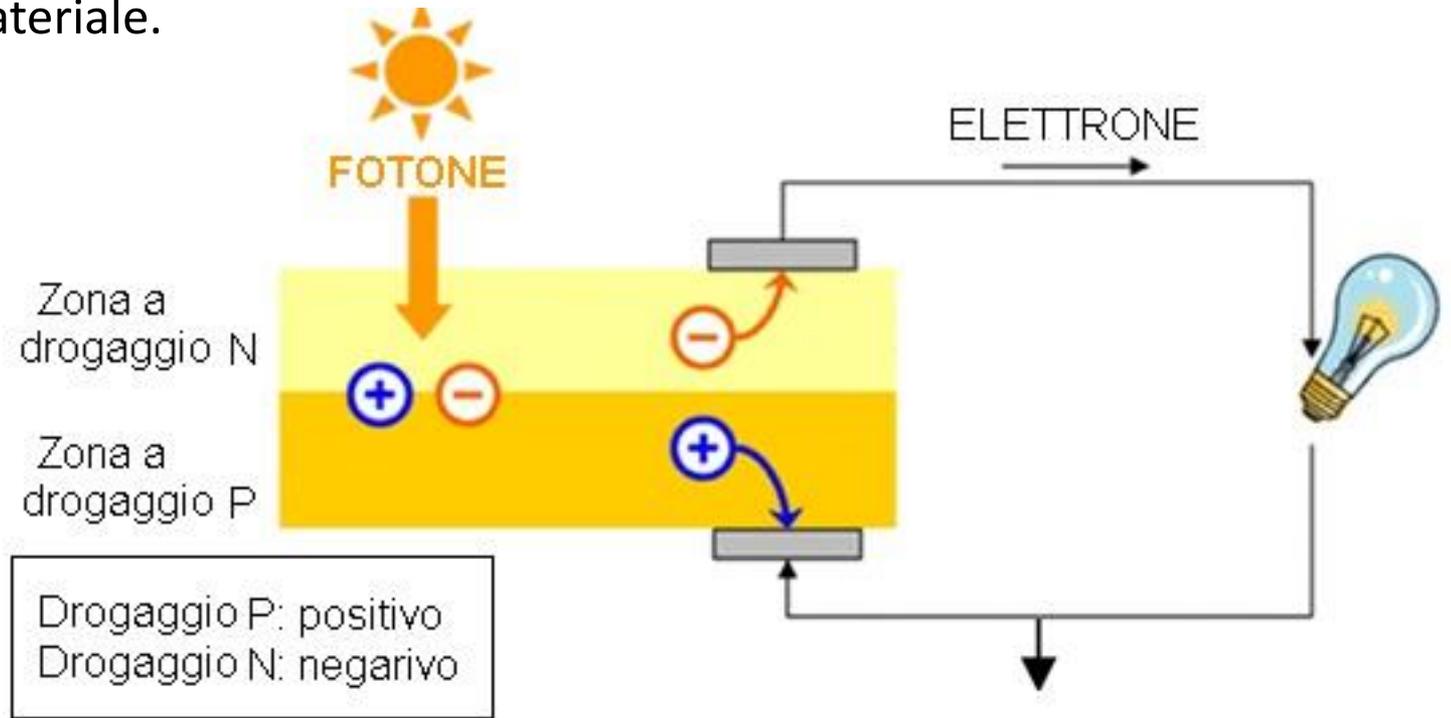
- Il **modulo fotovoltaico** può trovarsi in **diverse forme, dimensioni, configurazioni** (es. piano, a concentrazione, flessibile, ecc).
- In ogni caso esso è **composto da una o più celle fotovoltaiche**, nelle quali avviene la conversione dell'energia solare in energie elettrica.



# Moduli fotovoltaici

## EFFETTO FOTOVOLTAICO

- Il principio di funzionamento delle celle fotovoltaiche è l'**effetto fotovoltaico**.
- Questo si realizza quando **un elettrone** presente **nella banda di valenza** di un materiale (generalmente **semiconduttore**) passa alla **banda di conduzione** a causa dell'**assorbimento di un fotone** sufficientemente energetico incidente sul materiale.



- Scoperto nel 1839 da Bacquerel, studiato da Einsten che ottenne il premio nobel per la fisica nel 1921. Prova della natura corpuscolare della luce.

# Moduli fotovoltaici

## MATERIALI

- I **materiali** che presentano un effetto fotovoltaico sono normalmente **semiconduttori** in quanto il **divario energetico** (energy gap) tra la banda di valenza e quella di conduzione **non è troppo elevato**.
- Le celle fotovoltaiche più comunemente usate **si distinguono sia per materiale che per microstruttura**:
  - **microstruttura monocristallina**:
    - Silicio (Si) monocristallino
  - **microstruttura policristallina**:
    - Silicio (Si) policristallino
  - **microstruttura a film sottile**:
    - Silicio (Si) amorfo
    - Tellururo di cadmio (CdTe)
    - Solfuro di cadmio (CdS)
    - Arseniuro di gallio (GaAs)
    - Diseleniuro di indio e rame (CIS)
    - Diseleniuro di indio, rame e gallio (CIGS)

# Moduli fotovoltaici

## SILICIO MONOCRISTALLINO, POLICRISTALLINO E AMORFO

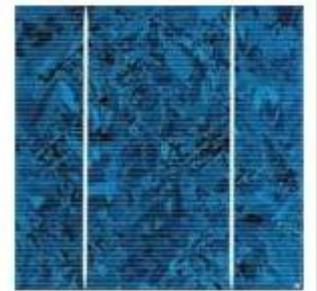
- **Silicio monocristallino**

Viene prodotto attraverso un processo di accrescimento cristallino da fase liquida molto sofisticato e costoso. Si ottiene un unico grande cristallo che poi viene sezionato. E' il prodotto più puro e più pregiato, lo stesso che si usa per i micro-chip.



- **Silicio policristallino**

E' ciò che si ottiene dal raffreddamento del silicio fuso senza le tecniche di accrescimento del monocristallo. Si formano quindi dei cristalli di piccole dimensioni (millimetri o centimetri di diametro) connessi da zone amorphe. E' un prodotto di medio pregio che ha un ottimo rapporto qualità/prezzo.



- **Silicio amorfo**

è ottenuto tramite deposizione da fase vapore del silicio su un supporto che ne definisce anche la forma. La struttura degli atomi è completamente disorganizzata, senza cristalli. E' il prodotto con minore efficienza, ma permette di produrre celle di qualsiasi forma e anche flessibili.



# Moduli fotovoltaici

## CONFRONTO TRA MATERIALI

	Si monocristallino	Si multicristallino	Si amorfo	GaAs	CdTe	CIS (CULNSe <sub>2</sub> )
<b>Rendimento cella</b>	14-17%	12-14%	4-6% singolo 7-10% tandem	32,5% (lab.)	10%	12%
<b>Vantaggi</b>	Alto rendimento stabile tecnologia affidabile	< rendimento costo < fabbricazione più semplice miglior occupazione dello spazio	costo < < necessità di materiale ed energia nella fabbricazione buon rendimento con basso irraggiamento flessibile	Alta resistenza alle alte temperature (ok per i concentratori)	Basso costo	Molto stabile
<b>Svantaggi</b>	Costo E grigia Quantità di materiale necessaria alla fabbricazione Complessità	Complessità Sensibilità alle impurità	Basso rendimento Degrado iniziale Stabilità negli anni	Tossicità Disponibilità del materiale	Tossicità Disponibilità del materiale	Tossicità (Cd)

- La stragrande maggioranza degli impianti fotovoltaici è realizzata con moduli in **silicio monocristallino e policristallino**.

# Moduli fotovoltaici piani

## PARAMETRI DI TARGA

- I **principali parametri tecnici** che caratterizzano i moduli fotovoltaici sono i seguenti:
  - **Potenza nominale di picco ( $P_n$ ):**  
Potenza elettrica che erogherebbe il modulo in **condizioni standard** (irraggiamento ( $P_i$ ) di **1000 W/m<sup>2</sup>** ( $A_i = 1\text{m}^2$ ) e temperatura di **25°C**). Si misura in "Chilowatt di picco" [kWp]. La potenza prodotta in condizioni diverse viene fornita attraverso delle curve.
  - **Area del modulo ( $A_{\text{mod}}$ ):**  
Superficie occupata dal pannello. Si misura in metri quadri [m<sup>2</sup>].
- Operando il rapporto tra la potenza incidente e la potenza generata per unità di superficie si ottiene l'**efficienza nominale del pannello**.

$$\varepsilon = \frac{P_n / A_{\text{mod}}}{P_i / A_i} = \frac{P_n / A_{\text{mod}}}{1/1} = \frac{P_n}{A_{\text{mod}}} \quad [\text{adim}]$$

# Moduli fotovoltaici piani

## OCCUPAZIONE DI SPAZIO

- Operando il rapporto tra l'area del pannello e la potenza generata si ottiene l'**ingombro specifico** (IS), ossia la **superficie netta di pannelli necessaria a produrre un 1kWp di potenza elettrica**. Questo è anche pari al reciproco dell'efficienza.

$$IS = \frac{A_{\text{mod}}}{P_n} = \frac{1}{\varepsilon} \quad \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{kWp}} \right]$$

## ESEMPIO NUMERICO

- Un pannello fotovoltaico ha potenza nominale pari a 250 Wp ed una superficie di 1,7 m<sup>2</sup>. Calcolare l'efficienza di conversione e l'ingombro specifico.

$$\varepsilon = \frac{P_n}{A_{\text{mod}}} = \frac{0,25}{1,7} = 0,147$$

Il 14,7% dell'energia solare incidente viene convertita in energia elettrica.

$$IS = \frac{1}{\varepsilon} = 6,8 \frac{\text{m}^2}{\text{kWp}}$$

Sono necessari 6,8 metri quadri di pannelli per realizzare un chilowatt di potenza di picco.

# Sistemi di conversione (inverter)

## FUNZIONALITA' E CARATTERISTICHE

- L'**inverter** è un dispositivo elettronico con le seguenti funzionalità:
  - **Regola il funzionamento dei moduli fotovoltaici** ottimizzando costantemente il loro punto di lavoro (combinazione di tensione e corrente), a seconda delle condizioni di irraggiamento, per **massimizzare la potenza prodotta dall'impianto (MPPT - Maximum Power Point Tracker)**.
  - **Converte la tensione continua (DC)** del campo fotovoltaico **in tensione alternata (AC)** tipica della rete elettrica nazionale. Ciò permette la connessione dei due sistemi.
  - **Verifica lo stato di funzionamento dell'impianto** ed eventualmente segnala guasti che si dovessero verificare.
  - **Altro**: eventuale telecontrollo, monitoraggio, contabilizzazione dell'energia, ecc.



# Sistemi di conversione (inverter)

## EFFICIENZA DI CONVERSIONE

- **L'inverter dissipa una parte dell'energia** che lo attraversa a causa del funzionamento non ideale del sistema di conversione.
- Oltre all'inverter **anche i cavi e gli altri componenti elettrici dissipano** una parte dell'energia.
- Comunemente si considera un **valore globale del rendimento di tutti gli apparati elettrici** (denominati **BOS - Balance Of System**):

$$\eta_{BOS} = 0,85 \div 0,95$$

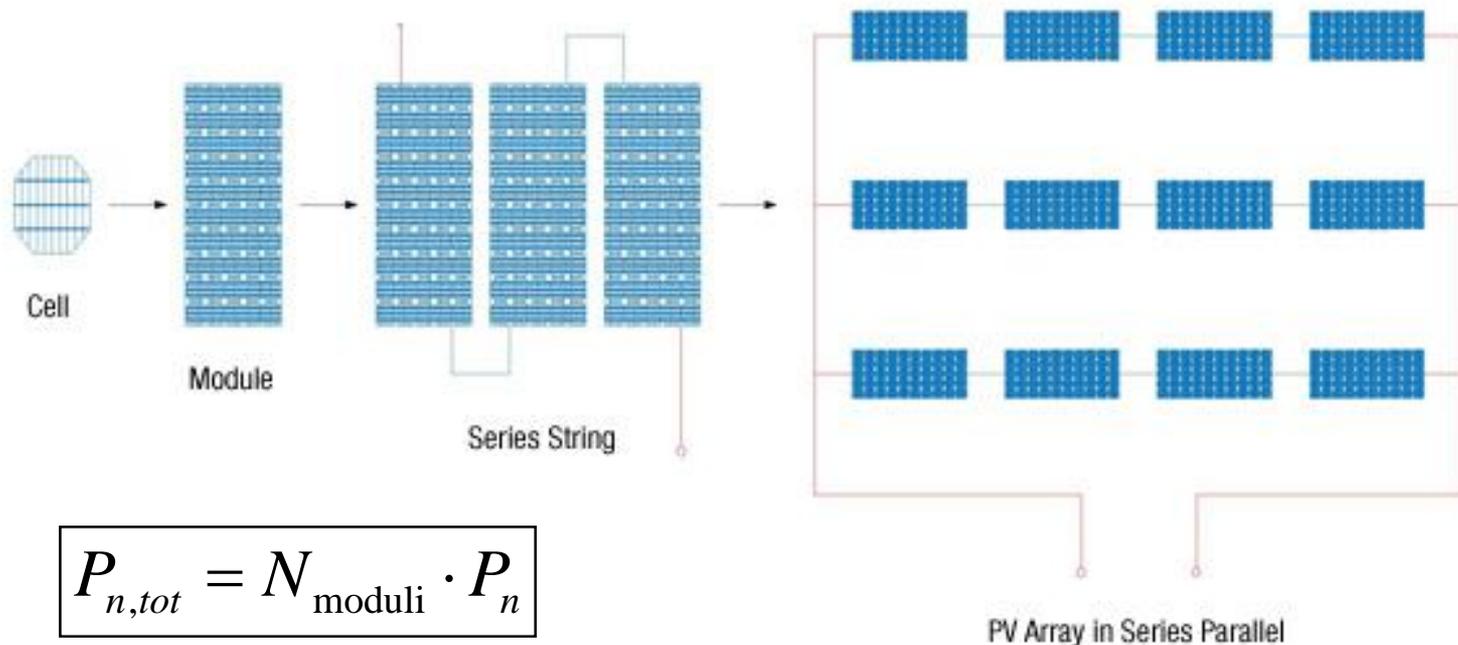
L'energia utile sarà solo l'85%-95% di quella prodotta, il resto viene perso sotto forma termica.

- Il valore più o meno alto **dipende dall'efficienza dell'inverter**, dalle **temperature** ambientali, dalla **lunghezza dei cavi** di collegamento, dall'assorbimento di eventuali **sistemi ausiliari** (es. sistemi di raffreddamento, telecomando, monitoraggio, ecc), dalla presenza di **trasformatori**, ecc.

# Campi fotovoltaici

## MODULI, STRINGHE, CAMPI

- I moduli fotovoltaici hanno potenze da alcune decine ad alcune centinaia di Watt. Per realizzare un impianto di potenza più elevata è **necessario connettere tra loro un certo numero di moduli** secondo la seguente pratica:
  1. Si collegano **in serie i singoli moduli** a formare le **stringhe**;
  2. Se collegano **in parallelo più stringhe** (della stessa lunghezza) a formare il **campo**;
  3. Il **campo** si collega ad un ingresso dell'**inverter**.

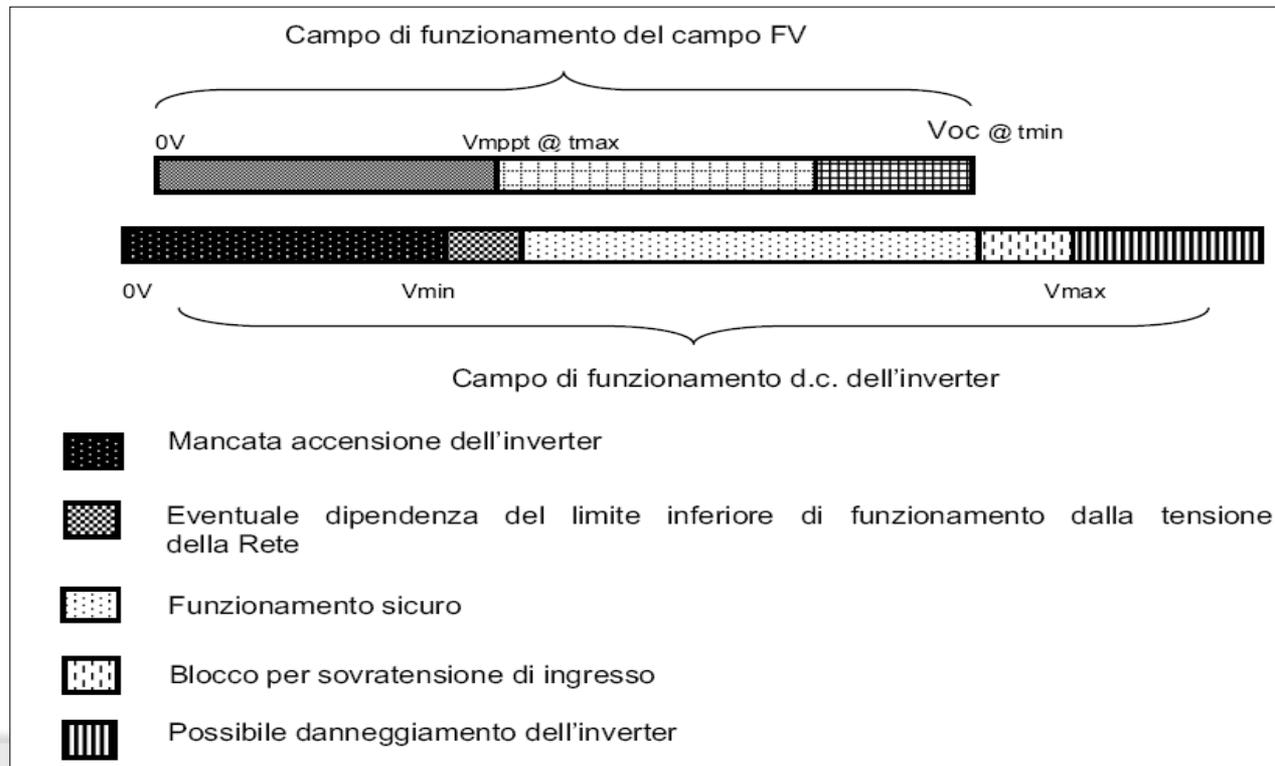


$$P_{n,tot} = N_{moduli} \cdot P_n$$

# Campi fotovoltaici

## MODULI, STRINGHE, CAMPI

- La **potenza nominale del campo** è la **somma delle potenze** dei singoli moduli.
- La **composizione del campo** (numero di moduli a stringa e numero di stringhe a campo) non può essere casuale ma **deve essere compatibile** con le caratteristiche elettriche dell'**inverter** (tensioni, correnti, potenze).
- Molti produttori di inverter offrono dei *tool* gratuiti per la verifica.



# Campi fotovoltaici

## TIPOLOGIE

- Le principali tipologie di campi fotovoltaici sono le seguenti:

- con **moduli piani**:

- **fissi tradizionali;**



- **fissi innovativi;**



- **ad inseguimento ad un asse o a due assi;**



- con **moduli a concentrazione**:

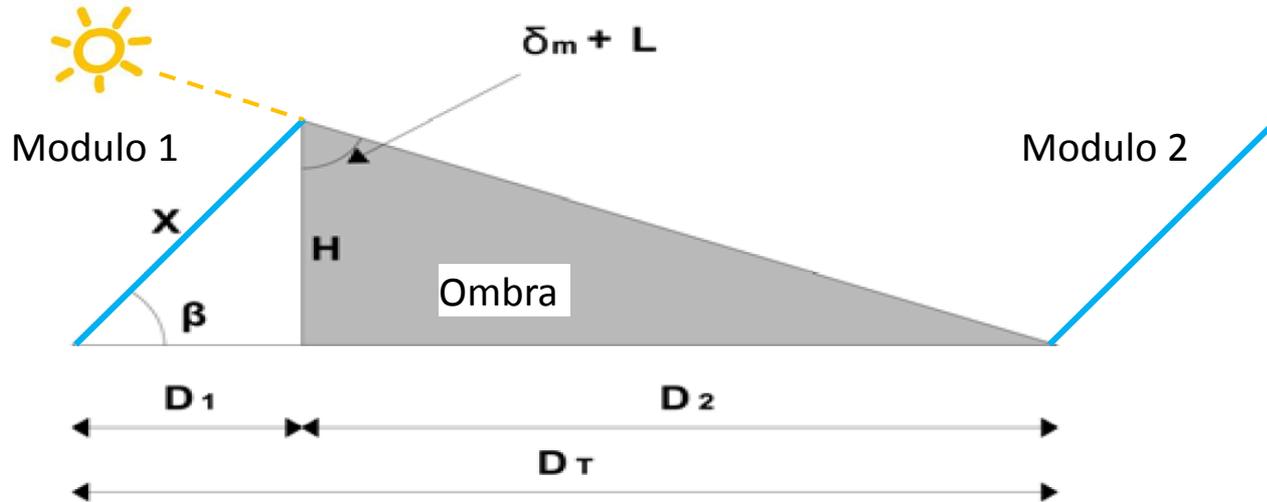
- **ad inseguimento a due assi.**



# Campi fotovoltaici

## CALCOLO DELLO SPAZIO TRA FILE DI MODULI

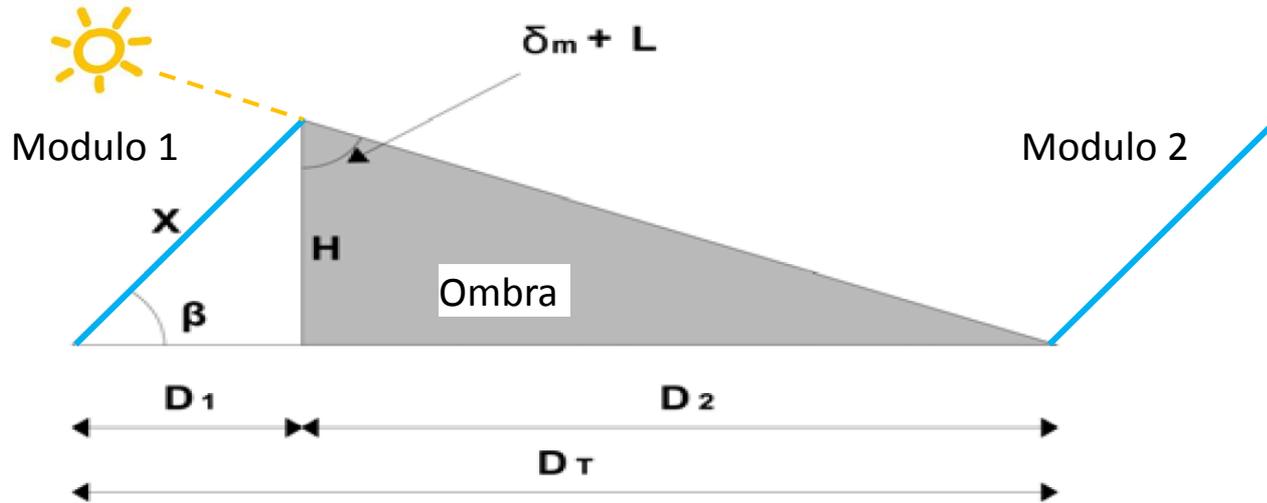
- Nel caso di installazione di più file di moduli su un piano orizzontale sorge il **problema dell'ombreggiamento reciproco**.



- Per il **calcolo dell'interdistanza** tra le file di moduli ( $D_T$ ) si considera di evitare l'ombreggiamento nel **giorno peggiore dell'anno** (solstizio d'inverno), **nell'ora migliore** (ore 12).
- E' possibile utilizzare interdistanze maggiori nel caso si voglia ulteriormente ridurre la perdita di irraggiamento, ma l'occupazione di spazio aumenta sensibilmente rispetto ai benefici energetici.

# Campi fotovoltaici

## CALCOLO DELLO SPAZIO TRA FILE DI MODULI



$$D_T = D_1 + D_2$$

..dove:  $D_1 = X \cdot \cos \beta$

$$D_2 = H \cdot \operatorname{tg}(\delta_m + L)$$

..dove:  $H = X \cdot \operatorname{sen} \beta$

..da cui:

$$D_T = X \left[ \cos \beta + \tan(\delta_m + L) \cdot \operatorname{sen} \beta \right]$$

[m]

### Legenda variabili:

$D_T$  = Interdistanza file di moduli [m]

$X$  = Altezza del modulo [m]

$\beta$  = Angolo di inclinazione moduli [gradi]

$\delta_m$  = Angolo di declinazione solare massima (angolo tra il sole e l'asse delle equatore nel giorno del solstizio invernale) = **23,5°**

$L$  = Angolo di latitudine [gradi]

# Dimensionamento di un impianto FV grid-connected

## CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

- A differenza del solare termico, **un impianto fotovoltaico connesso in rete non ha problemi di spreco di energia**, poiché l'energia in surplus viene venduta in rete.
- Inoltre i **consumi elettrici** sono molto più **costanti** durante l'anno rispetto ai consumi termici.

**..QUINDI..**

- Il **criterio di dimensionamento** dei piccoli impianti si basa sempre sul **soddisfacimento di una parte o della totalità del fabbisogno elettrico annuale** delle utenze.

# Dimensionamento fotovoltaico

## CALCOLO DELL'ENERGIA PRODUCIBILE

- L'**energia annuale producibile** da un impianto fotovoltaico si calcola comunemente in due modi:
  1. Attraverso **software di calcolo** (es. **PVGIS** <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>)
  2. Attraverso **calcoli analitici semplificati**, come riportato di seguito:

$$E_{fv} = N_{\text{mod}} \cdot I \cdot f_c \cdot A_{\text{mod}} \cdot \eta_{fv} \cdot \eta_{BOS} = N_{\text{mod}} \cdot I \cdot f_c \cdot P_n \cdot \eta_{BOS}$$

..dove:

[kWh / anno]

$E_{fv}$  = Energia elettrica annuale prodotta dall'impianto fotovoltaico [kWh/anno]

$N_{\text{mod}}$  = Numero di moduli fotovoltaici dell'impianto

$I$  = Radiazione solare annua su 1m<sup>2</sup> di superficie orizzontale [kWh/m<sup>2</sup>/anno];  
valutabile come descritto nella prima parte della lezione.

$f_c$  = Fattore correttivo per orientamento e inclinazioni specifiche (ved. tabella)

$A_{\text{mod}}$  = Area di un modulo fotovoltaico [m<sup>2</sup>]

$\eta_{fv}$  = Efficienza di conversione nominale dei moduli fotovoltaici

$\eta_{BOS}$  = Efficienza di conversione dei BOS

$P_n$  = Potenza nominale di picco di un modulo [kWp]

# Dimensionamento fotovoltaico

## CALCOLO DELL'ENERGIA PRODUCIBILE

- Tabelle del fattore  $f_c$  per le varie latitudini:

<b><math>f_c</math> (Nord Italia)</b>	<b>Inclinazione</b>							
<b>Orientamento</b>	0°	10°	15°	20°	30°	40°	60°	90°
0° (SUD)	1,00	1,07	1,09	1,11	1,13	1,12	1,03	0,74
± 15°	1,00	1,06	1,09	1,10	1,12	1,11	0,99	0,74
± 30°	1,00	1,06	1,07	1,09	1,10	1,09	0,96	0,73
± 45° (SO - SE)	1,00	1,04	1,06	1,07	1,07	1,05	0,93	0,72
± 90° (OVEST - EST)	1,00	0,99	0,98	0,96	0,93	0,89	0,77	0,57

<b><math>f_c</math> (Centro Italia)</b>	<b>Inclinazione</b>							
<b>Orientamento</b>	0°	10°	15°	20°	30°	40°	60°	90°
0° (SUD)	1,00	1,07	1,09	1,11	1,13	1,12	1,03	0,72
± 15°	1,00	1,07	1,09	1,11	1,12	1,12	1,02	0,72
± 30°	1,00	1,06	1,08	1,09	1,10	1,09	0,99	0,71
± 45° (SO - SE)	1,00	1,04	1,06	1,07	1,07	1,05	0,96	0,70
± 90° (OVEST - EST)	1,00	0,99	0,97	0,96	0,92	0,87	0,76	0,56

<b><math>f_c</math> (Sud Italia)</b>	<b>Inclinazione</b>							
<b>Orientamento</b>	0°	10°	15°	20°	30°	40°	60°	90°
0° (SUD)	1,00	1,06	1,08	1,10	1,11	1,10	0,99	0,68
± 15°	1,00	1,06	1,08	1,09	1,10	1,09	0,99	0,68
± 30°	1,00	1,05	1,07	1,08	1,08	1,07	0,96	0,68
± 45° (SO - SE)	1,00	1,04	1,05	1,06	1,06	1,03	0,93	0,67
± 90° (OVEST - EST)	1,00	0,99	0,97	0,96	0,92	0,87	0,75	0,55

# Dimensionamento fotovoltaico

## ESEMPI NUMERICI

### • ESEMPIO 1: Calcolo di potenza, producibilità, efficienza e interdistanza

Calcolare l'energia producibile da un impianto fotovoltaico con 12 moduli di dimensioni 1000x1650mm e potenza nominale 230 Wp, installato su un tetto piano a Roma (latitudine  $41,9^\circ$ ), con moduli appoggiati sul lato corto, con inclinazione di  $30^\circ$  e orientamento SUD-EST. L'irraggiamento annuale sul piano orizzontale è pari a 1'511 kWh/anno e l'efficienza dei B.O.S. è pari a 0,88. Calcolare inoltre la potenza nominale dell'impianto, l'efficienza di conversione dei moduli fotovoltaici e l'interdistanza tra le file di moduli.

**Energia:**

$$E_{fv} = N_{\text{mod}} \cdot I \cdot f_c \cdot P_n \cdot \eta_{BOS} = 12 \cdot 1511 \cdot 1,07 \cdot 0,23 \cdot 0,88 = 3927 \text{ kWh / anno}$$

**Potenza nominale:**

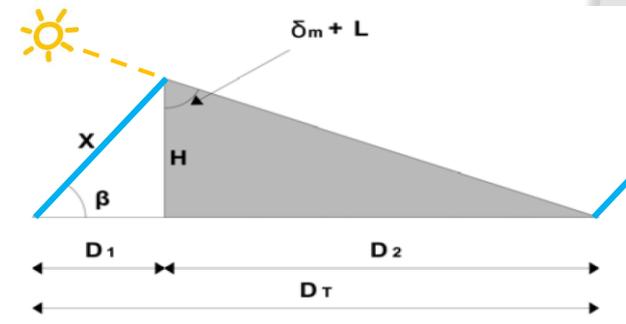
$$P_{n\_tot} = N_{\text{mod}} \cdot P_n = 12 \cdot 0,23 = 2,76 \text{ kWp}$$

**Efficienza di conversione:**

$$\varepsilon = \frac{P_n}{A_{\text{mod}}} = \frac{0,23}{1,00 \cdot 1,65} = 0,139$$

**Interdistanza:**

$$D_T = X [\cos \beta + \tan(\delta_m + L) \cdot \text{sen} \beta] = 1,65 \cdot [\cos 30 + \tan(23,5 + 41,9) \cdot \text{sen} 30] = 3,23 \text{ m}$$



# Dimensionamento fotovoltaico

## ESEMPI NUMERICI

### • ESEMPIO 2: Dimensionamento di un impianto fotovoltaico

Calcolare il numero di moduli fotovoltaici necessari per coprire il 90% del fabbisogno elettrico di una villetta, pari a 3500 kWh/anno. I moduli scelti hanno una potenza di 240W e verranno installati su una copertura inclinata con tilt di 20° e azimuth di -15° situata a Palermo. L'irraggiamento annuale sul piano orizzontale è pari a 1'784 kWh/anno e l'efficienza dei B.O.S. è pari a 0,91. Calcolare inoltre la potenza nominale dell'impianto e lo spazio necessario considerando che i moduli hanno dimensione 950x1700mm.

**Numero di moduli (formula dell'energia invertita):**

$$N_{\text{mod}} = \frac{E_{\text{necessaria}}}{I \cdot f_c \cdot P_n \cdot \eta_{BOS}} = \frac{0,9 \cdot 3500}{1784 \cdot 1,09 \cdot 0,24 \cdot 0,91} = 7,42 \rightarrow 8 \text{ moduli}$$

**Potenza nominale:**

$$P_{n\_tot} = N_{\text{mod}} \cdot P_n = 8 \cdot 0,24 = 1,92 \text{ kWp}$$

**Occupazione di spazio:**

$$A_{\text{tot}} = N_{\text{mod}} \cdot A_{\text{mod}} = 8 \cdot 0,95 \cdot 1,70 = 12,92 \text{ m}^2$$

Si ipotizza che i moduli siano affiancati l'uno all'altro: essendo la copertura già inclinata si posizionano complanari ad essa e quindi non c'è bisogno di distanziarli. Ciò non vale nel caso di moduli inclinati rispetto al piano di posa.

## Dimensionamento fotovoltaico

### ESEMPIO NUMERICO 3: Calcolo di potenza, producibilità, efficienza e interdistanza

- Calcolare l'energia producibile da un impianto di potenza 2,00 kWp installato su un tetto piano a Milano (latitudine 45,5°), con moduli appoggiati sul lato lungo, con tilt di 20° e orientamento SUD. L'irraggiamento annuale sul piano orizzontale è pari a 1'438 kWh/anno e l'efficienza dei B.O.S. è pari a 0,87. Calcolare inoltre il numero di moduli installati, considerando che ciascun modulo ha potenza nominale di 250 Wp e dimensioni 950x1700mm. Calcolare anche l'efficienza di conversione dei moduli fotovoltaici e l'interdistanza tra le file di moduli.

#### Energia:

$$E_{fv} = P_{n\_tot} \cdot I \cdot f_c \cdot \eta_{BOS} = 2 \cdot 1438 \cdot 1,11 \cdot 0,87 = 2777 \text{ kWh / anno}$$

#### Numero moduli:

$$N_{mod} = P_{n\_tot} / P_n = 2 / 0,25 = 8 \text{ moduli}$$

#### Efficienza di conversione:

$$\varepsilon = \frac{P_n}{A_{mod}} = \frac{0,25}{0,95 \cdot 1,70} = 0,155$$

#### Interdistanza:

$$D_T = X [\cos \beta + \tan(\delta_m + L) \cdot \text{sen} \beta] = 0,95 \cdot [\cos 20 + \tan(23,5 + 45,5) \cdot \text{sen} 20] = 1,74 \text{ m}$$

# Dimensionamento fotovoltaico

## ESEMPIO NUMERICO 4: Dimensionamento di un impianto fotovoltaico

- Calcolare il numero di moduli fotovoltaici necessari per coprire il 120% del fabbisogno elettrico di un'azienda, pari a 8000 kWh/anno. I moduli scelti hanno una potenza di 230Wp e verranno installati su una copertura piana situata a Milano (latitudine 45,5°), con azimuth di 15° SUD-EST e con inclinazione ottimale. L'irraggiamento annuale sul piano orizzontale è pari a 1'438 kWh/anno e l'efficienza dei B.O.S. è pari a 0,90. Calcolare inoltre la potenza nominale dell'impianto e la superficie di ingombro sul tetto piano, considerando che i moduli hanno dimensione 1000x1700mm e che vengono disposti su tre file appoggiati sul lato lungo.

**Numero di moduli (formula dell'energia invertita):** L'inclinazione ottimale si trova in corrispondenza del massimo valore del fattore  $f_c$  per l'orientamento imposto = 30°

$$N_{\text{mod}} = \frac{E_{\text{necessaria}}}{I \cdot f_c \cdot P_n \cdot \eta_{\text{BOS}}} = \frac{1,2 \cdot 8000}{1438 \cdot 1,12 \cdot 0,23 \cdot 0,90} = 28,80 \rightarrow 29 \text{ moduli}$$

**Potenza nominale:**

$$P_{n\_tot} = N_{\text{mod}} \cdot P_n = 29 \cdot 0,23 = 6,67 \text{ kWp}$$

# Dimensionamento fotovoltaico

## ....continua ESEMPIO NUMERICO 4: Dimensionamento di un impianto fotovoltaico

### Ingombro:

I 29 moduli sono divisi in 3 file. Si considera che le prime due file siano di 10 moduli e l'ultima di 9. Lo spazio occupato è dato dalla proiezione a terra di tutti i moduli, più l'area dell'ombra delle prime due file.

$$A_{tot} = Y \cdot D_1 \cdot N_{mod} + Y \cdot D_2 \cdot N_{mod,prime\_file}$$

dove:

$Y$  = Dimensioni del lato del modulo che appoggia a terra, essendo i moduli appoggiati sul lato lungo = 1,70m

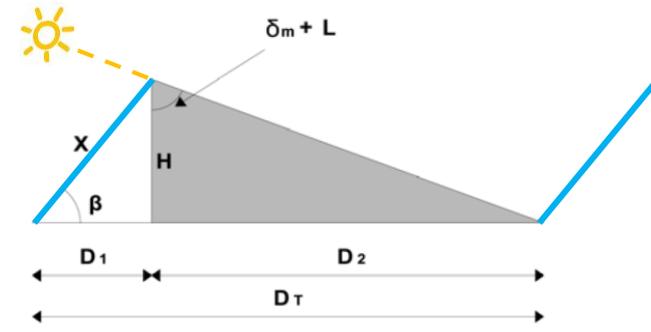
$$D_1 = X \cdot \cos \beta = 1 \cdot \cos 30 = 0,87 \text{ m}$$

$$D_2 = X \cdot \sin \beta \cdot \operatorname{tg}(\delta_m + L) = 1 \cdot \sin 30 \cdot \operatorname{tg}(23,5 + 45,5) = 1,30 \text{ m}$$

$X$  = Dimensioni del lato del modulo che non appoggia a terra, essendo i moduli appoggiati sul lato lungo = 1,00 m

da cui:

$$A_{tot} = 1,70 \cdot 0,87 \cdot 29 + 1,70 \cdot 1,30 \cdot 20 = 87,1 \text{ m}^2$$



# Esempi di installazioni

## TRADIZIONALI RESIDENZIALI



# Esempi di installazioni

## TRADIZIONALI INDUSTRIALI



# Esempi di installazioni

INNOVATIVO



# Esempi di installazioni

## INNOVATIVO

- Kanazawa Bus Terminal – Kanazawa, Japan
- Size: 3000 m<sup>2</sup> Electricity production: 120 kW



Photo used with permission from Taiyo Kogyo Corporation

- MSK Fukuoka Factory – Fukuoka, Japan
- Size: 180 m<sup>2</sup>••Electricity production: 7 kW



Academy Mont-Cenis

# Esempi di installazioni

## INNOVATIVO



University of Erlangen, Research Centre for Molecular Biology (Germania)



# Esempi di installazioni

## INNOVATIVO



**GRAZIE DELL' ATTENZIONE**

Ing. Marco Cecconi

[marco.cecconi@ingenergia.it](mailto:marco.cecconi@ingenergia.it)



**IngEnergia**

Condivisione della ricerca  
sull'efficienza energetica