

Lecce, 3 Giugno 2019

Impianti ad Energia Solare

Sommario

☐ Energia solare

- spettro della radiazione solare
- costante solare
- radiazione solare al suolo
- misura della radiazione solare
- impiego dell'energia solare in Italia

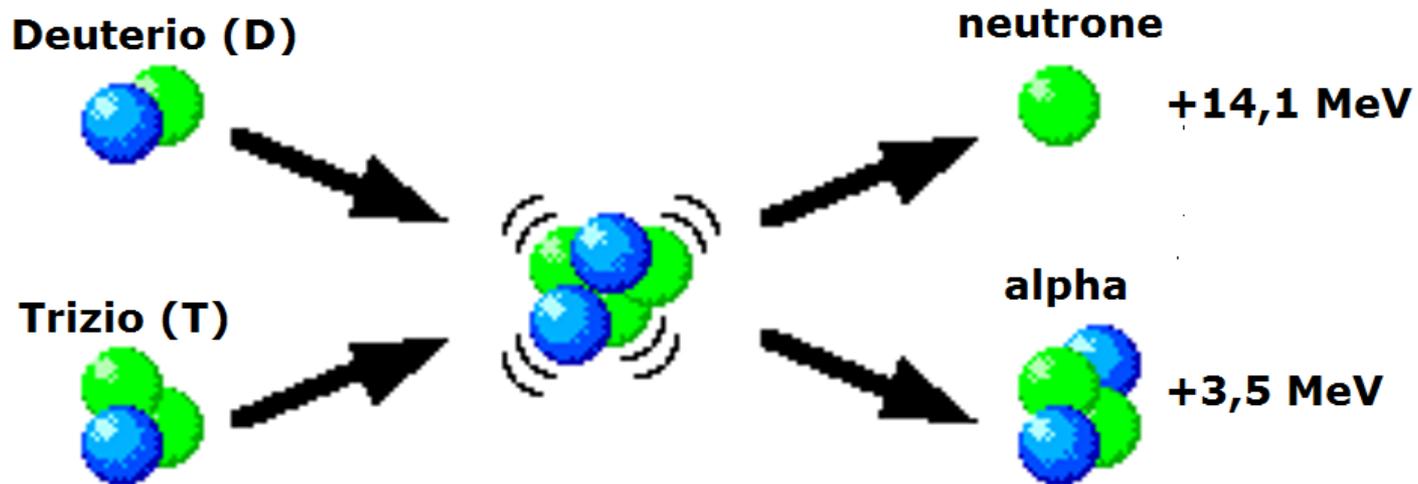
☐ Impianti fotovoltaici

- effetto fotovoltaico
- impianti ad isola e connessi in rete
- cella fotovoltaica
- modulo fotovoltaico
- inverter
- regolatore di carica
- quadristica
- strutture
- dimensionamento di massima
- monitoraggio

☐ Impianti solari termici

- principio di funzionamento
- efficienza di un collettore
- tipologie
- dimensionamento

L'energia solare è l'energia generata nel Sole dalle reazioni termonucleari di fusione a catena nel nucleo ed emessa nello spazio come **radiazione solare**.



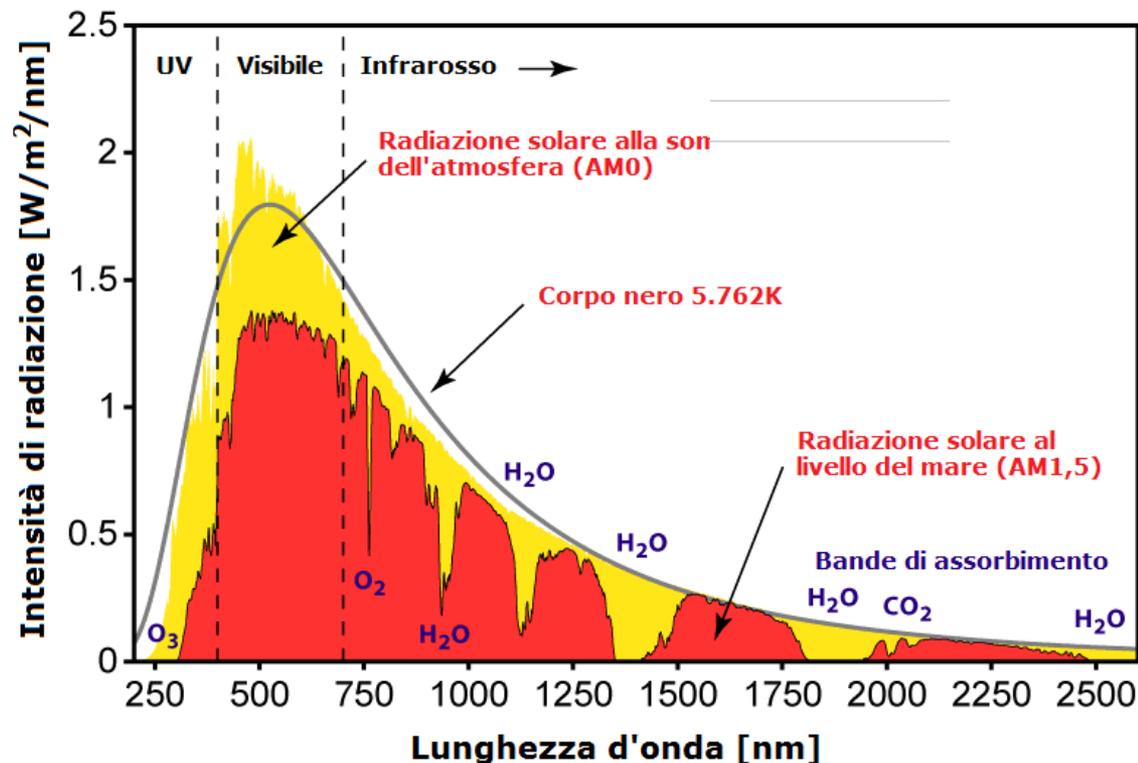
L'eV è l'energia guadagnata o persa dalla carica di un elettrone nel suo spostamento nel vuoto tra due punti tra cui esiste una differenza di potenziale elettrostatico di un Volt.

$$1 \text{ eV} = (1 \text{ J}/1\text{C}) \times \text{carica elettrone [C]} = 1,602176565 \times 10^{-19} \text{ J}$$

L'energia solare si propaga simmetricamente nello spazio e raggiunge la Terra dopo circa 150 milioni di km ($\approx 8'$).

La radiazione solare ha uno **spettro** caratterizzato da diverse intensità in funzione della lunghezza d'onda (λ [nm]).

Spettro della radiazione solare



$200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 3.000 \text{ nm}$

$H_{\text{max}} \approx 480 \text{ nm}$

R.S. extraterrestre

7% UV (200;400)

42% visibile (400;750)

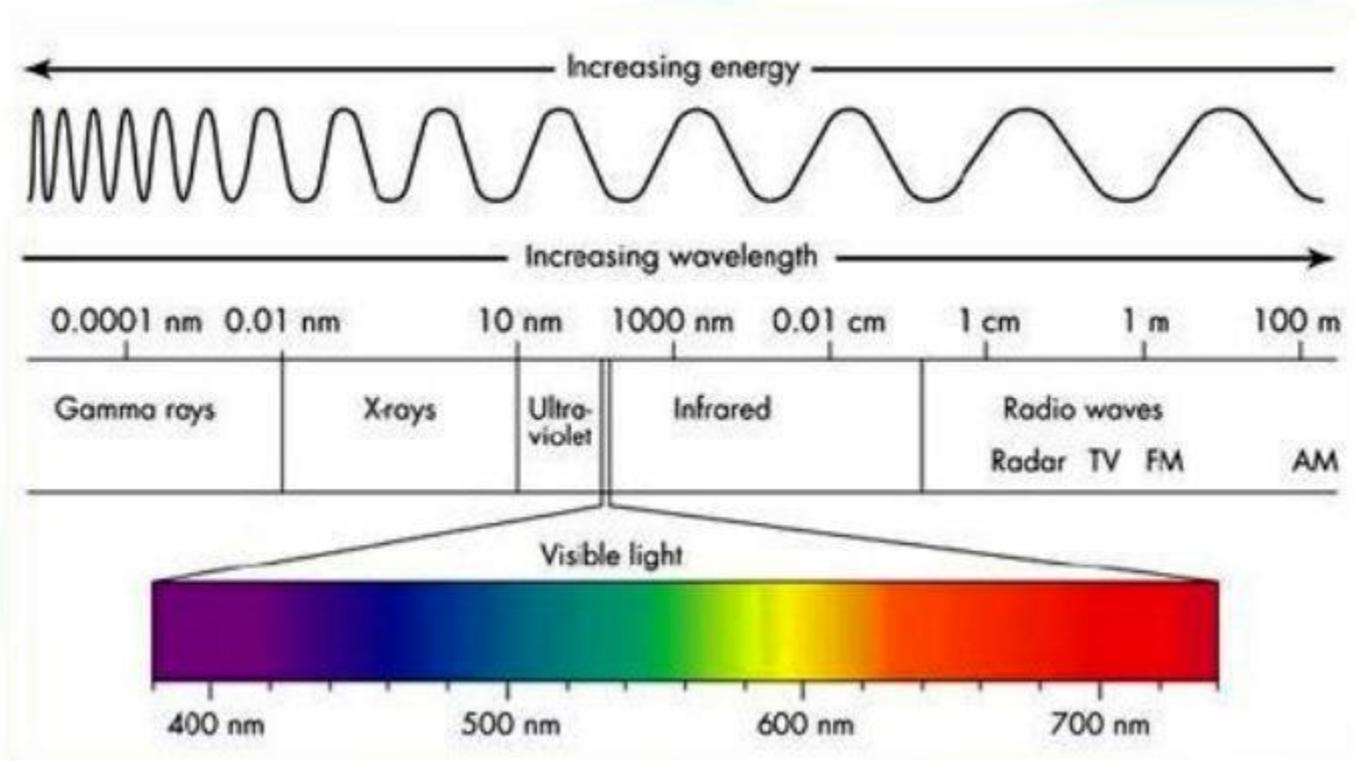
51% IR (750;3.000)

R.S. terrestre

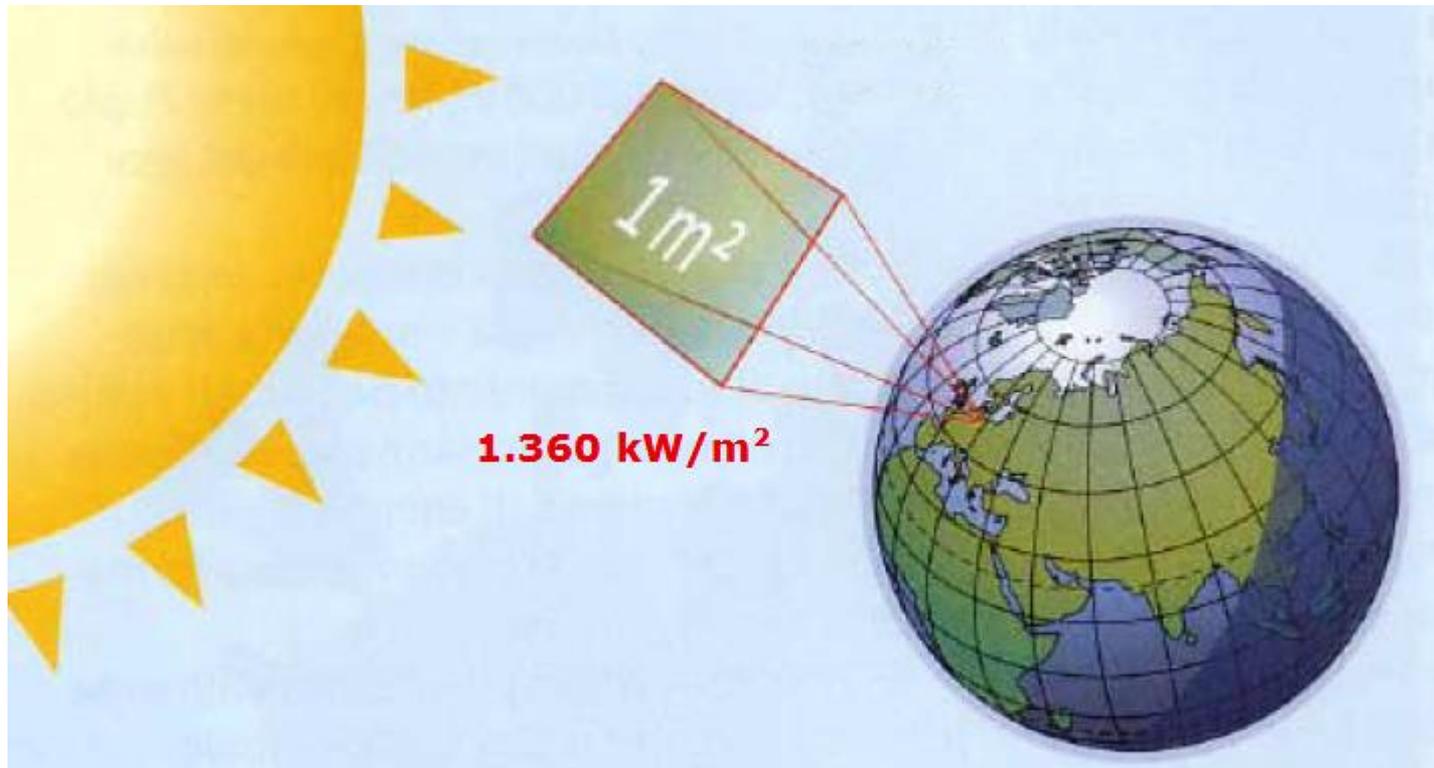
“filtrata” da

H_2O (vapore), CO_2 , O_3 ,
 N_2 , O_2 , altri gas

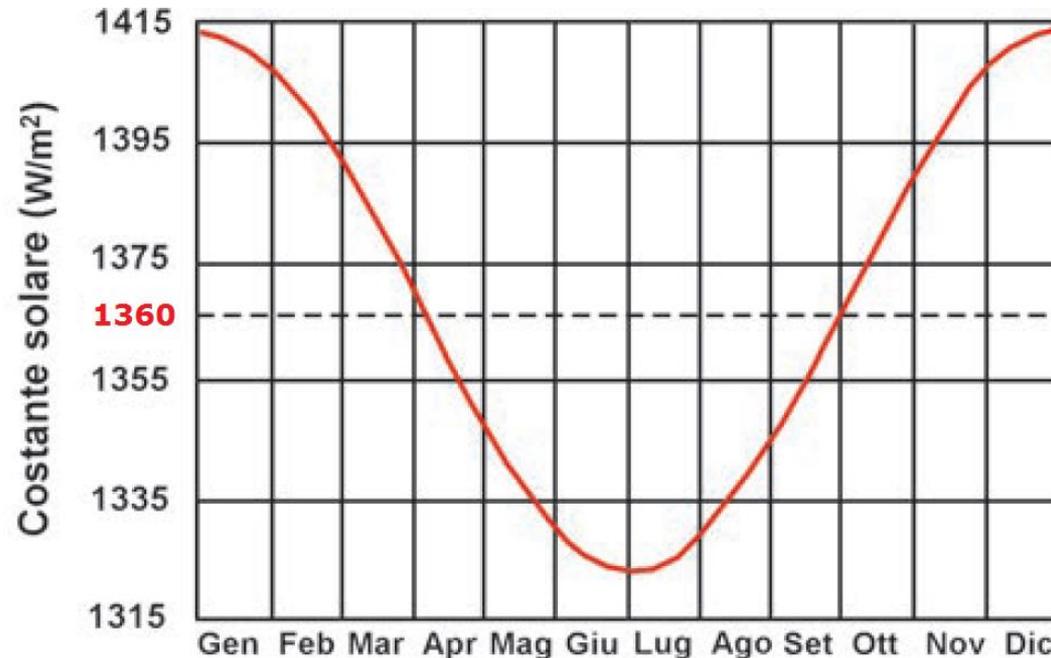
L'energia della radiazione elettromagnetica cresce al decrescere della lunghezza d'onda; la parte della radiazione solare a più alta energia (pericolosa per l'uomo) è assorbita da O_2 (UV-C, 100-280 nm) e da O_3 (UV-B, 280-315 nm), la restante attraversa quasi completamente l'atmosfera.



La potenza irradiata dal Sole è di circa 60.000 kW/m^2 e decresce all'aumentare della distanza; alla fascia esterna dell'atmosfera vale, mediamente, circa **1.360 W/m^2** ed è definita **costante solare**.



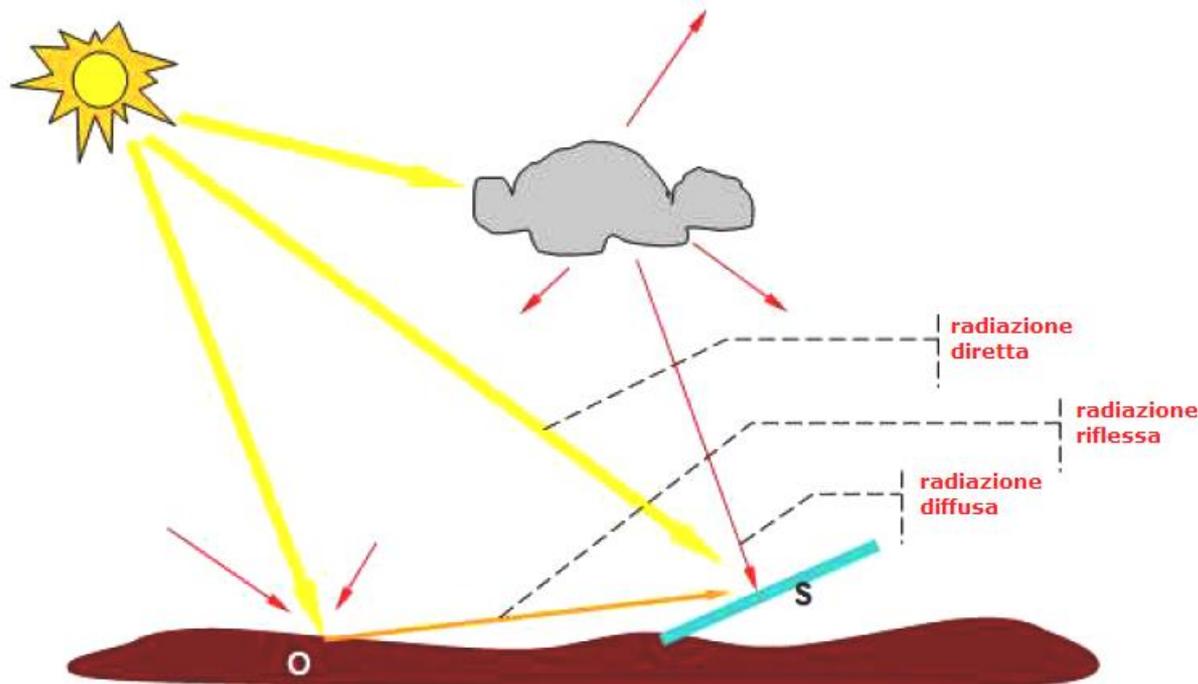
La costante solare è un valore medio, poiché oscilla al variare della distanza dal Sole (orbita terrestre ellittica).



La Terra è al perielio (distanza minima dal Sole) dal 2 al 5 gennaio, circa 147 milioni di km, all'afelio (distanza massima dal Sole) dal 3 al 5 luglio, circa 152 milioni di km. L'estate, nel nostro emisfero, si spiega con l'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre!

Al suolo la radiazione solare è inferiore alla costante solare per fenomeni di dispersione ed assorbimento dell'atmosfera e può raggiungere un valore massimo di circa **1.000 W/m²**.

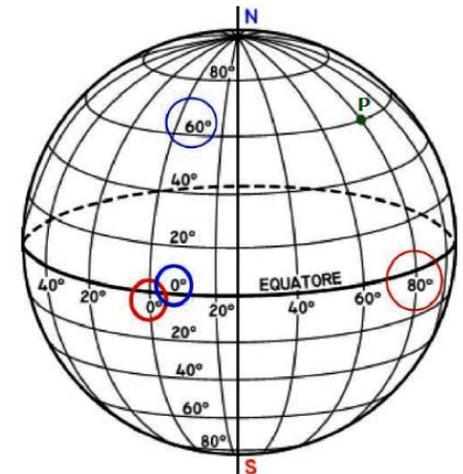
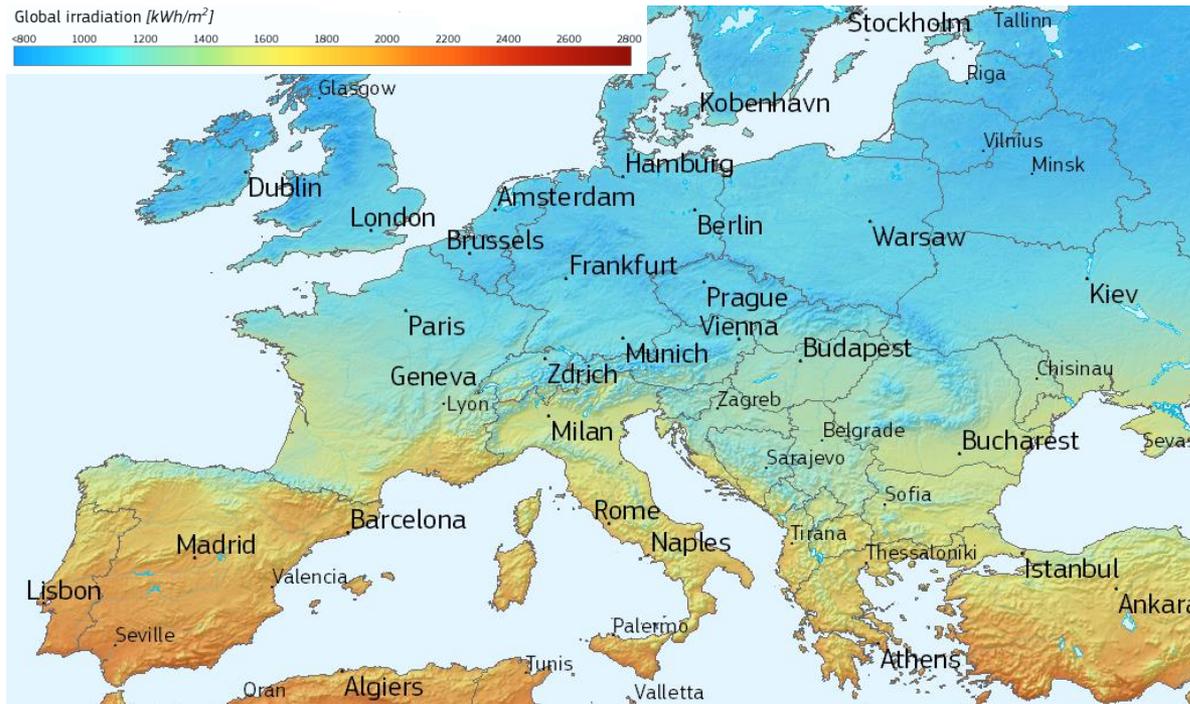
La radiazione **globale** al suolo è data dalla somma delle componenti diretta, diffusa e riflessa (albedo).



L'entità delle tre componenti dipende da:

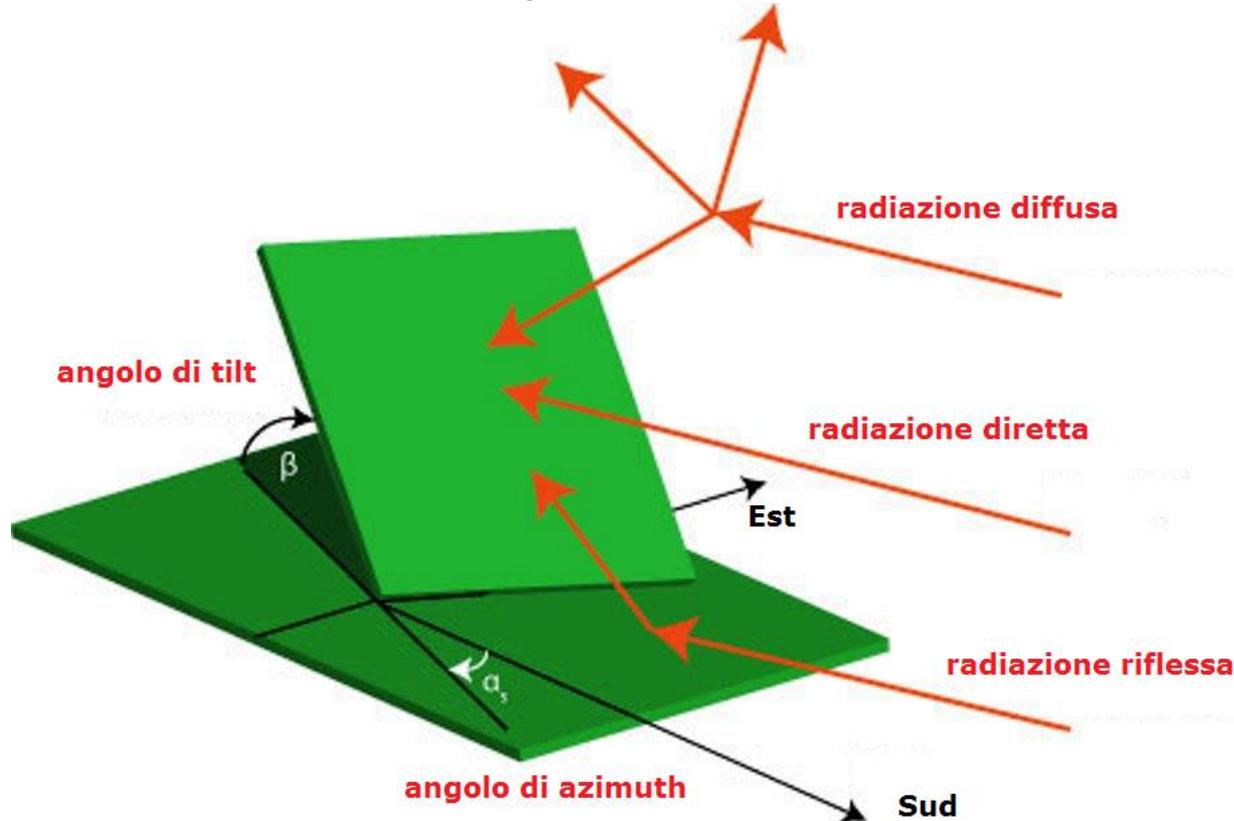
1) fattori fisici: latitudine, tilt ed azimuth;

- latitudine: si esprime in gradi e rappresenta la distanza angolare di un punto sulla superficie terrestre dall'equatore misurata sul meridiano corrispondente;



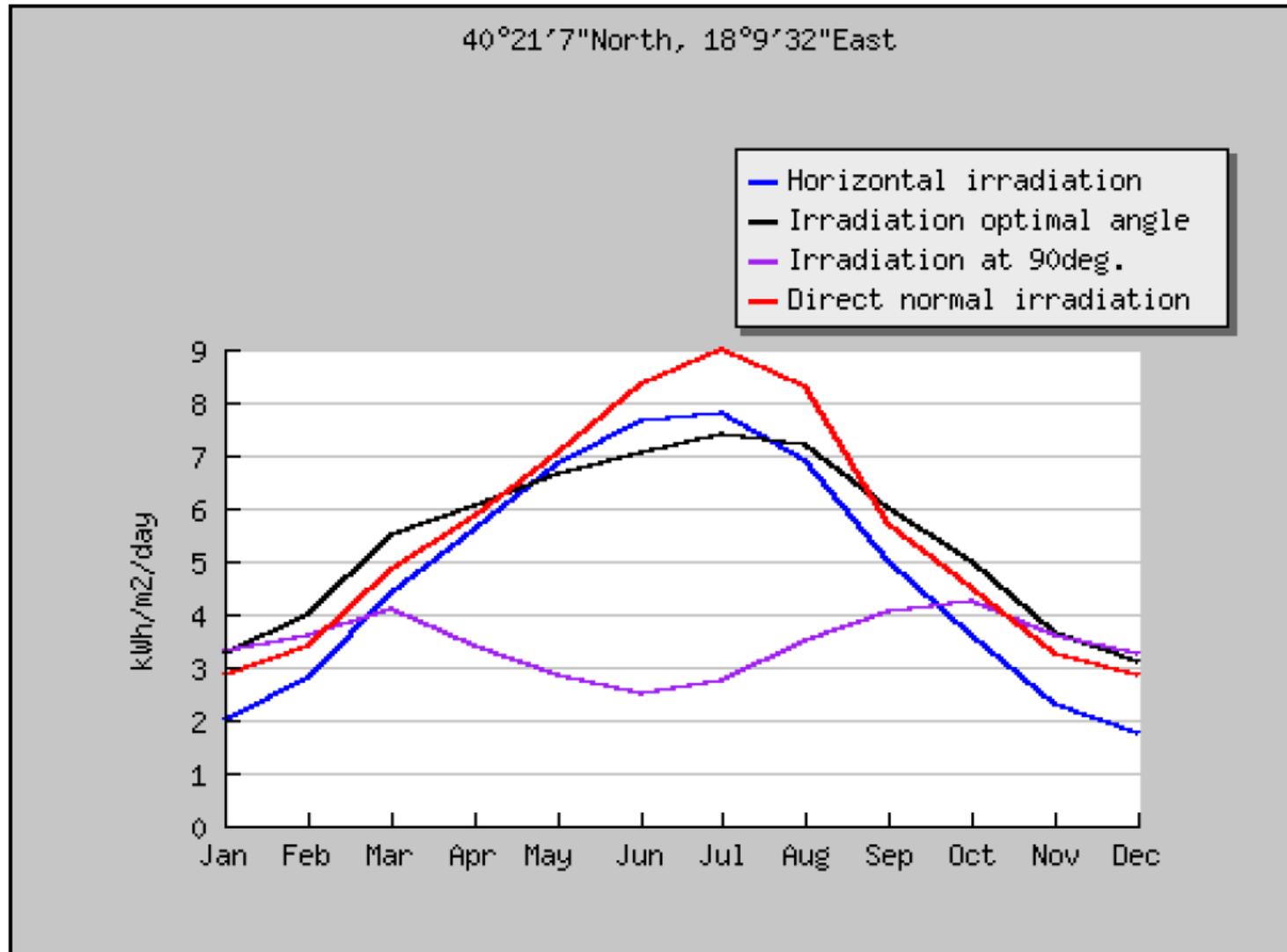
La radiazione globale diminuisce verso i poli.

- tilt: è l'angolo tra il piano della superficie in esame e quello di riferimento (orizzontale);
- azimuth: è l'angolo compreso tra la normale alla superficie in esame ed il piano meridiano di riferimento;

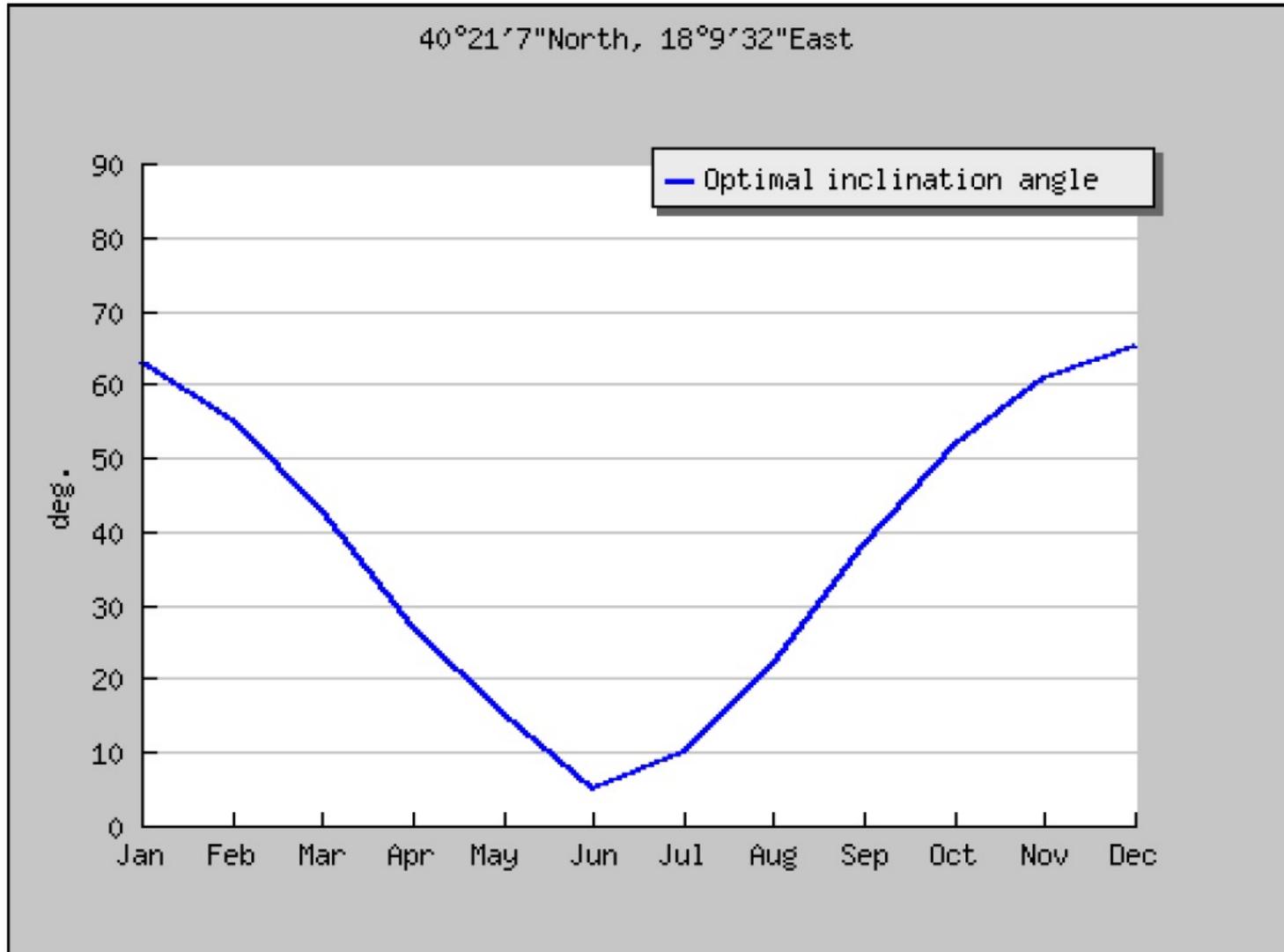


Per ogni punto della superficie terrestre esistono valori ottimali di tilt ed azimuth che massimizzano la radiazione globale e dipendono dalla latitudine e dal tempo (h,g,m)

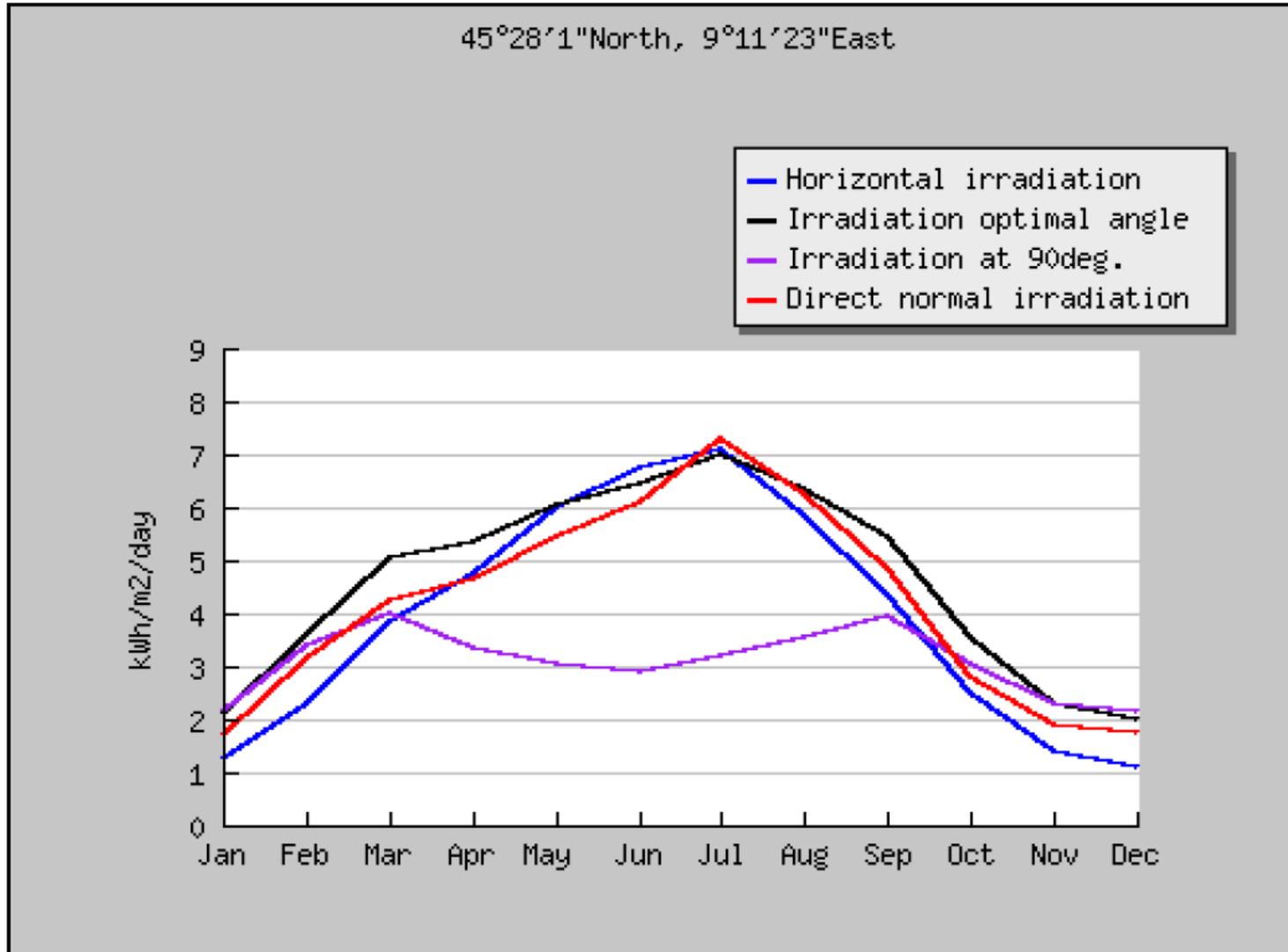
Radiazione solare a Lecce (tilt_{opt} 33°, dati PVGIS, JRC)



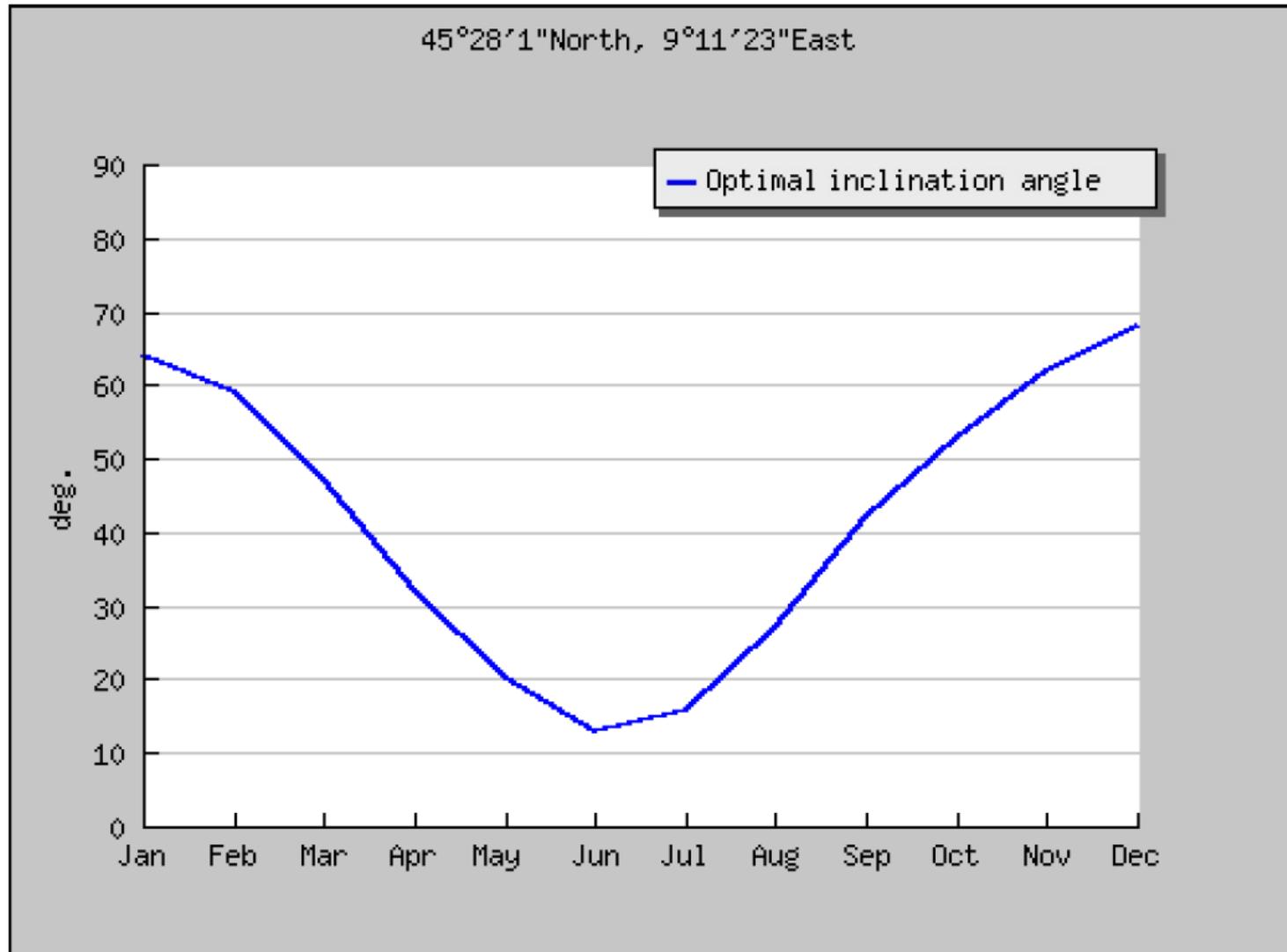
Angolo di tilt ottimale a Lecce (dati PVGIS, JRC)



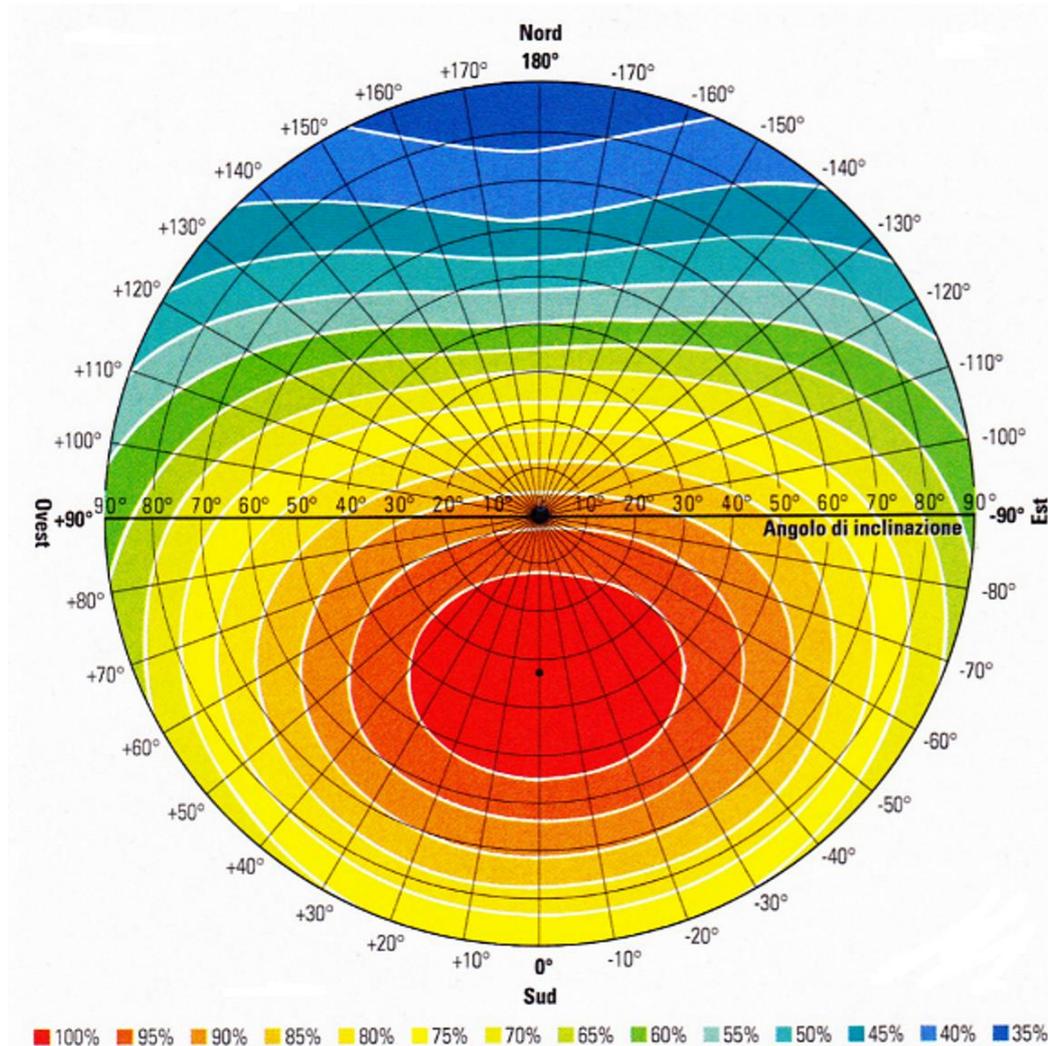
Radiazione solare a Milano (tilt_{opt} 36°, dati PVGIS, JRC)



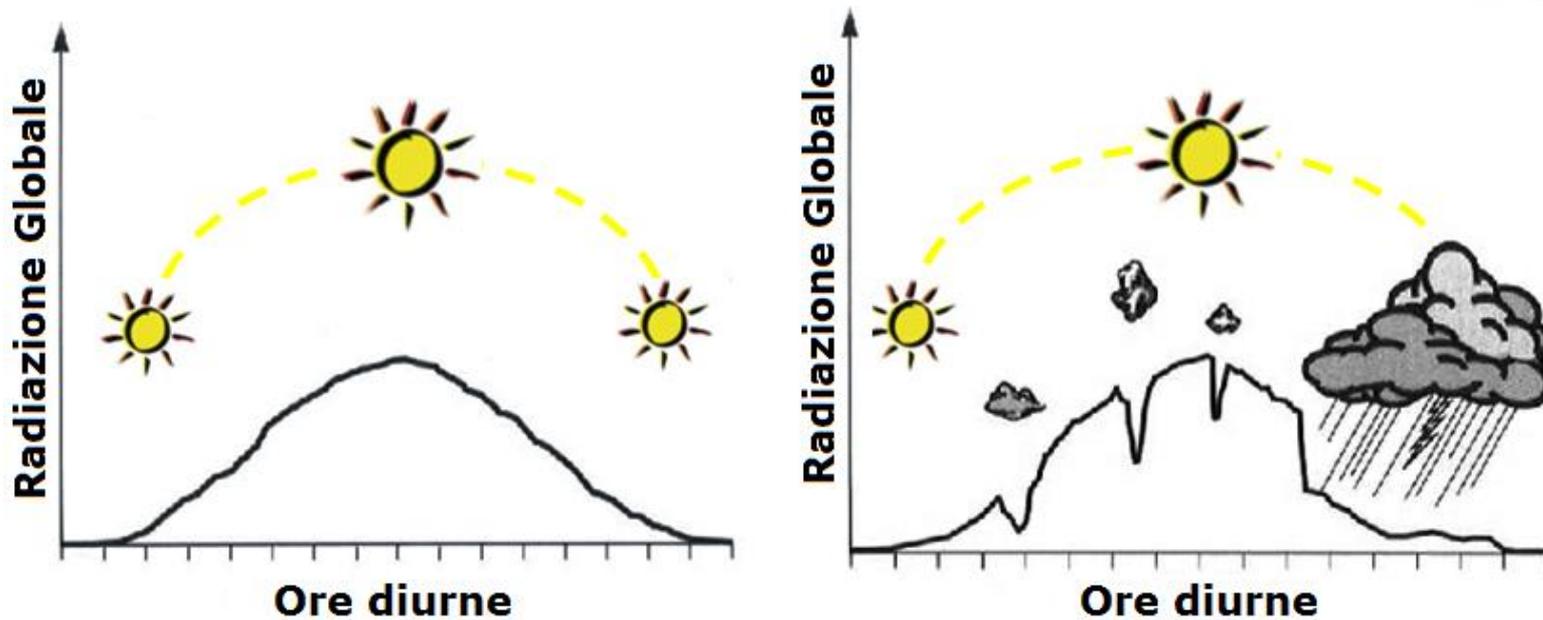
Angolo di tilt ottimale a Milano (dati PVGIS, JRC)



Influenza di tilt ed azimuth sulla radiazione diretta e diffusa



2) fattori meteo (nuvolosità) e condizioni atmosferiche;



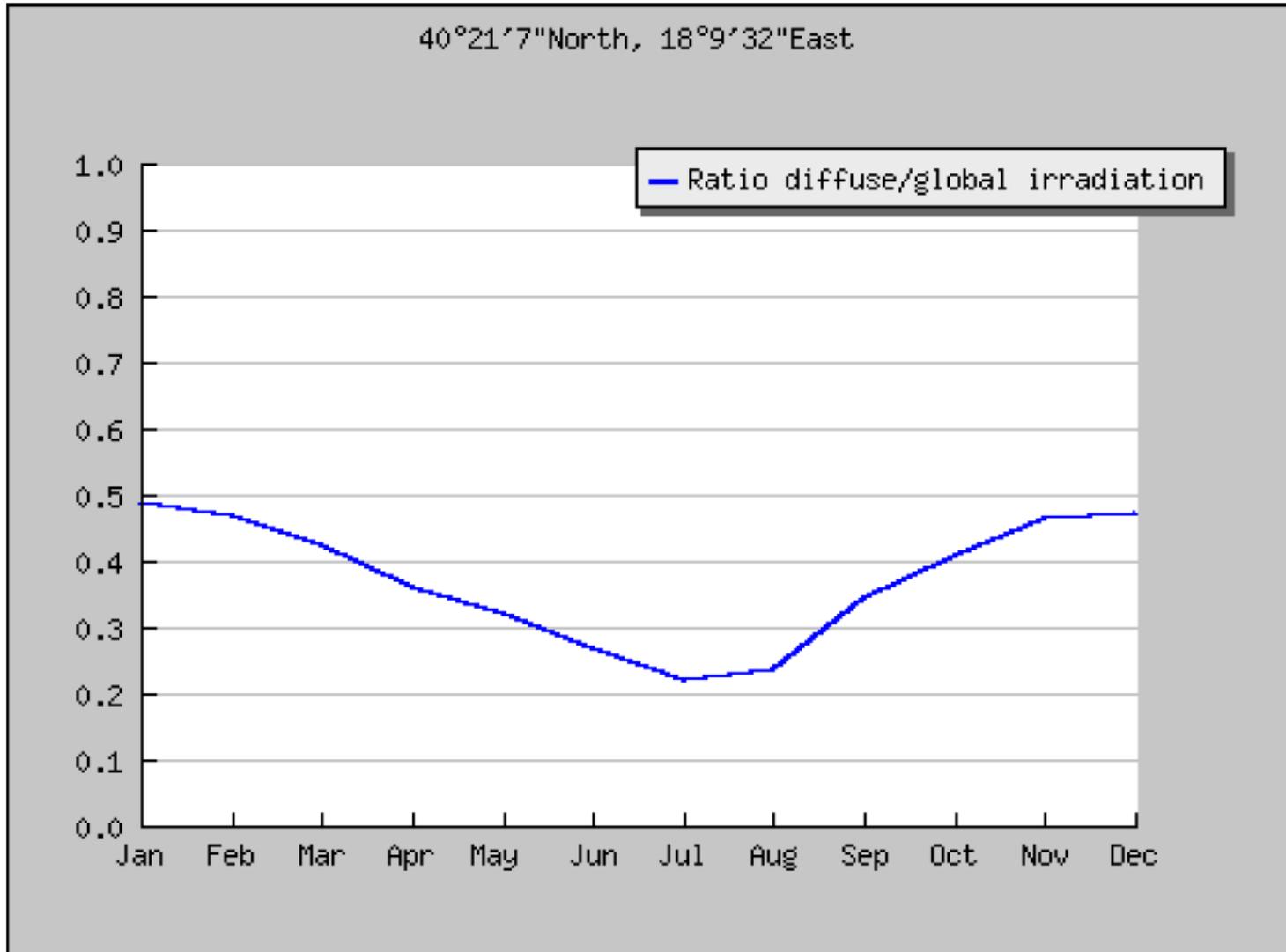
Per condizioni atmosferiche si intende il grado di torbidità o fattore Linke (TL) dipendente da presenza di pulviscolo, vapore, inquinamento, etc.

| Month | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Mountains | 1.5 | 1.6 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.1 | 1.8 | 1.6 | 1.5 |
| Rural | 2.1 | 2.2 | 2.5 | 2.9 | 3.2 | 3.4 | 3.5 | 3.3 | 2.9 | 2.6 | 2.3 | 2.2 |
| City | 3.1 | 3.2 | 3.5 | 4.0 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.3 | 4.0 | 3.6 | 3.3 | 3.1 |
| Industrial | 4.1 | 4.3 | 4.7 | 5.3 | 5.5 | 5.7 | 5.8 | 5.7 | 5.3 | 4.9 | 4.5 | 4.2 |

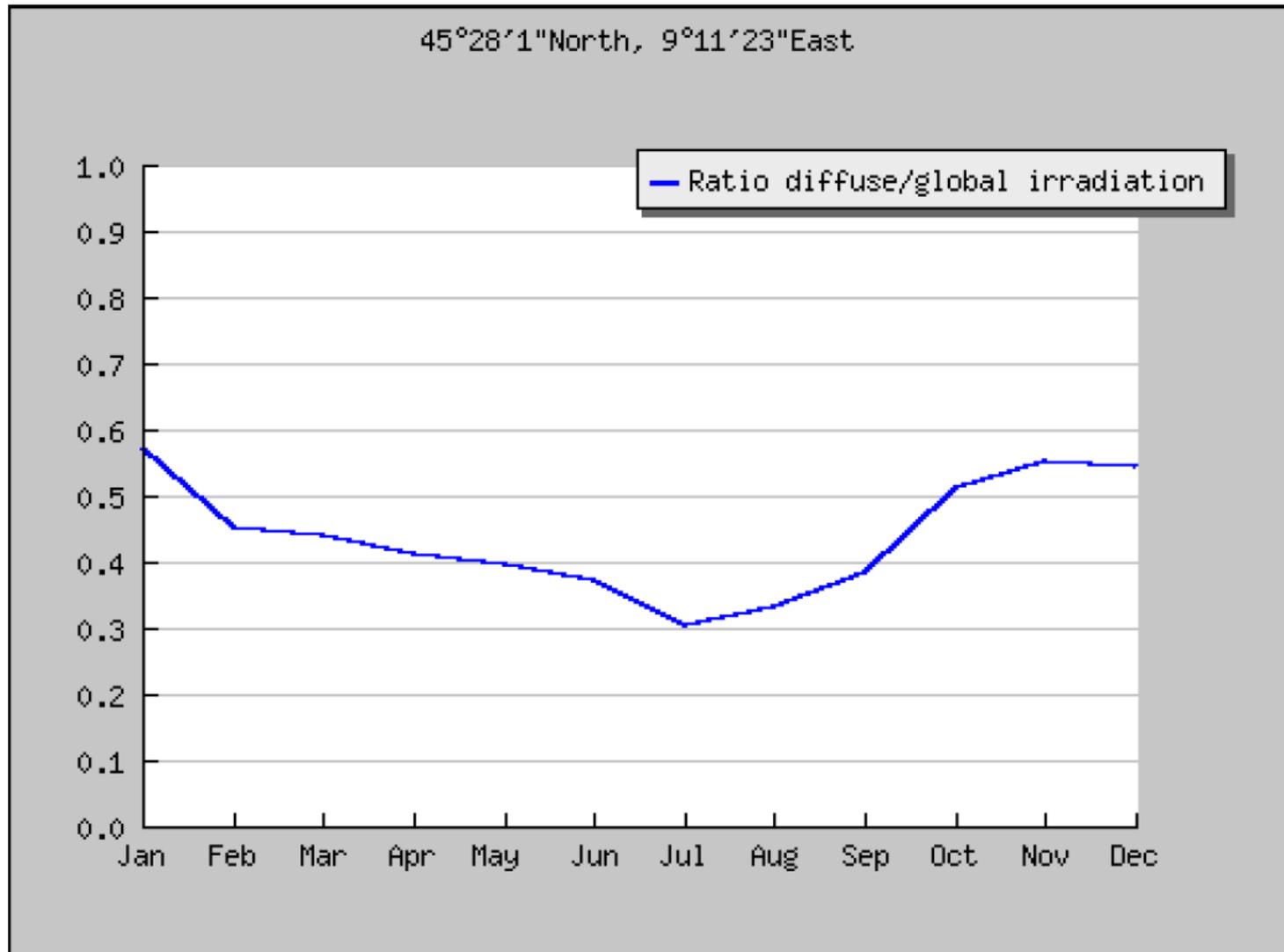
Valori medi in Europa; 1 = cielo limpido, 6-7 = cielo molto torbido.

In estate si nota un picco, dovuto alla frequente presenza di maggior umidità.

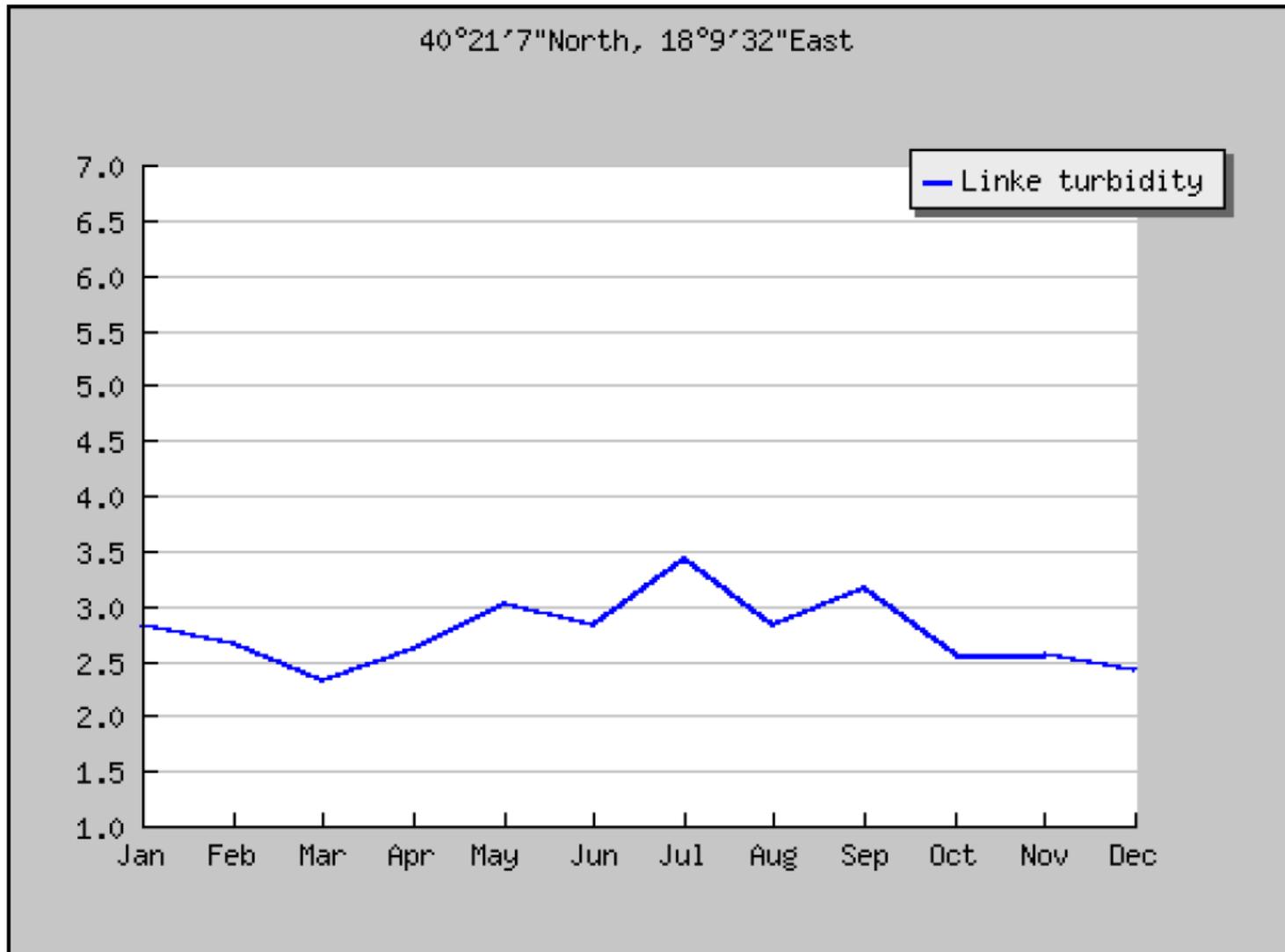
Rapporto radiazione diffusa/globale a Lecce (dati PVGIS, JRC)



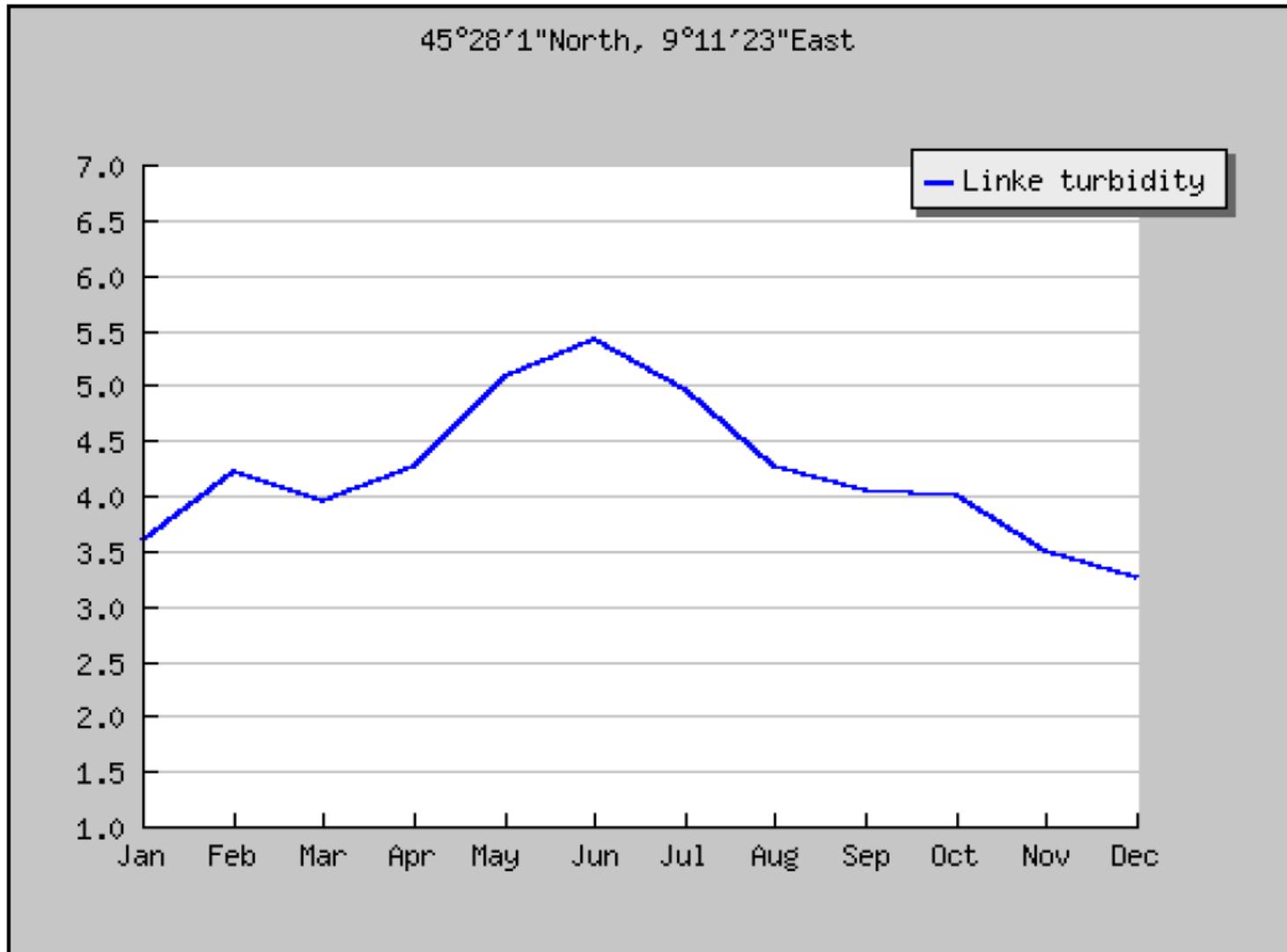
Rapporto radiazione diffusa/globale a Milano (dati PVGIS, JRC)



Fattore di torbidità (Linke) a Lecce (dati PVGIS, JRC)



Fattore di torbidità (Linke) a Milano (dati PVGIS, JRC)



Per la **misura** della radiazione solare si impiegano strumenti chiamati **solarimetri** classificabili in base alla componente misurata ed alla tecnologia impiegata.

componente

- piranometro per la radiazione globale;
- piranometro a banda ombreggiante per radiazione diffusa;
- pireliometro per radiazione diretta (necessario tracking).

tecnologia

- solarimetro a termopila (termocoppie in serie $\Delta V \propto R$);
- solarimetro ad effetto fotovoltaico (cella solare tarata $\Delta V \propto R$).



Il fabbisogno energetico elettrico nazionale nel 2017 (ultimo rapporto Terna/GSE) è stato di circa 321 TWh (tera=1x10¹²).

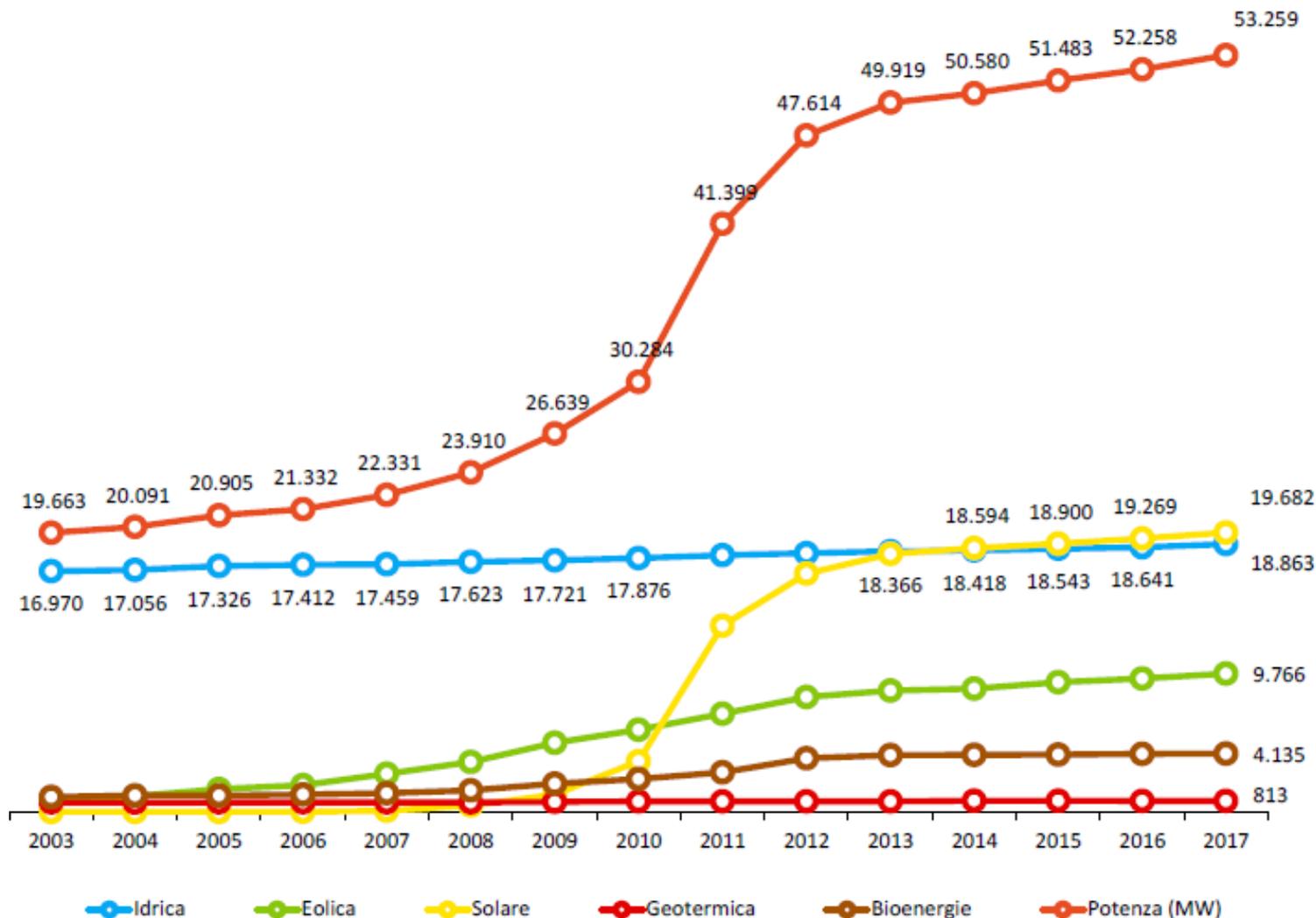
produzione **nazionale**

| | | | |
|--------------------|----------------------|-----------------|-------------------|
| rinnovabili | ▪ idroelettrico | 35,8 TWh | |
| | ▪ solare | 21,8 TWh | |
| | ▪ bioenergie | 17,9 TWh | ≈ 101 TWh (31,5%) |
| | ▪ eolico | 17,6 TWh | |
| | ▪ geotermico | 5,8 TWh | |
| fossili | ▪ carbone | 29,3 TWh | |
| | ▪ gas naturale | 137,0 TWh | ≈ 183 TWh (56,9%) |
| | ▪ altri combustibili | 16,1 TWh | |

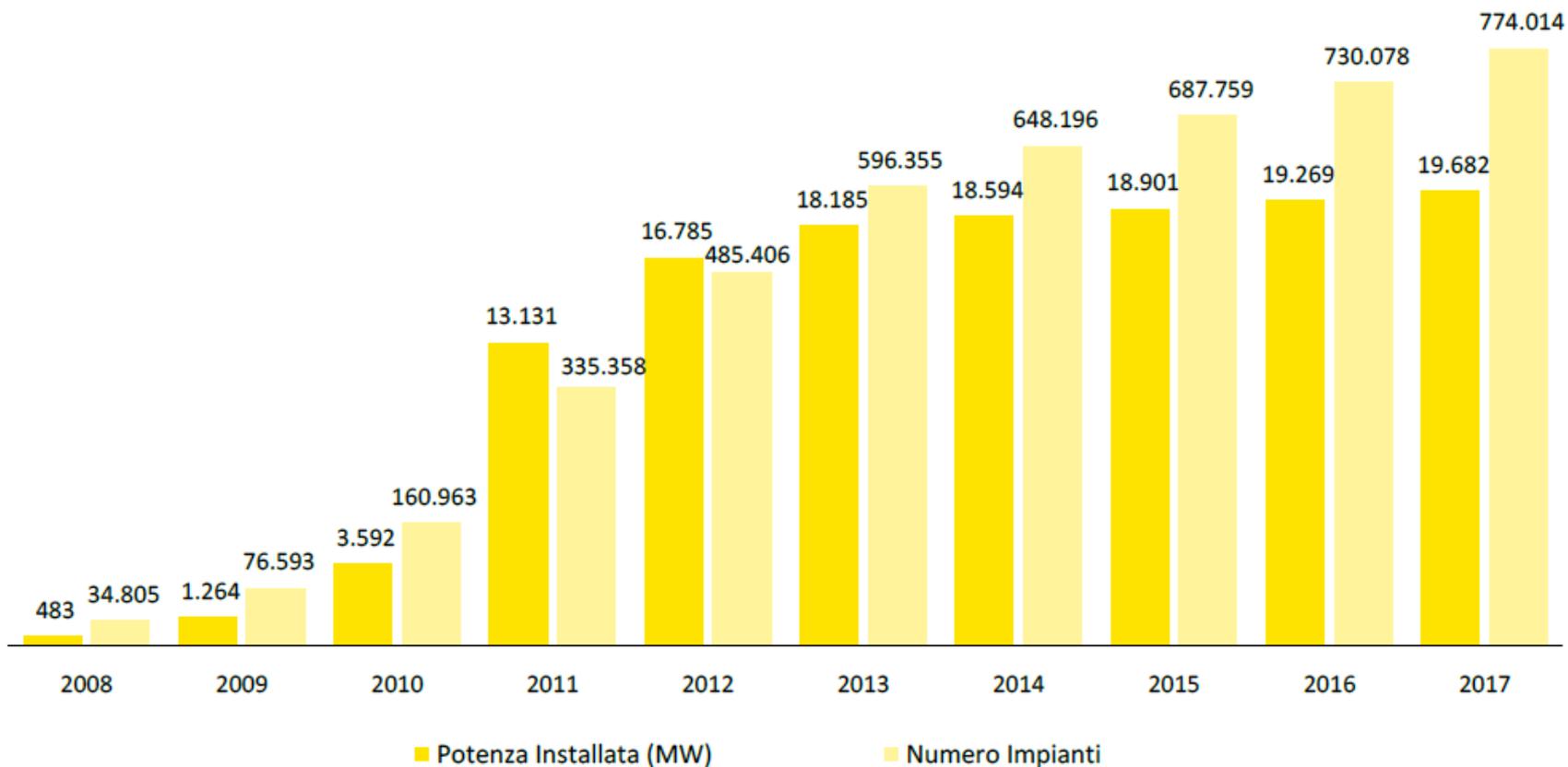
Il saldo con l'**estero** è stato di circa -37,8 TWh (12%).

La produzione solare da fotovoltaico vale circa il **7%**.

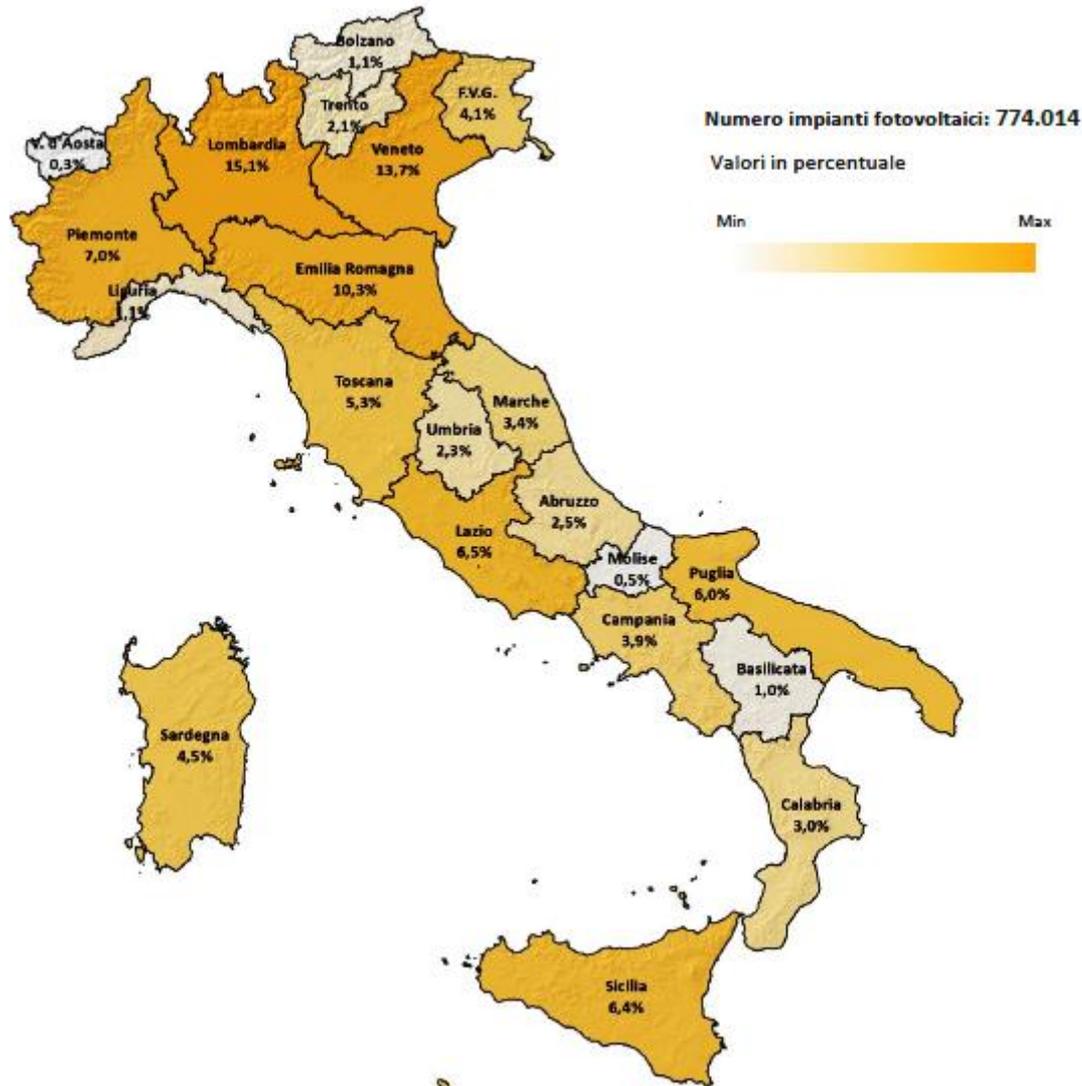
Evoluzione impianti FER 2003-2017 (MW, fonte GSE/Terna)



Evoluzione impianti FV 2008-2017 (MW, fonte GSE/Terna)



Situazione impianti FV 2017, numerosità (fonte GSE/Terna)



Situazione impianti FV 2017, potenza (MW, fonte GSE/Terna)



Situazione impianti FV 2017, produzione (fonte GSE/Terna)



I **vantaggi** tipici della tecnologia fotovoltaica sono:

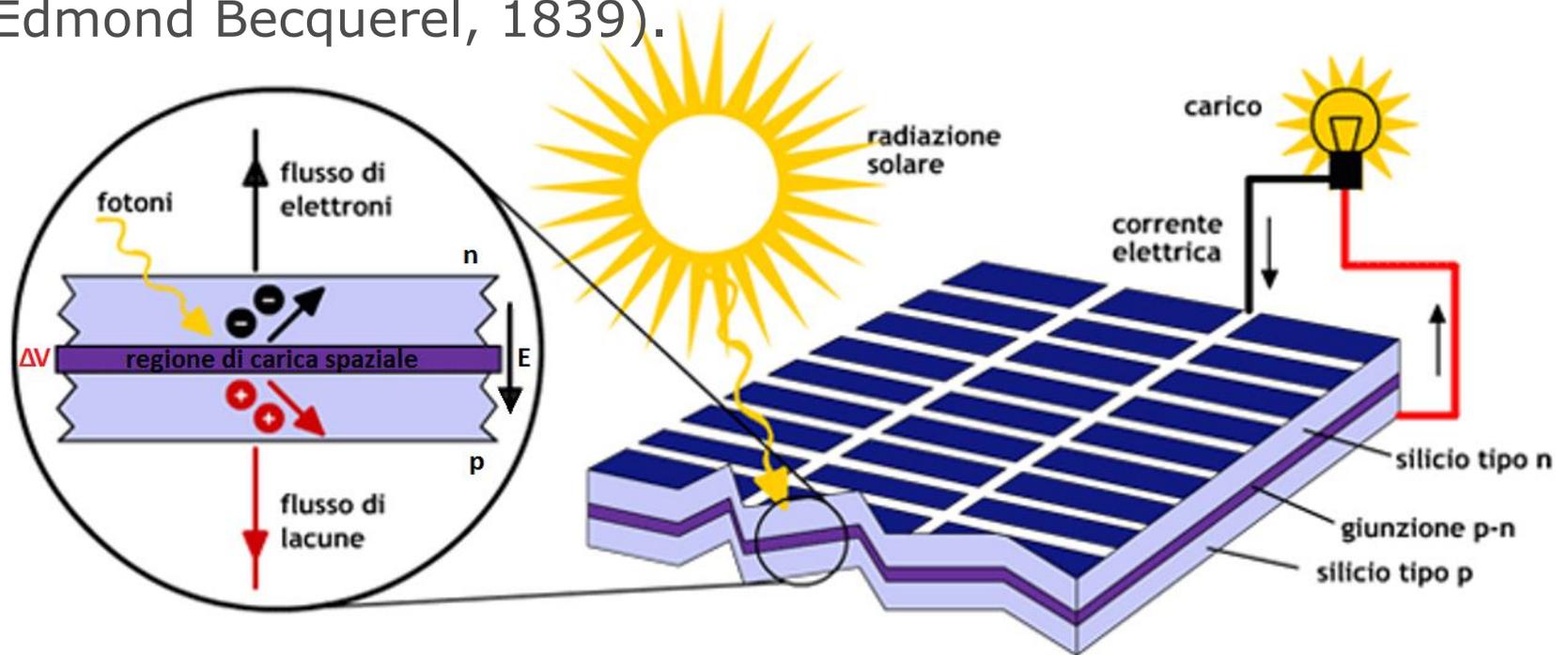
- modularità, la dimensione di impianto può essere facilmente scalata per un'ampia serie di applicazioni;
- semplicità, intesa come progettazione, installazione e gestione;
- affidabilità, il gran numero di impianti installati (a partire dagli anni '80) dimostra longevità e durata delle prestazioni;
- manutenibilità, l'assenza di parti in movimento (tracking escluso) garantisce semplicità di manutenzione.

I principali **svantaggi** della tecnologia fotovoltaica sono la densità di potenza installabile per unità di superficie e la necessità di assenza di ombreggiamenti.

Un impianto fotovoltaico è un impianto elettrico che trasforma **direttamente** la radiazione solare in energia elettrica.

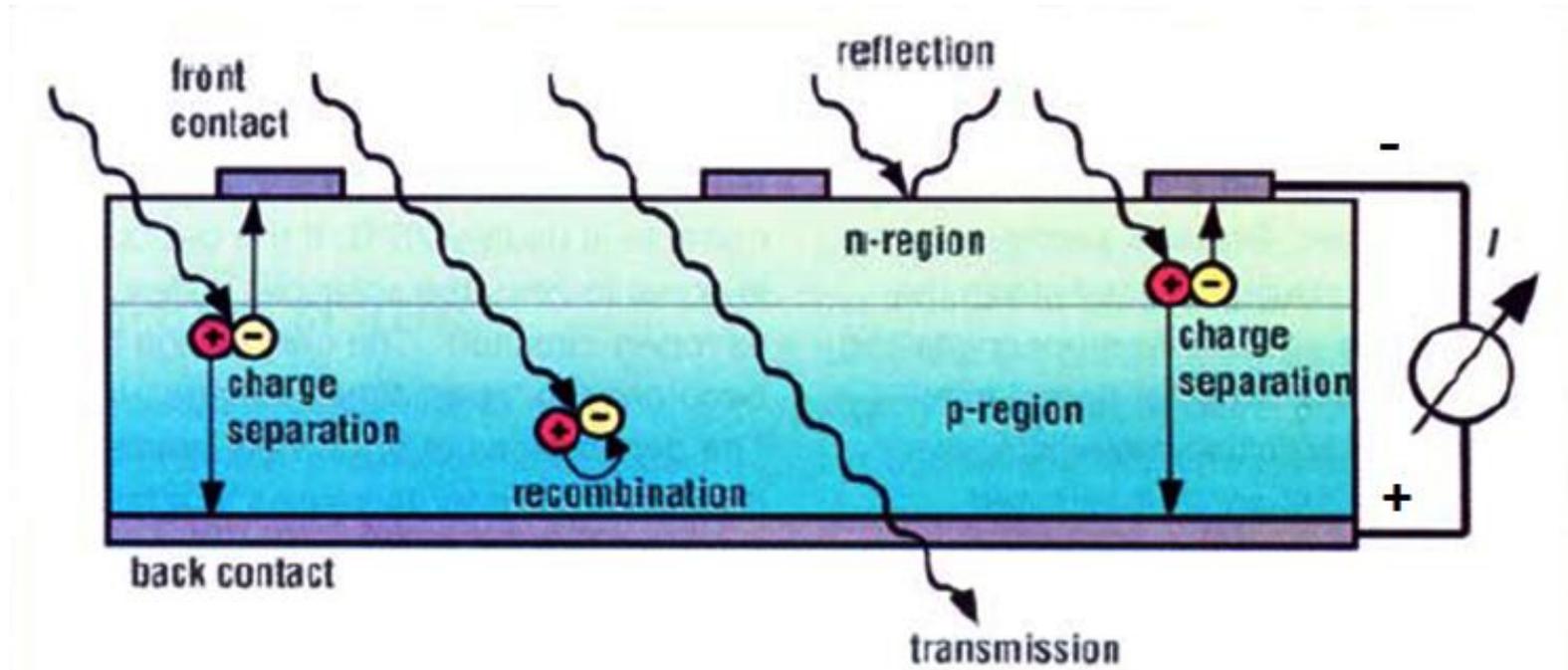


La conversione avviene per l'**effetto fotovoltaico** (Alexandre Edmond Becquerel, 1839).



Se la zona di giunzione di un semiconduttore (es. **Si**) opportunamente trattato (drogato p, n, **B**, **P**) in equilibrio sotto effetto del campo elettrico E generato dalla ΔV , è investita da radiazione luminosa si origina una separazione di carica (flusso di elettroni e lacune) che può chiudersi in un circuito esterno per alimentare un carico.

Non tutti i fotoni che incidono il semiconduttore drogato determinano la separazione di carica e quindi la corrente.

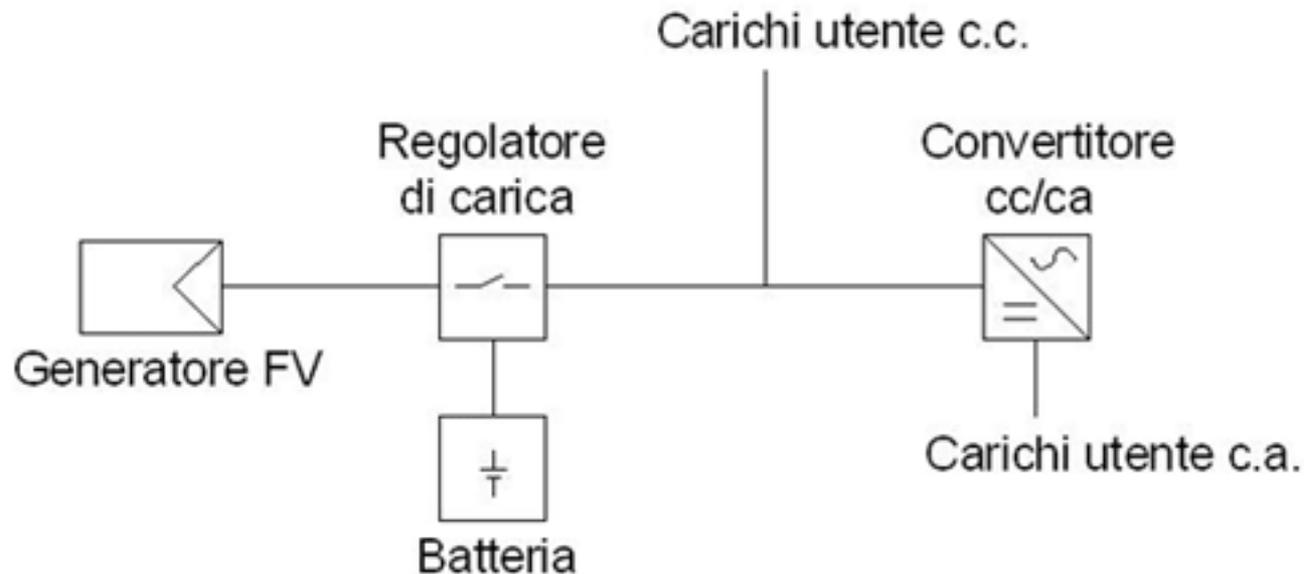


La conversione è tanto più efficiente quanto minore è il numero dei fotoni riflessi o trasmessi; l'efficienza, quindi, aumenta all'aumentare del numero di fotoni che determinano la separazione di carica. Il semiconduttore drogato, dotato di idonea contatteria anteriore e posteriore è una **cella fotovoltaica**.

Gli impianti fotovoltaici si classificano in due categorie:

1) ad isola ("stand alone");

oltre al generatore FV, sono sempre dotati di accumulatore, regolatore di carica, carico in DC, eventuale inverter per carico in AC.

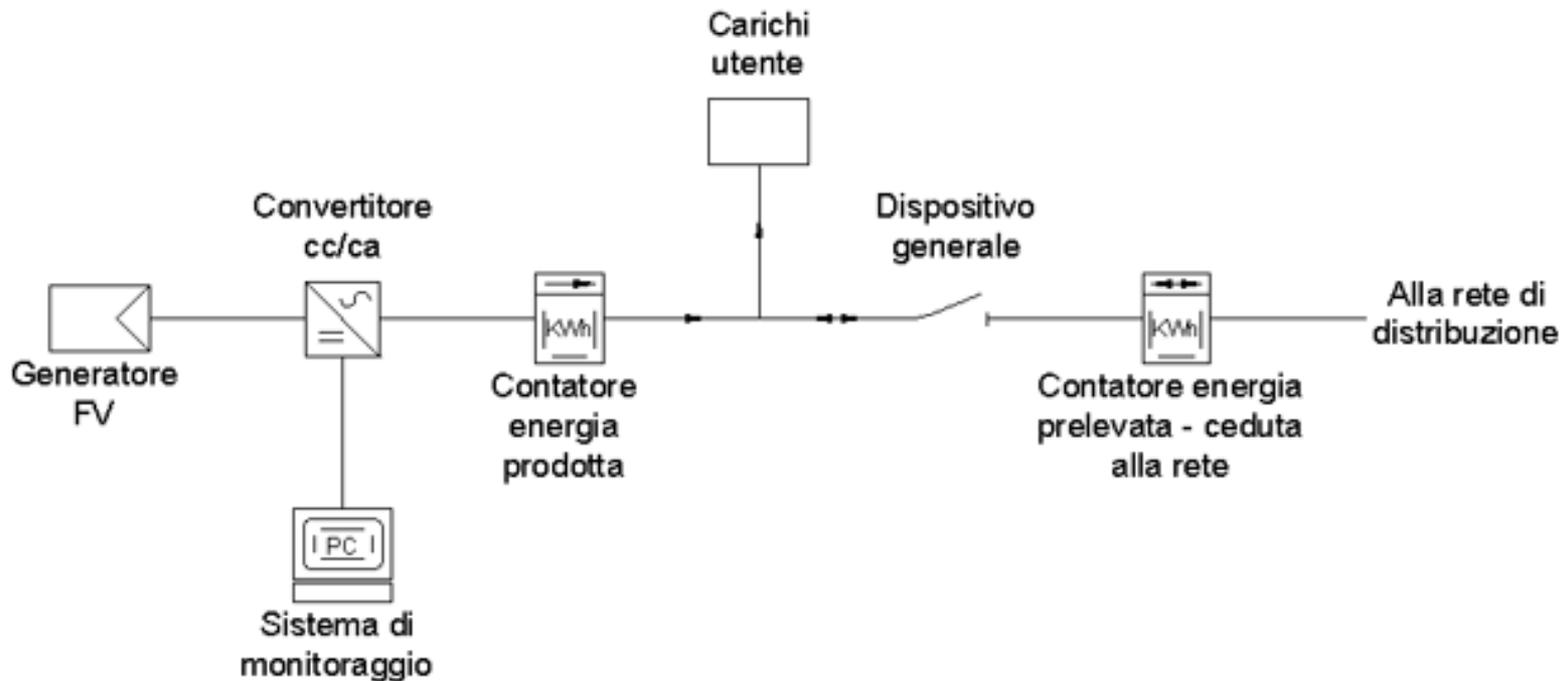


Le applicazioni tipiche sono quelle ove manca la rete elettrica o non è conveniente portarla (ruolo sostitutivo): illuminazione, irrigazione, segnalazioni luminose, baite, villaggi (paesi in via di sviluppo), stazioni meteo, boe, etc.





- 2) connessi alla rete ("grid connected");
oltre al generatore FV, sono sempre dotati di inverter, misuratori, monitoraggio, eventuale storage (ultimi 3 anni).



Sono i più diffusi sia per applicazioni domestiche...



impianto FV $P_n \approx 3$ kWp, allaccio alla rete 9/2005

sia per piccole aziende,...



impianto FV $P_n \approx 18,72$ kWp, allaccio alla rete 11/2005

sia in ambito industriale,...



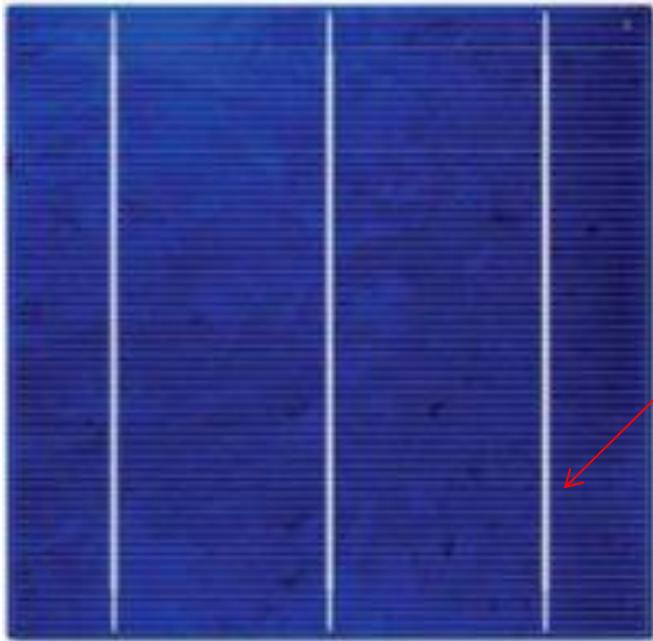
impianto FV $P_n \approx 750$ kWp, allaccio alla rete 06/2010

sia in ambito "speculativo".



impianto FV $P_n \approx 1$ MWp, allaccio alla rete 05/2011

Le celle attualmente più impiegate sono in silicio (Si).



cella in Si policristallino
eff. $\approx 21\%$



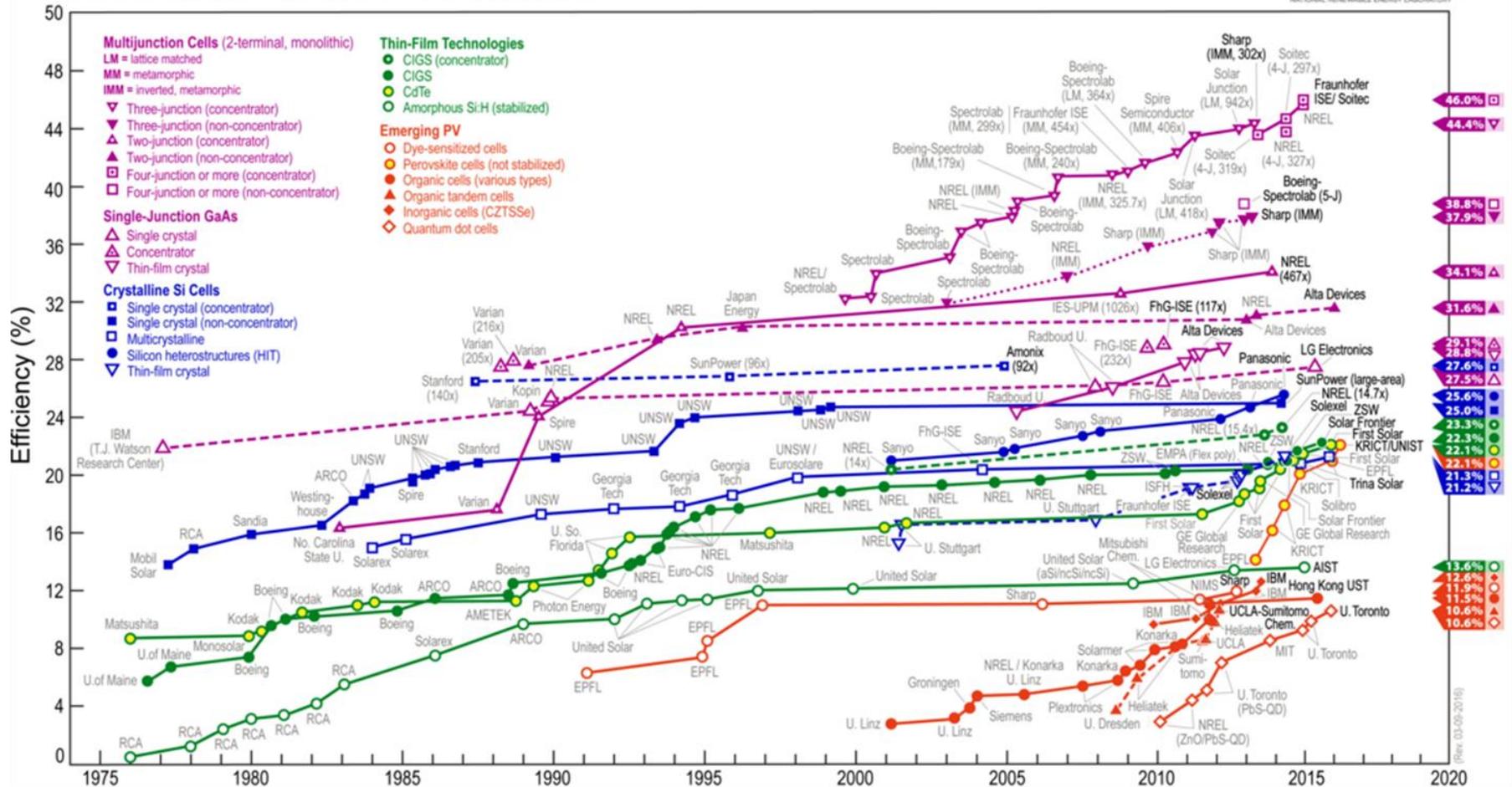
cella in Si monocristallino
eff. $\approx 25\%$

bus bar

I bus bar raccolgono la carica dalle griglie del lato superiore della cella (-); il loro numero (anche 5) è un compromesso!

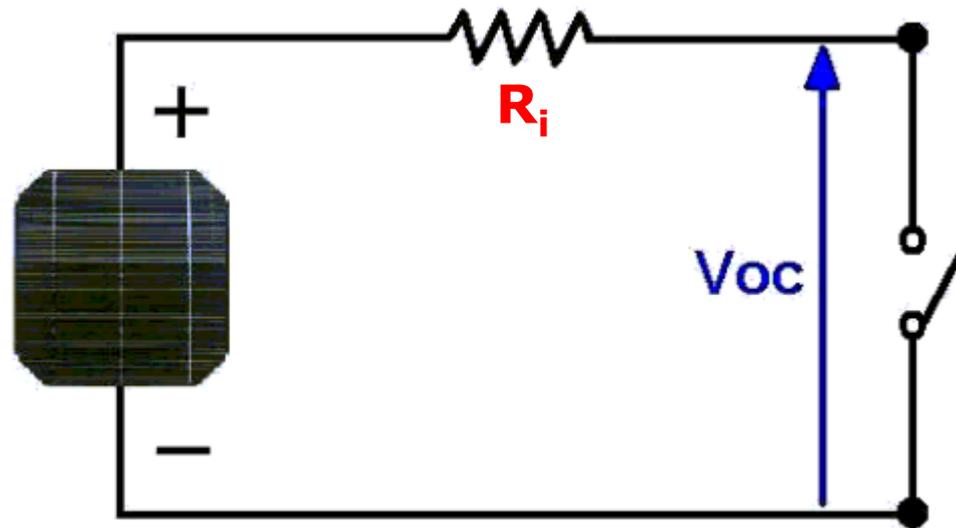
Evoluzione dell'efficienza di cella per varie tecnologie.

Best Research-Cell Efficiencies



Caratteristiche elettriche di una cella fotovoltaica

- tensione a circuito aperto V_{oc}

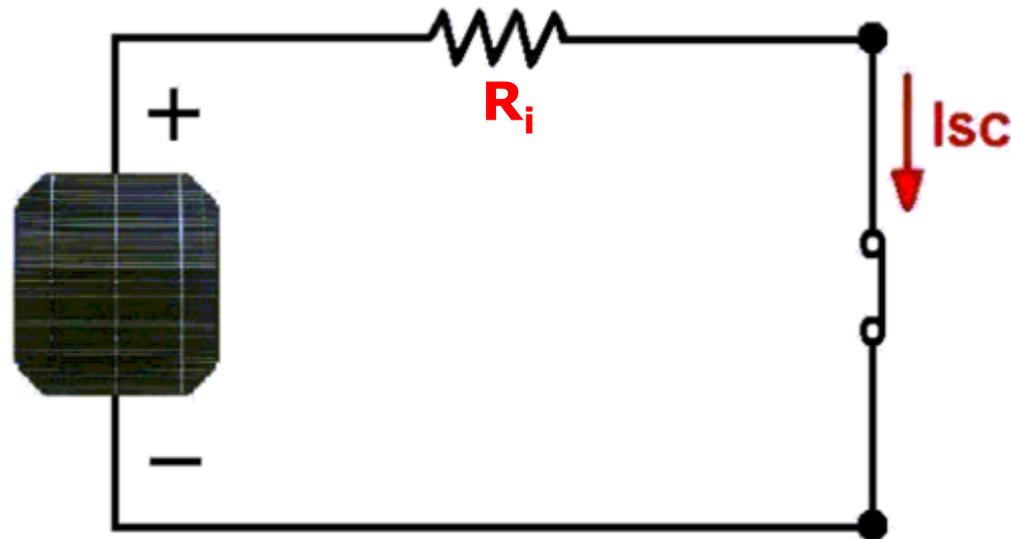


circuito equivalente

A circuito aperto, non essendoci passaggio di corrente, si misura la ddp tipica della tecnologia di cella $\approx 0,6$ V per Si (ΔV della zona di giunzione); la V_{oc} dipende dall'efficienza di conversione e dalla radiazione incidente.

Caratteristiche elettriche di una cella fotovoltaica

- corrente di corto circuito V_{oc}

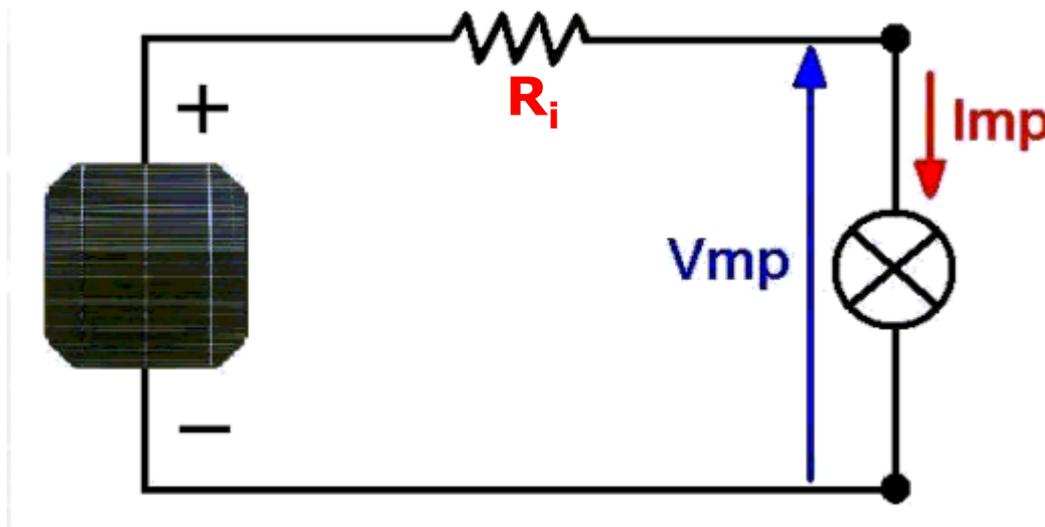


circuito equivalente

A circuito chiuso, non essendoci carico, si misura la I tipica della tecnologia di cella $\approx 9,5$ A per Si; la I_{sc} dipende dall'efficienza di conversione e dalla radiazione incidente.

Caratteristiche elettriche di una cella fotovoltaica

- corrente e tensione al punto di massima potenza V_{mp} , I_{mp}

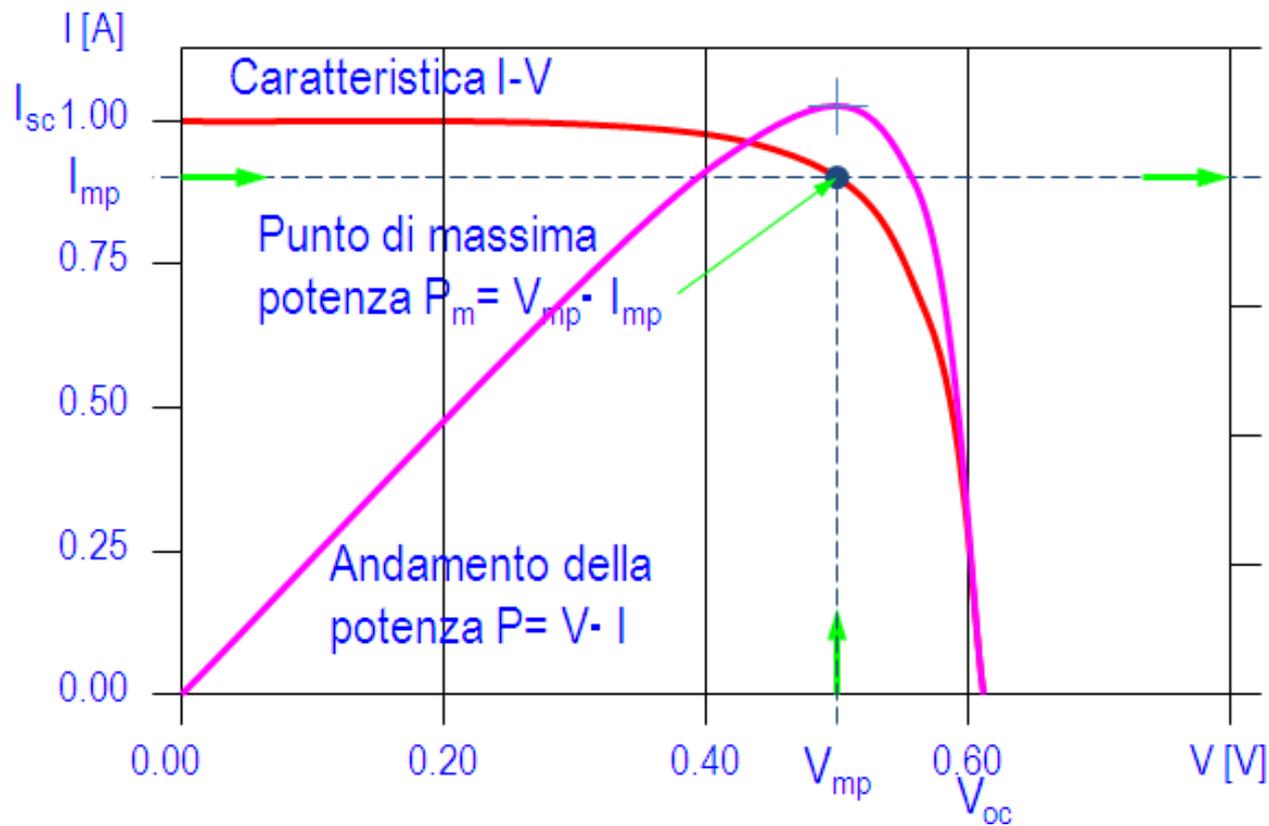


circuito equivalente

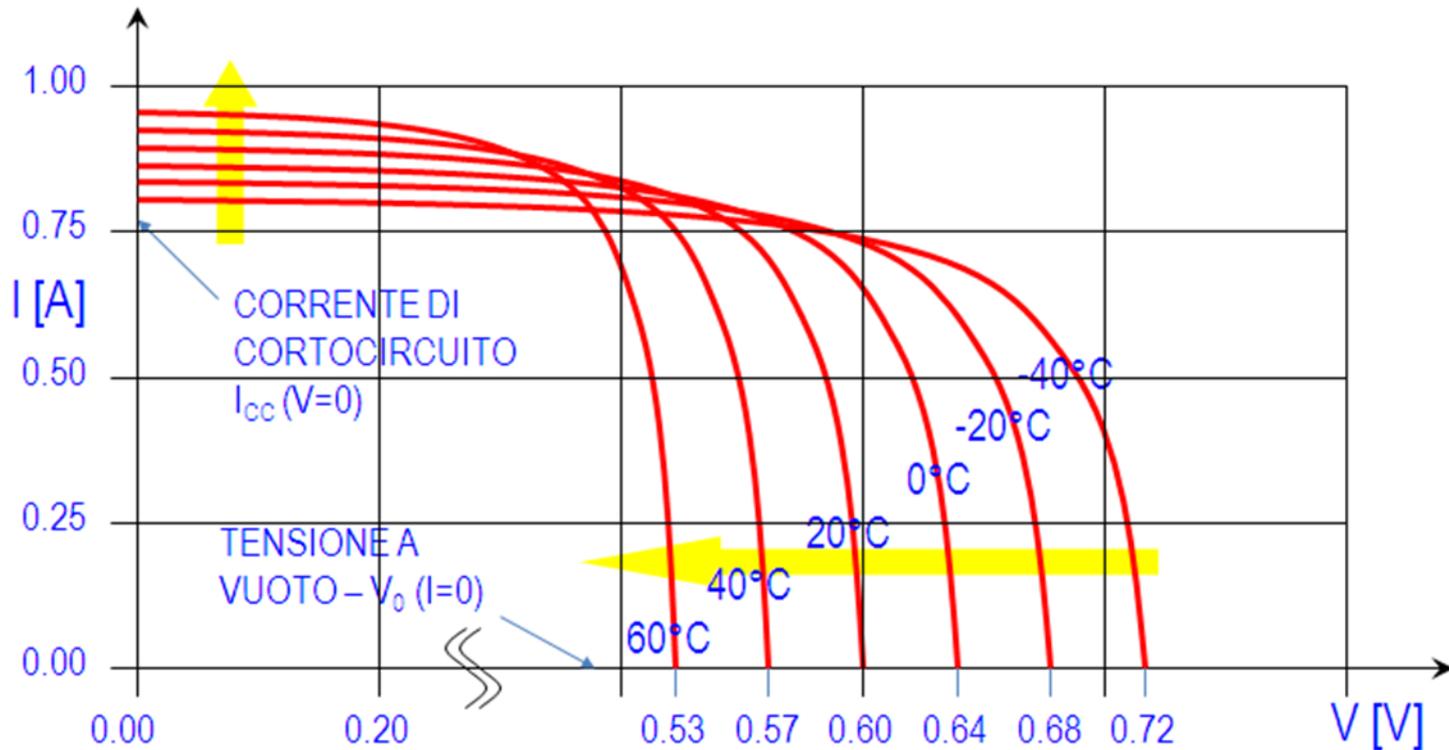
A circuito chiuso, con un carico esterno e solo in determinate condizioni si misurano la V_{mp} e la I_{mp} tipiche della tecnologia di cella; entrambe dipendono dall'efficienza di conversione e dalla radiazione incidente.

Caratteristiche elettriche di una cella fotovoltaica

- curva caratteristica di una cella fotovoltaica

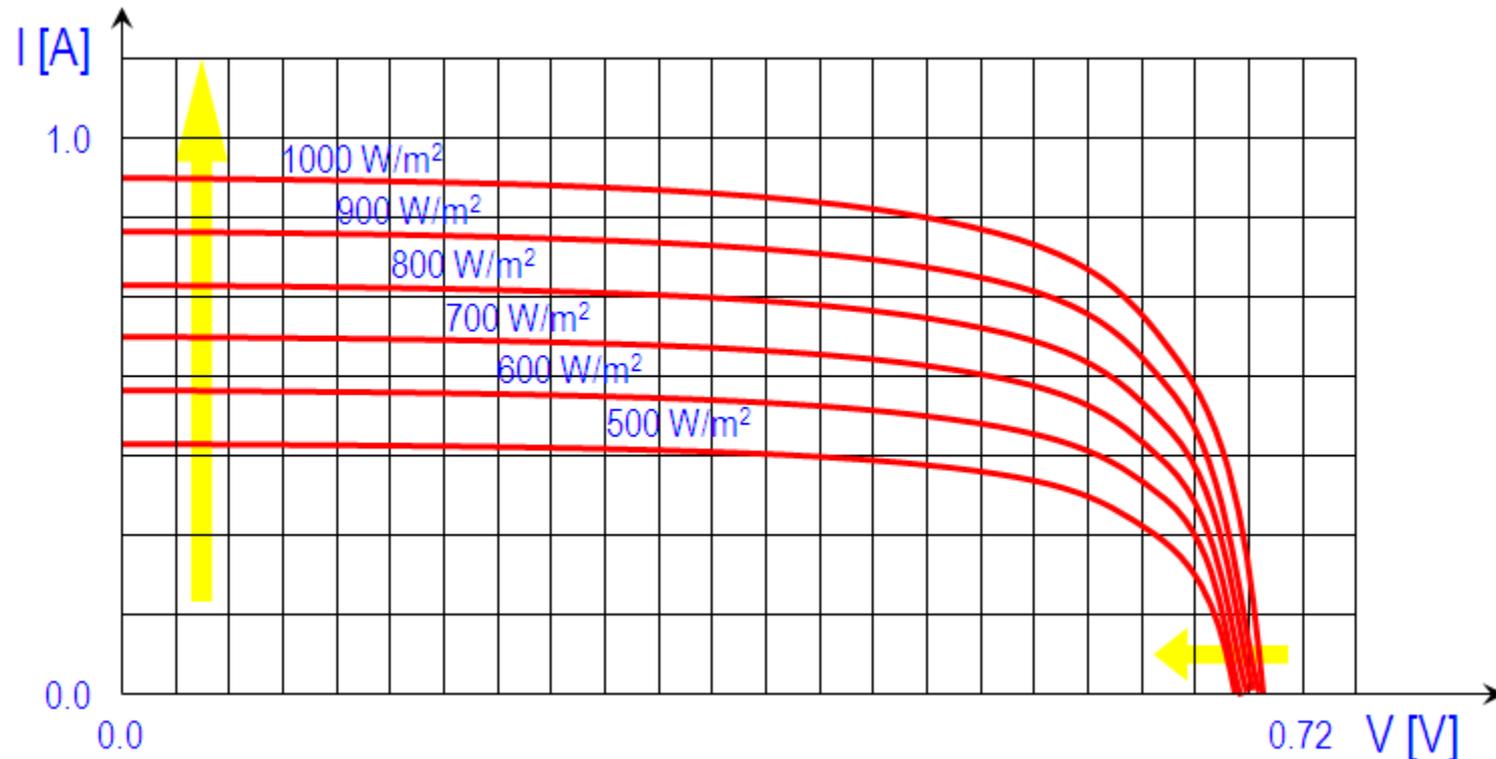


Caratteristiche elettriche di una cella fotovoltaica - effetto della temperatura sulla curva caratteristica



Al crescere della temperatura la potenza disponibile diminuisce; tipicamente ad ogni °C in più rispetto alle condizioni di prova (25°C) corrisponde una perdita di potenza dello 0,4-0,5% (Si).

Caratteristiche elettriche di una cella fotovoltaica - effetto della radiazione sulla curva caratteristica

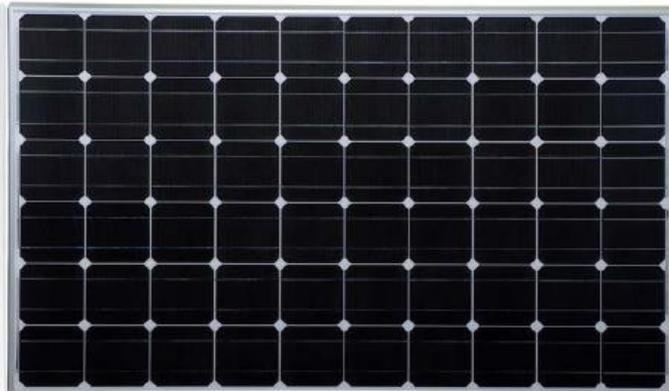


Al crescere della radiazione incidente aumenta la potenza disponibile; la corrente cresce proporzionalmente, la tensione rimane quasi stabile.

Un modulo fotovoltaico è composto da un insieme di più celle (tipicamente 60 per Si mono/poly) collegate in serie.



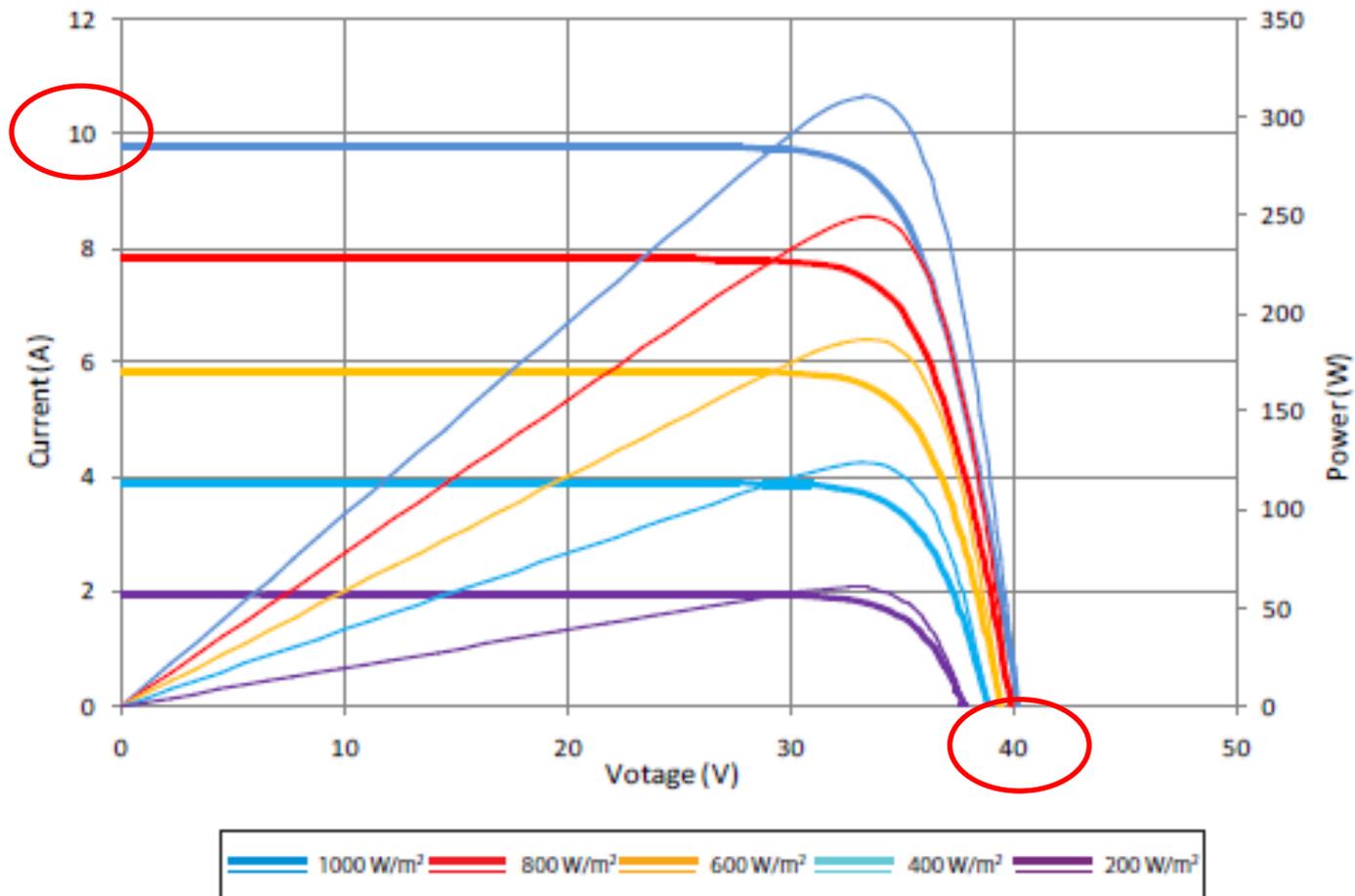
modulo FV in silicio policristallino 60 celle
efficienza tipica 17%



modulo FV in silicio monocristallino 60 celle
efficienza tipica 19%

Analogamente alla cella, anche il modulo FV ha una sua curva caratteristica.

Current-Voltage & Power-Voltage Curve (310S)



Caratteristiche elettriche di un modulo fotovoltaico

Electrical Characteristics

potenza nominale o picco

| STC | STP310S-20/ Wfw | STP305S-20/ Wfw | STP300S-20/ Wfw |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Maximum Power at STC (Pmax) | 310W | 305W | 300W |
| Optimum Operating Voltage (Vmp) | 33.4 V | 33.0 V | 32.6 V |
| Optimum Operating Current (Imp) | 9.29 A | 9.25 A | 9.21 A |
| Open Circuit Voltage (Voc) | 40.2 V | 40.1 V | 39.9 V |
| Short Circuit Current (Isc) | 9.77 A | 9.71 A | 9.65 A |
| Module Efficiency | 18.9% | 18.6% | 18.3% |
| Operating Module Temperature | -40 °C to +85 °C | | |
| Maximum System Voltage | 1000 V DC (IEC) | | |
| Maximum Series Fuse Rating | 20 A | | |
| Power Tolerance | 0/+5 W | | |

STC: Irradiance 1000 W/m², module temperature 25 °C, AM=1.5;

STC, Standard Test Conditions, 1000 W/m², T_{mod} 25°C, AM 1.5.

Caratteristiche elettriche di un modulo fotovoltaico

potenza operativa

| NOCT | STP310S-20/ Wfw | STP305S-20/ Wfw | STP300S-20/ Wfw |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Maximum Power at NOCT (Pmax) | 228.7 W | 225.3 W | 221.7 W |
| Optimum Operating Voltage (Vmp) | 30.6 V | 30.4 V | 30.2 V |
| Optimum Operating Current (Imp) | 7.47A | 7.41A | 7.35A |
| Open Circuit Voltage (Voc) | 37.0V | 36.9V | 36.8V |
| Short Circuit Current (Isc) | 7.91 A | 7.86 A | 7.81 A |

Temperature Characteristics

| | |
|---|------------|
| Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) | 45±2°C |
| Temperature Coefficient of Pmax | -0.40 %/°C |
| Temperature Coefficient of Voc | -0.34 %/°C |
| Temperature Coefficient of Isc | 0.060 %/°C |

NOCT, Normal Operatng Cell Temperature, 800 W/m², T_{amb} 20°C, AM 1.5, velocità del vento 1 m/s.

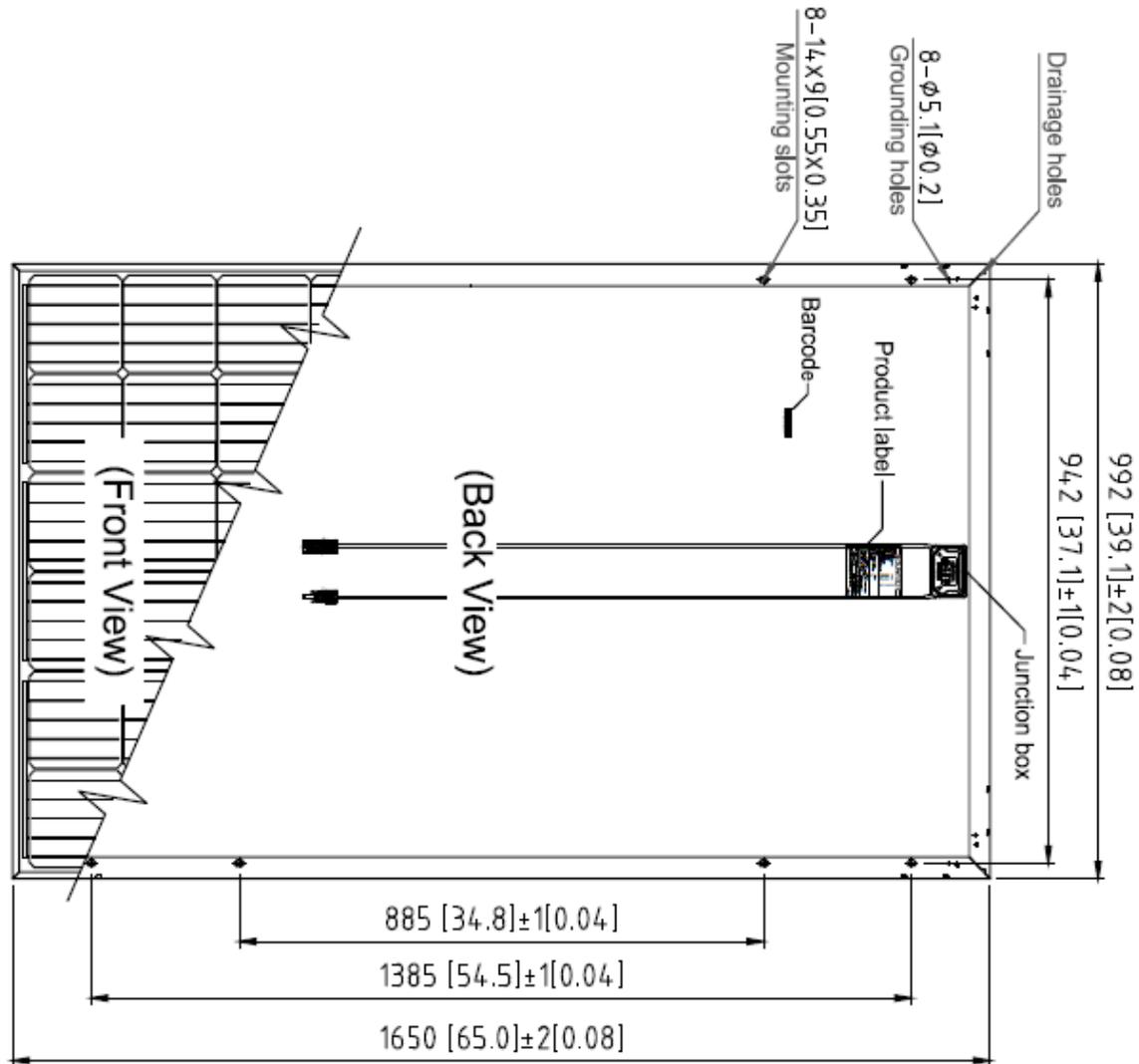
Caratteristiche meccaniche di un modulo fotovoltaico

Mechanical Characteristics

| | |
|---------------|---|
| Solar Cell | Monocrystalline silicon 6 inches |
| No. of Cells | 60 (6 × 10) |
| Dimensions | 1650 × 992 × 35mm (64.96 × 39.1 × 1.4 inches) |
| Weight | 18.3 kgs (40.3 lbs.) |
| Front Glass | 3.2 mm (0.13 inches) tempered glass |
| Frame | Anodized aluminium alloy |
| Junction Box | IP68 rated (3 bypass diodes) |
| Output Cables | 4.0 mm ² (0.006 inches ²), symmetrical lengths (-) 1000mm (39.4 inches) and (+)1000 mm (39.4 inches) |
| Connectors | MC4 compatible |

Dalla junction box (scatola di giunzione) si originano i cavi di connessione (+/-) verso altri moduli/inverter.

Caratteristiche dimensionali di un modulo fotovoltaico



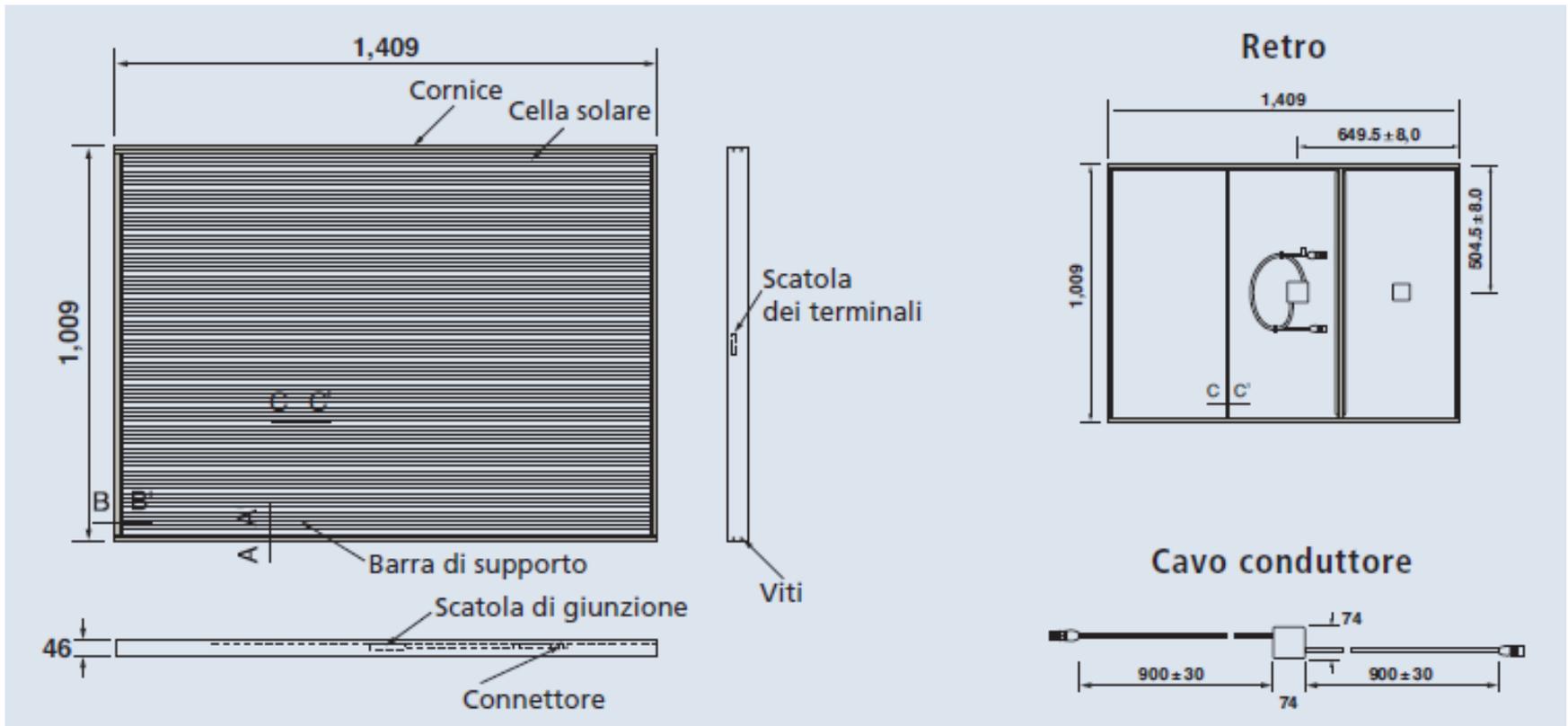
Caratteristiche di un modulo fotovoltaico in Si amorfo



| Specifiche | |
|-------------------|---|
| Cella | Cella tandem fatta di silicio amorfo (α -Si) e microcristallino (η -Si) |
| Connessioni | 180 celle (4x45 parallele) |
| Dimensioni | 1.409 x 1.009 x 46 mm (1,42 m ²) |
| Peso | 19 kg |
| Tipo di terminale | Cavo precablato a connessione rapida |
| Diodi di bypass | 1 |

modulo FV in silicio amorfo 180 celle in serie/parallelo
efficienza tipica 9-10%

Caratteristiche dimensionali di un modulo FV in Si amorfo



Caratteristiche elettriche di un modulo FV in Si amorfo

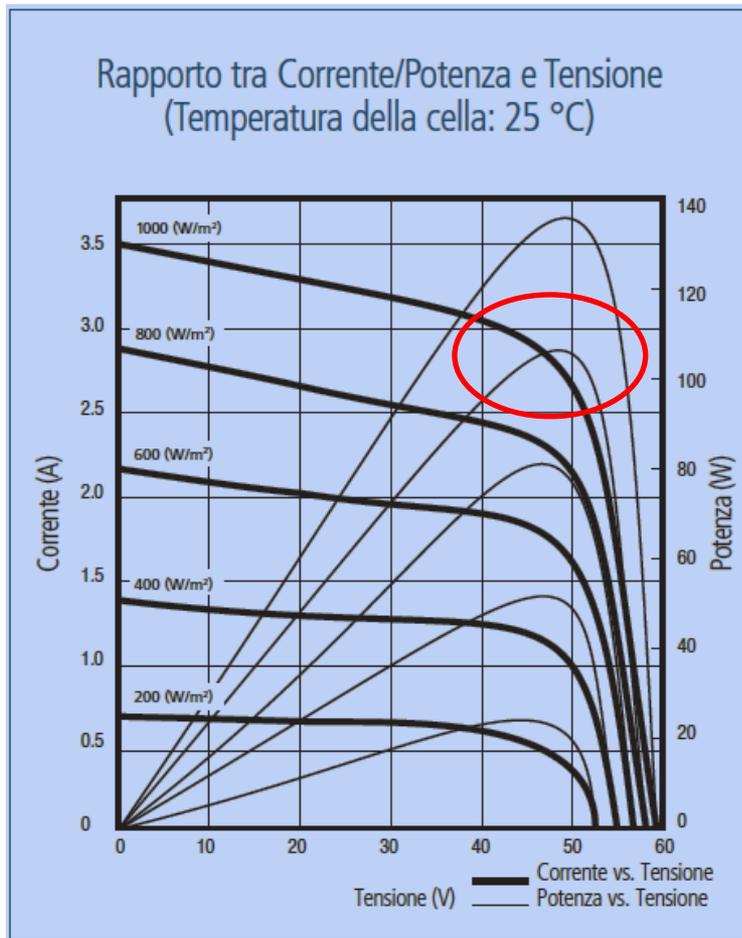
Caratteristiche elettriche

| | | Valore iniziale | | | Valore nominale | | | |
|--|-----------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|------|
| | | NA-F135(G5) | NA-F128 (G5) | NA-F121 (G5) | NA-F135(G5) | NA-F128 (G5) | NA-F121 (G5) | |
| Potenza di picco | | 158,9 Wp | 150,6 Wp | 142,4 Wp | 135 Wp | 128 Wp | 121 Wp | |
| Tensione a circuito aperto | V_{OC} | 62,5 | 60,8 | 60,2 | 61,3 | 59,8 | 59,2 | V |
| Corrente di corto circuito | I_{SC} | 3,49 | 3,54 | 3,43 | 3,41 | 3,45 | 3,34 | A |
| Tensione alla massima potenza | V_{pm} | 49,7 | 48,6 | 48,2 | 47 | 45,4 | 45 | V |
| Corrente alla massima potenza | I_{pm} | 3,2 | 3,10 | 2,96 | 2,88 | 2,82 | 2,69 | A |
| Efficienza del modulo | η_m | | | | 9,5 | 9,0 | 8,5 | % |
| NOCT | | | | | 44 | 44 | 44 | °C |
| Coefficiente di temperatura - tensione a circuito aperto | αV_{OC} | -0,30 | -0,30 | -0,30 | -0,30 | -0,30 | -0,30 | %/°C |
| Coefficiente di temperatura - corrente di corto circuito | αI_{SC} | +0,07 | +0,07 | +0,07 | +0,07 | +0,07 | +0,07 | %/°C |
| Coefficiente di temperatura - potenza | αP_m | -0,24 | -0,24 | -0,24 | -0,24 | -0,24 | -0,24 | %/°C |

Caratteristiche elettriche valide in Condizioni Test Standard (STC): Irraggiamento 1000 W/m² con spettro di AM 1,5 e temperatura delle celle di 25 °C. La potenza è soggetta a una tolleranza di produzione di -5% / +5%. Condizioni NOCT: Irraggiamento 800 W/m², temperatura ambiente 20 °C e velocità del vento 1 m/sec.

I moduli in Si amorfo (in generale a film sottile) hanno tensioni più alte e correnti più basse, coefficiente di temperatura inferiore

Curva caratteristica di un modulo fotovoltaico in Si amorfo



Valori limite

| | | |
|---------------------------------|--------------|------------------|
| Umidità di stoccaggio | fino al 90 | % |
| Temperatura di utilizzo (cella) | da -40 a +90 | °C |
| Temperatura di stoccaggio | da -40 a +90 | °C |
| Tensione massima di sistema | 1000 | V DC |
| Carico massimo | 2.400 | N/m ² |
| Massima corrente inversa | 5 | A |

la curva caratteristica ha un ginocchio meno pronunciato

Caratteristiche di un modulo FV CIS (Cu, I, S) film sottile)

SF150-S
SF155-S
SF160-S
SF165-S
SF170-S
SF175-S

Vantaggi della tecnologia CIS

- ECCELLENTI PRESTAZIONI CON BASSA ILLUMINAZIONE
- ELEVATA RESISTENZA AGLI OMBREGGIAMENTI
- EFFETTO LIGHT SOAKING
- ELEVATA STABILITÀ AD ALTE TEMPERATURE

modulo FV CIS

efficienza tipica $\approx 14\%$

Caratteristiche elettriche di un modulo FV CIS

| Caratteristiche in STC ¹⁾ | | SF150-S | SF155-S | SF160-S | SF165-S | SF170-S | SF175-S | |
|--------------------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| Potenza nominale | P_{max} | 150 W | 155 W | 160 W | 165 W | 170 W | 175 W | |
| Tolleranza positiva | | +5W/0W | | | | | | |
| Efficienza moduli | % | 12,2 % | 12,6 % | 13,0 % | 13,4 % | 13,8 % | 14,2 % | |
| Tensione a circuito aperto | V_{oc} | 108,0 V | 109,0 V | 110,0 V | 110,0 V | 112,0 V | 114,0 V | |
| Corrente di corto circuito | I_{sc} | 2,20 A | |
| Tensione alla potenza nominale | V_{mpp} | 81,5 V | 82,5 V | 84,0 V | 85,5 V | 87,5 V | 89,5 V | |
| Corrente alla potenza nominale | I_{mpp} | 1,85 A | 1,88 A | 1,91 A | 1,93 A | 1,95 A | 1,96 A | |

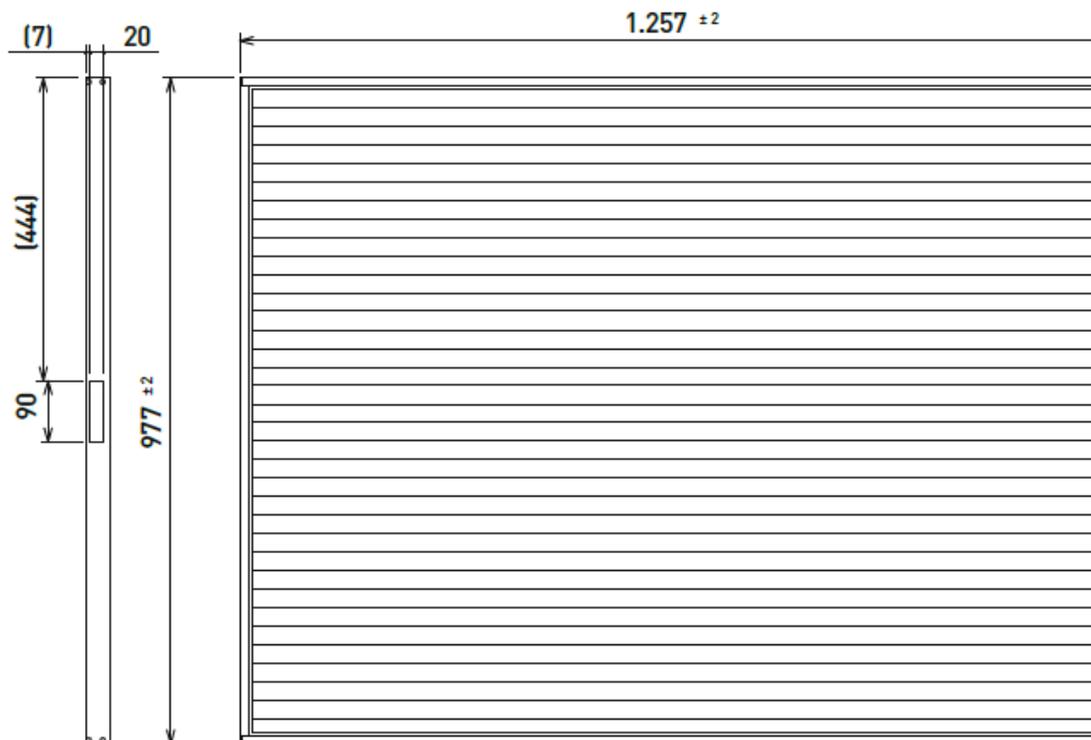
| Caratteristiche in NOCT ²⁾ | | SF150-S | SF155-S | SF160-S | SF165-S | SF170-S | SF175-S |
|---------------------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Potenza in NOCT | P_{max} | 111 W | 115 W | 119 W | 123 W | 126 W | 130 W |
| Tensione a circuito aperto | V_{oc} | 98,3 V | 99,2 V | 100,0 V | 100,0 V | 102,0 V | 104,0 V |
| Corrente di corto circuito | I_{sc} | 1,76 A |
| Tensione alla potenza nominale | V_{mpp} | 76,4 V | 77,4 V | 78,8 V | 80,2 V | 82,1 V | 83,9 V |
| Corrente alla potenza nominale | I_{mpp} | 1,47 A | 1,49 A | 1,51 A | 1,53 A | 1,55 A | 1,55 A |

I moduli CIS hanno tensioni ancora più elevate e correnti più basse.

Caratteristiche di un modulo FV CIS

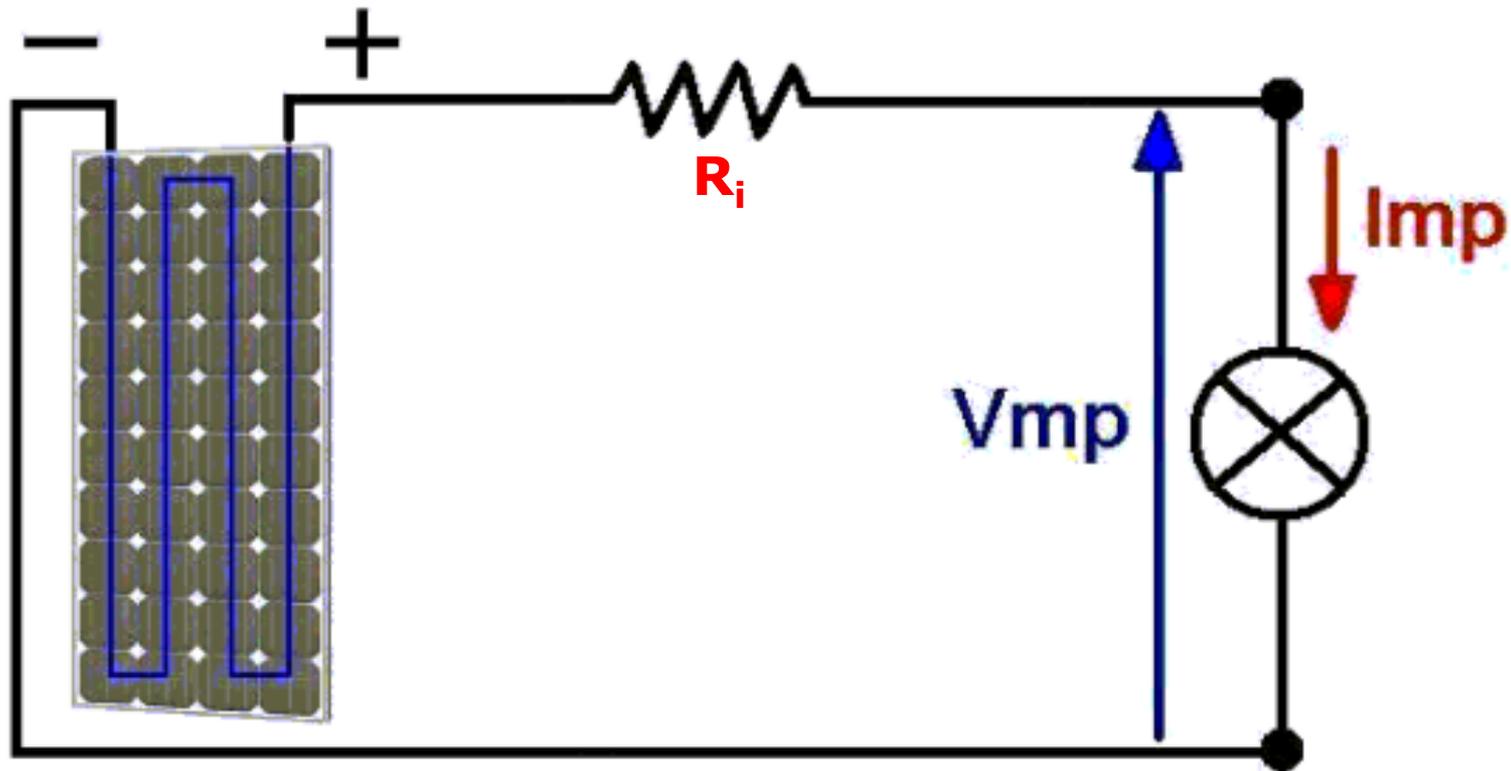
Caratteristiche in funzione della Temperatura

| | | |
|---|----------|-----------|
| NOCT | | 47 °C |
| Coefficiente di temperatura di I _{sc} | α | +0,01 %/K |
| Coefficiente di temperatura di V _{oc} | β | -0,30 %/K |
| Coefficiente di temperatura di P _{max} | δ | -0,31 %/K |



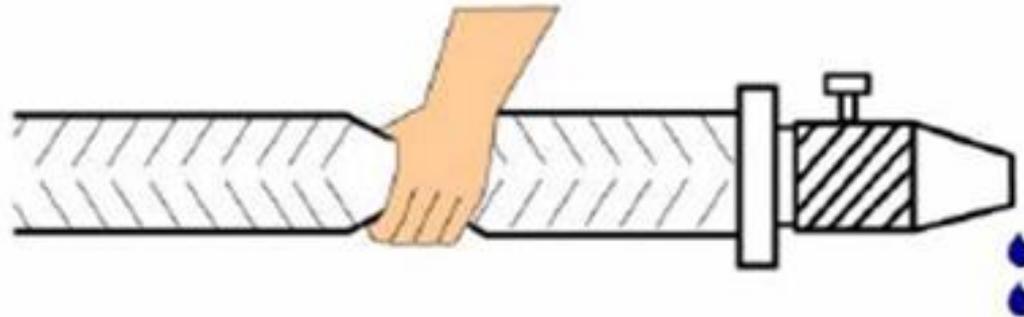
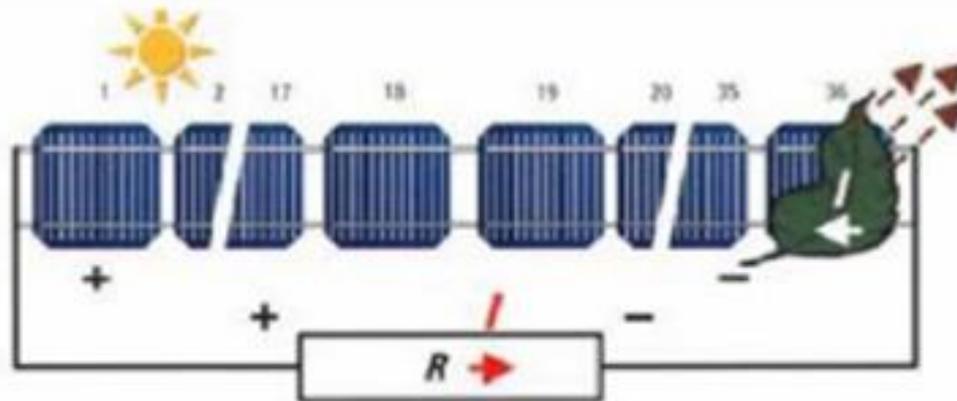
Circuito equivalente di un modulo fotovoltaico

- corrente e tensione al punto di massima potenza V_{mp} , I_{mp}



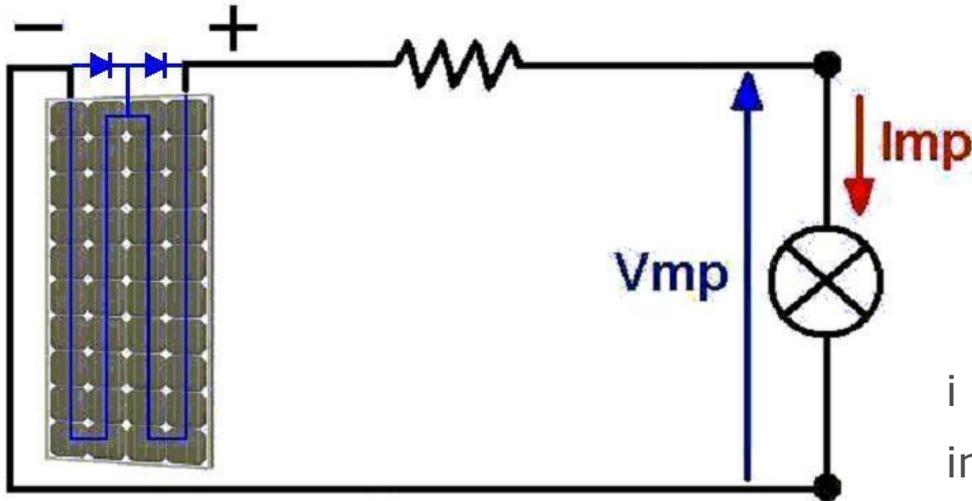
Le celle FV sono in serie.

Circuito equivalente di un modulo fotovoltaico

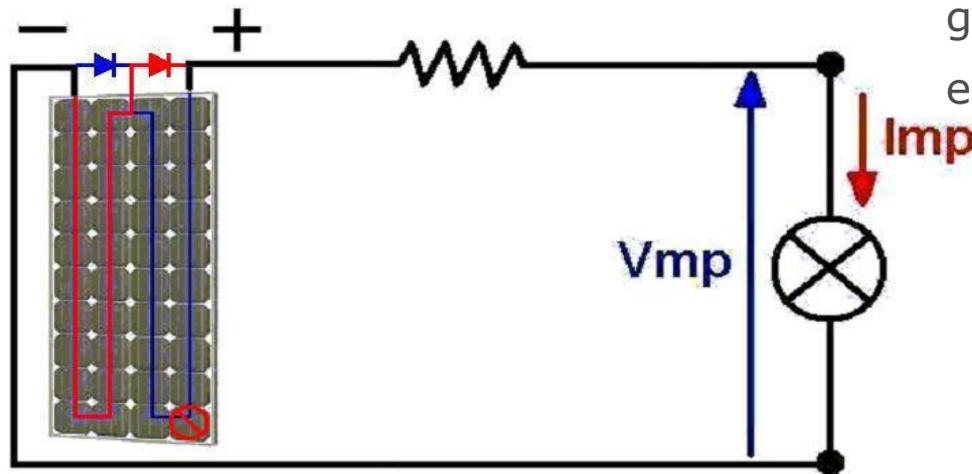


Se una cella è meno efficiente, ombreggiata o guasta limita il funzionamento di tutto il modulo (rischio di **hot spot**).

Circuito equivalente di un modulo fotovoltaico



i **diodi di bypass**, solitamente inseriti nella scatola di giunzione, limitano il problema della cella guasta, ombreggiata o meno efficiente, ma la tensione scende.



Un inverter fotovoltaico è un dispositivo elettronico che converte la DC in uscita dall'impianto FV in CA.



- sempre presente in impianto grid connected;
- dotato di MPPT (Maximum Power Point Tracker);
- tipologia di stringa o centrale;
- potenza nominale $100 \text{ W} < P_n < 1000 \text{ kW}$;
- efficienza di conversione $0,85 < \eta < 0,99$;
- onda sinusoidale pura o modificata;
- monofase o trifase;
- per uso all'interno o all'esterno.



Inverter per connessione in rete

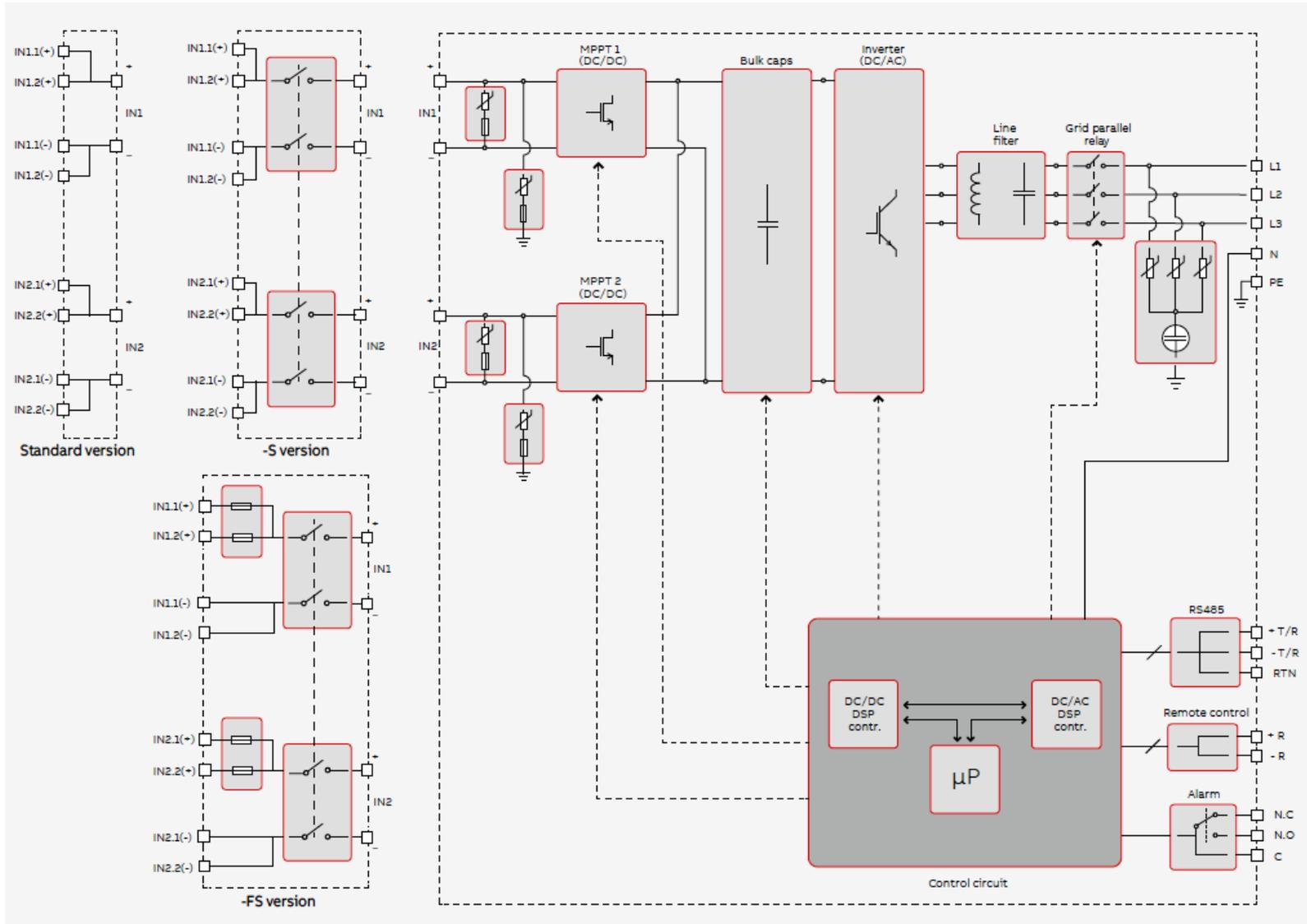


- onda sinusoidale pura;
- monofase (240V), trifase (400V)
- inseguimento continuo parametri di rete (V e f);
- con dispositivo di interfaccia;
- multi MPPT;
- tipologia di "stringa" ($P_n < 150$ kW) indoor/outdoor;
- tipologia "centrale" ($150 < P_n < 1000$ kW) - indoor;
- efficienza di conversione $0,94 < \eta < 0,99$;
- con o senza trasformatore di isolamento;
- gestione storage (accumulo) e carichi utente.



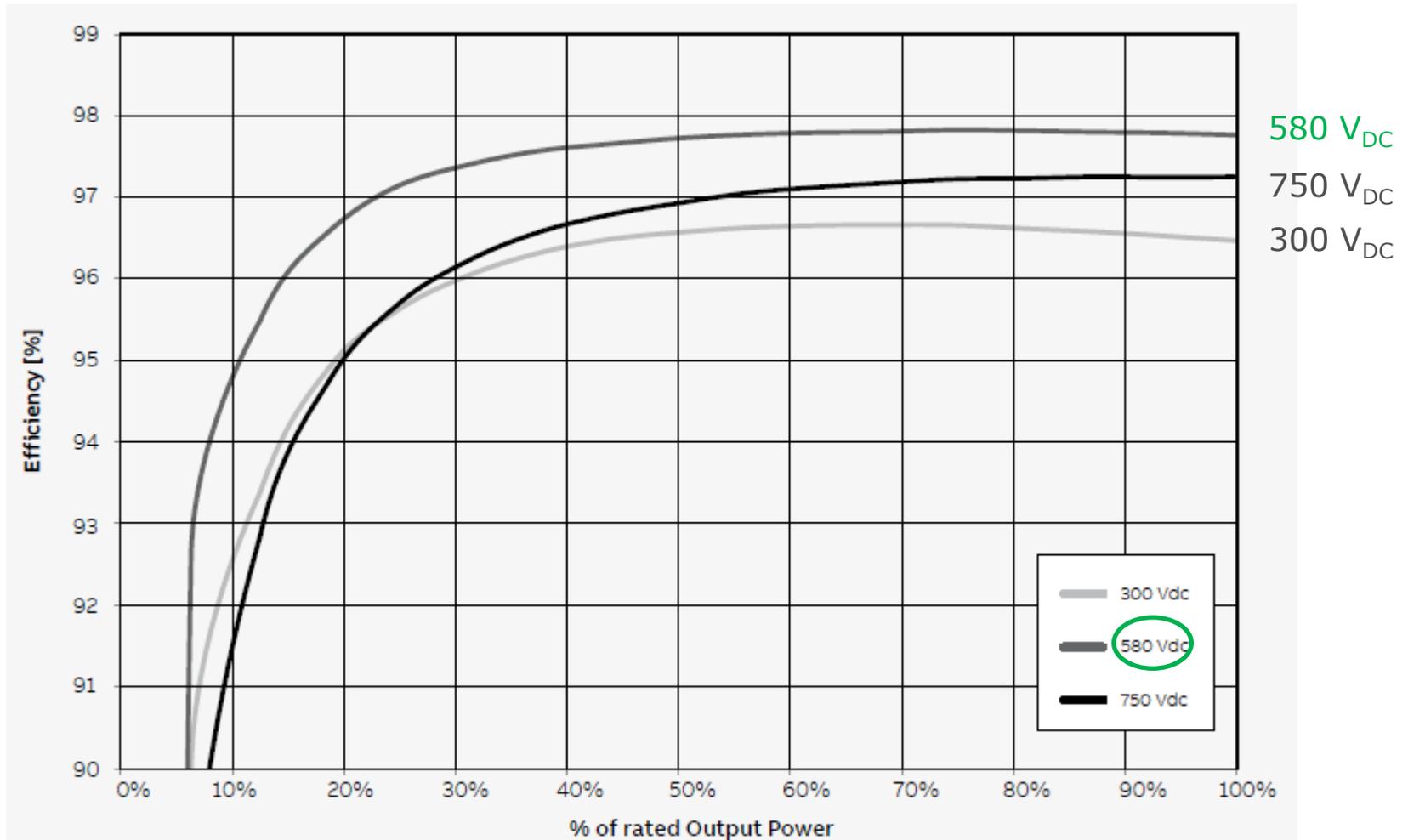
Schema a blocchi di inverter per connessione in rete

lato impianto fotovoltaico (DC)



lato rete (AC)

Curve di efficienza di inverter per connessione in rete



l'efficienza di conversione varia con potenza e tensione in ingresso (DC)

Caratteristiche elettriche (IN, DC)

| Modello | 10.0 | 12.5 |
|---|---|---|
| Ingresso | | |
| Massima tensione assoluta DC in ingresso ($V_{max,abs}$) | 900 V | |
| Tensione di attivazione DC in ingresso (V_{start}) | 360 V (adj. 250...500 V) | |
| Intervallo operativo di tensione DC in ingresso ($V_{dcmin}...V_{dcmax}$) | 0.7 x V_{start} ...850 V (min 200 V) | |
| Tensione nominale DC in ingresso (V_{dcr}) | 580 V | |
| Potenza nominale DC di ingresso (P_{dcr}) | 10300 W | 12800 W |
| Numero di MPPT indipendenti | 2 | |
| Potenza massima DC di ingresso per ogni MPPT ($P_{MPPTmax}$) | 6500 W | 8000 W |
| Intervallo di tensione DC con configurazione di MPPT in parallelo a P_{dcr} | 300...750 V | 360...750 V |
| Limitazione di potenza DC con configurazione di MPPT in parallelo | Derating da max a zero [$750 V \leq V_{MPPT} \leq 850 V$] | |
| Limitazione di potenza DC per ogni MPPT con configurazione di MPPT indipendenti a P_{dcr} , esempio di massimo sbilanciamento | 6500 W [$380 V \leq V_{MPPT} \leq 750 V$] altro canale: $P_{dcr}-6500 W$ [$225 V \leq V_{MPPT} \leq 750 V$] | 8000 W [$445 V \leq V_{MPPT} \leq 750 V$] altro canale: $P_{dcr}-8000 W$ [$270 V \leq V_{MPPT} \leq 750 V$] |
| Massima corrente DC in ingresso (I_{dcrmax}) / per ogni MPPT ($I_{MPPTmax}$) | 34.0 A / 17.0 A | 36.0 A / 18.0 A |
| Massima corrente di cortocircuito di ingresso per ogni MPPT | 22.0 A | |
| Numero di coppie di collegamento DC in ingresso per ogni MPPT | 2 | |
| Tipo di connessione DC | Connettore PV ad innesto rapido ³⁾ | |
| Protezioni di ingresso | | |
| Protezione da inversione di polarità | Protezione per il solo inverter, da sorgente limitata in corrente | |
| Protezione da sovratensione di ingresso per ogni MPPT-varistore | Sì | |
| Controllo di isolamento | In accordo alla normativa locale | |
| Caratteristiche sezionatore DC per ogni MPPT (versione con sezionatore DC) | 25 A / 1000 V | |
| Caratteristiche fusibili (ove presenti) | 15 A / 1000 V | |

Caratteristiche elettriche (OUT, AC)

| Uscita | | Trifase 3 fili + PE o 4 fili + PE | |
|--|---|--|--|
| Tipo di connessione AC alla rete | | Trifase 3 fili + PE o 4 fili + PE | |
| Potenza nominale AC di uscita ($P_{acr} @ \cos\phi=1$) | | 10000 W | 12500 W |
| Potenza massima AC di uscita ($P_{acmax} @ \cos\phi=1$) | | 11000 W ⁴⁾ | 13800 W ⁵⁾ |
| Potenza apparente massima (S_{max}) | | 11500 VA | 13800 VA |
| Tensione nominale AC di uscita ($V_{ac,r}$) | | 400 V | |
| Intervallo di tensione AC di uscita | → | 320...480 V ¹⁾ | |
| Massima corrente AC di uscita ($I_{ac,max}$) | | 16.6 A | 20.0 A |
| Contributo alla corrente di corto circuito | | 19.0 A | 22.0 A |
| Frequenza nominale di uscita (f_r) | | 50 Hz / 60 Hz | |
| Intervallo di frequenza di uscita ($f_{min}...f_{max}$) | → | 47...53 Hz / 57...63 Hz ²⁾ | |
| Fattore di potenza nominale e intervallo di aggiustabilità | | > 0.995, adj. \pm 0.9 con $P_{acr}=10.0$ kW, \pm 0.8 con max 11.5 kVA | > 0.995, adj. \pm 0.9 con $P_{acr}=12.5$ kW, \pm 0.8 con max 13.8 kVA |
| Distorsione armonica totale di corrente | | < 2% | |
| Tipo di connessioni AC | | Morsettiera a vite, pressa cavo M40 | |
| Protezioni di uscita | | In accordo alla normativa locale | |
| Protezione anti-islanding | | In accordo alla normativa locale | |
| Massima protezione esterna da sovracorrente AC | | 25.0 A | |
| Protezione da sovratensione di uscita - varistore | | 3, più gas arrester | |
| Prestazioni operative | | | |
| Efficienza massima (η_{max}) | | 97.8% | |
| Efficienza pesata (EURO/CEC) | → | 97.1% / - | 97.2% / - |
| Soglia di alimentazione della potenza | | 30.0 W | |
| Consumo notturno | | < 1.0 W | |

Caratteristiche tecniche e dati ambientali

| Modello | 10.0 | 12.5 |
|--|---|---|
| Ambientali | | |
| Temperatura ambiente | → -25...+60°C (-13...+140°F) con derating sopra 55°C (131°F) | -25...+60°C (-13...+140°F) con derating sopra 50°C (122°F) |
| Umidità relativa | → | 0...100% con condensa |
| Pressione di emissione acustica, tipica | | 50 dBA @ 1 m |
| Massima altitudine operativa senza derating | | 2000 m / 6560 ft |
| Fisici | | |
| Grado di protezione ambientale | → | IP65 |
| Sistema di raffreddamento | → | Naturale |
| Dimensioni (H x W x D) | | 716 mm x 645 mm x 224 mm / 28.2" x 25.4" x 8.8" |
| Peso | | < 41.0 kg / 90.4 lbs |
| Sistema di montaggio | | Staffe da parete |
| Sicurezza | | |
| Livello di isolamento | → | Senza trasformatore |
| Certificazioni | | CE (solo 50 Hz), RCM |
| Norme EMC e di sicurezza | | EN 50178, IEC/EN 62109-1, IEC/EN 62109-2, AS/NZS 3100, AS/NZS 60950.1, EN 61000-6-2, EN 61000-6-3, EN 61000-3-11, EN 61000-3-12 |
| Norme di connessione alla rete (verificare la disponibilità tramite il canale di vendita) | | CEI 0-21, CEI 0-16, DIN V VDE V 0126-1-1, VDE-AR-N 4105, G59/3, C10/11, EN 50438 (non per tutte le varianti nazionali), RD 1699, RD 413, RD 661, P.O. 12.3, AS/NZS 4777, IEC 61727, IEC 62116, BDEW, MEA, NRS 097-2-1, VFR 2014 |
| Modelli disponibili | | |
| Standard | 10.0-TL-OUTD | 12.5-TL-OUTD |
| Con sezionatore DC | 10.0-TL-OUTD-S | 12.5-TL-OUTD-S |
| Con sezionatore DC e fusibile | 10.0-TL-OUTD-FS | 12.5-TL-OUTD-FS |

Inverter per impianti ad isola



- onda sinusoidale pura/modificata;
- monofase (240V);
- no inseguimento continuo parametri di rete;
- no dispositivo di interfaccia;
- MPPT singolo quando integrata funzione ricarica;
- tipologia di "stringa" ($P_n < 6$ kW) indoor/outdoor;
- efficienza di conversione $0,85 < \eta < 0,92$;
- senza trasformatore di isolamento;
- gestione storage (accumulo) e carichi utente.



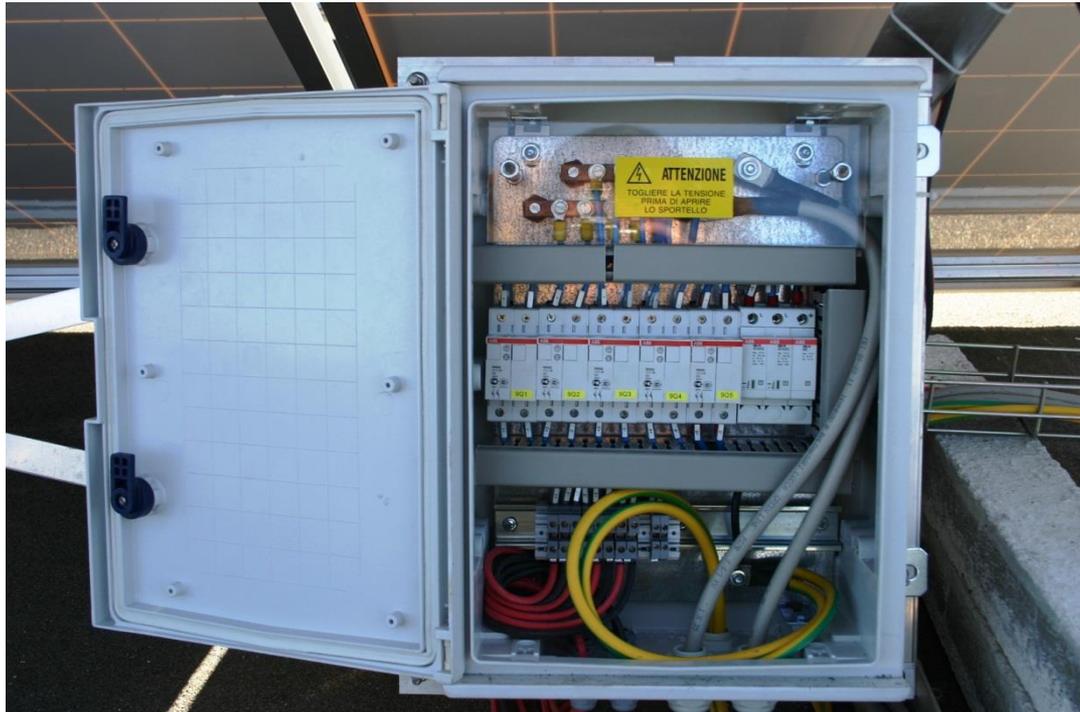
Regolatori di carica per impianti ad isola



- gestione controllata carica/scarica batteria/e;
- SoC, (State of Charge);
- LVD (Low Voltage Disconnect)
- MPPT singolo quando presente;
- tipologia di "stringa" ($P_n < 20$ kW) indoor/outdoor;
- efficienza $0,85 < \eta < 0,95$;
- gestione carichi utente.

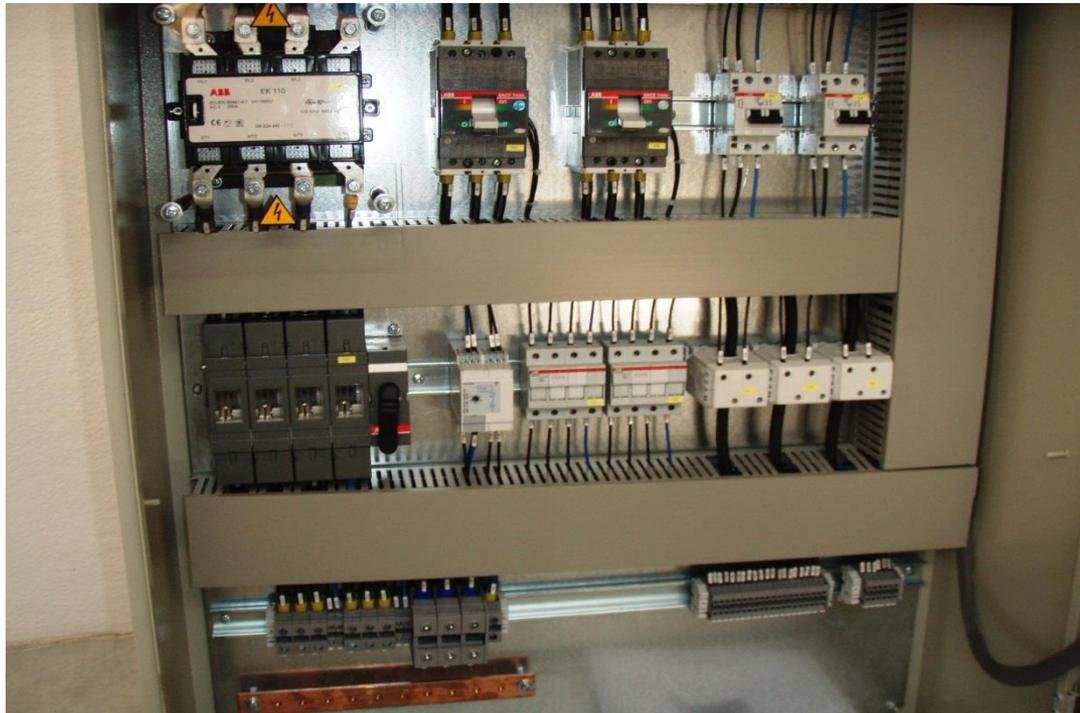


Quadri elettrici in DC



I quadri elettrici in DC (lato FV), di “campo” o di “stringa” attuano, ove necessario, il parallelo elettrico di più stringhe e sezionano la potenza DC.

Quadri elettrici in AC



I quadri elettrici in AC attuano il parallelo tra le uscite degli inverter e la rete elettrica.

Le strutture di sostegno/ancoraggio dei moduli fotovoltaici si suddividono in fisse e mobili (tracking).

fisse

- conferiscono ai moduli FV tilt e azimuth di progetto;
- sono realizzate in acciaio zincato, alluminio anodizzato (ambienti marini), calcestruzzo preformato, polimeri, etc.;
- possono essere customizzate per applicazioni specifiche (integrazione architettonica), pergole, tettoie, serre, etc.

mobili

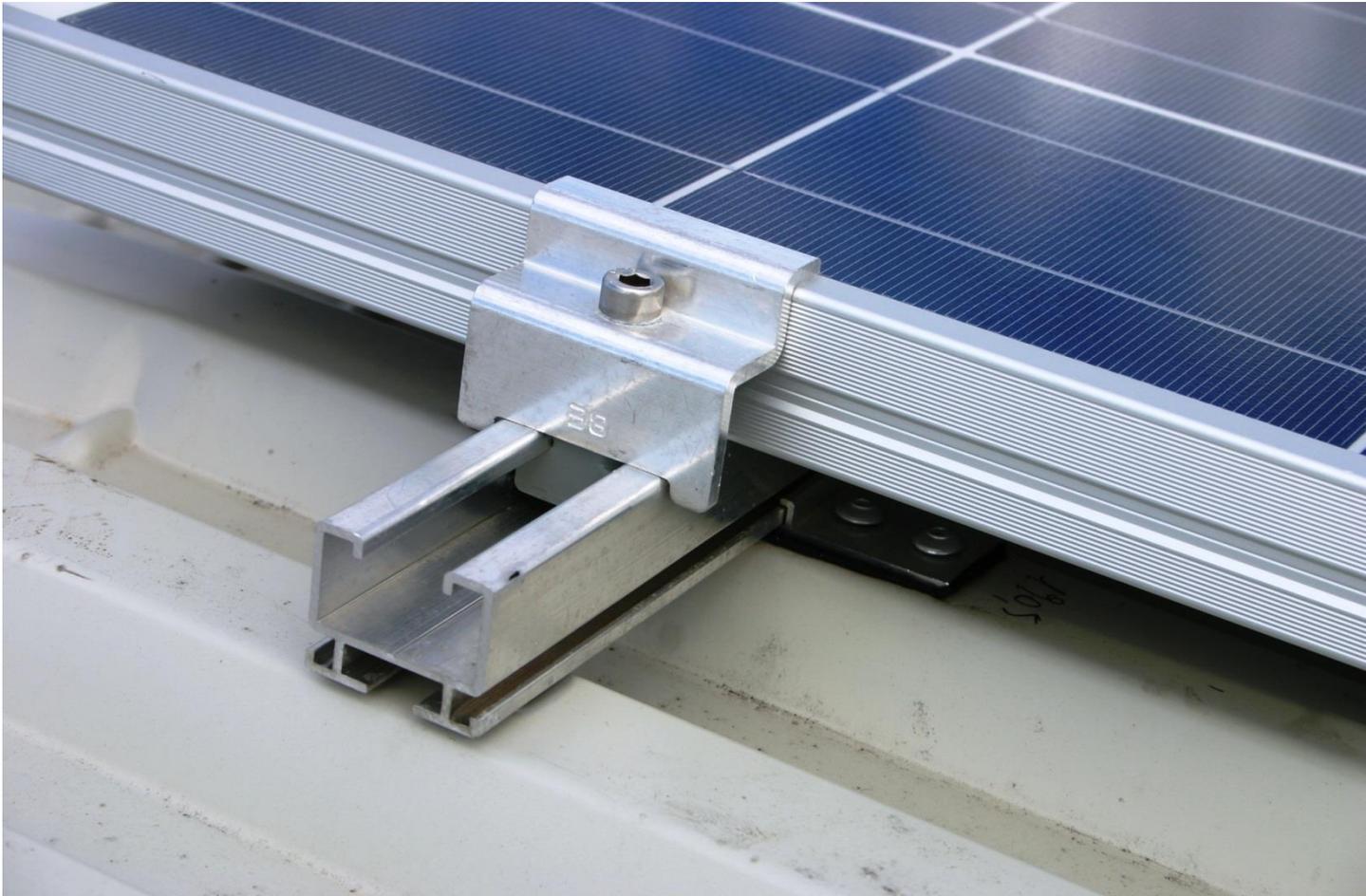
- conferiscono ai moduli FV in continuo tilt e azimuth di progetto;
- sono realizzate quasi sempre in acciaio zincato.

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti al suolo

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti su tetti a falda

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti su tetti a cupolini

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti su tetti piani

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti su tetti piani (cls preformato)

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti su tettoie

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti su pergole

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti su serre

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti su tetto con tracker monoassiale

strutture di sostegno/ancoraggio



impianti al suolo con tracker biassiale

Il corretto dimensionamento di un impianto fotovoltaico connesso in rete prevede la conoscenza dei seguenti dati:

- località di installazione;
- consumo annuale d'utenza E_c (kWh);
- superficie a disposizione;
- identificazione di eventuali ombreggiamenti.

Il risultato del dimensionamento è la potenza nominale di impianto e la producibilità energetica annuale.

- layout moduli (tilt, azimuth e disposizione sulla superficie disponibile);
- Potenza nominale P_n in kWp (numero moduli N_m);
- Energia annua producibile E_p in kWh.

Ogni località ha una specifica producibilità energetica annuale, funzione delle coordinate geografiche, tecnologia di modulo, tilt ed azimuth. I valori di E_p sono tabellati (U NI 10349) o accessibili in vari software o su database pubblici.

Il JRC mette a disposizione l'applicazione PVGIS all'url <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> con dati aggiornati ed affidabili per il suo calcolo.

Ad esempio, a **Lecce** ($40^{\circ}21'28''N$, $18^{\circ}10'22''E$ o $40,357N$, $18,172E$) , **1 kWp (Si)** installato in condizioni ideali (tilt 34° e azimuth -1°) ha producibilità annuale di **1.450 kWh/kWp**.

Output PVGIS per Lecce in condizioni ideali

| Fixed system: inclination = 34 deg. tilt orientation = -1 deg. azimuth | | | | |
|---|------|----------------|------|------|
| Month | Ed | Em | Hd | Hm |
| Jan | 2.58 | 79.9 | 3.26 | 101 |
| Feb | 3.13 | 87.7 | 4.03 | 113 |
| Mar | 4.16 | 129 | 5.52 | 171 |
| Apr | 4.47 | 134 | 6.05 | 182 |
| May | 4.82 | 150 | 6.63 | 206 |
| Jun | 4.95 | 148 | 6.98 | 209 |
| Jul | 5.17 | 160 | 7.36 | 228 |
| Aug | 5.02 | 156 | 7.19 | 223 |
| Sep | 4.32 | 130 | 6.01 | 180 |
| Oct | 3.71 | 115 | 5.01 | 155 |
| Nov | 2.81 | 84.4 | 3.68 | 110 |
| Dec | 2.43 | 75.4 | 3.09 | 95.8 |
| Year | 3.97 | 121 | 5.41 | 165 |
| Total for year | | Ep 1450 | | 1970 |

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Calcolando il rapporto E_c/E_p si ottiene il valore di P_n ideale,
ma...

... non sempre è possibile un dimensionamento così semplice!

esempio

- Lecce;
- E_c 3.300 kWh/anno;
- tetto piano di 20 m² (5x4) orientato a Sud (lato 5m);
- moduli in Si 300 Wp;
- assenza ombreggiamenti;

$$P_n = E_c/E_p = 3.330/1450 = 2,27 \text{ kWp} = 2.227 \text{ Wp}$$

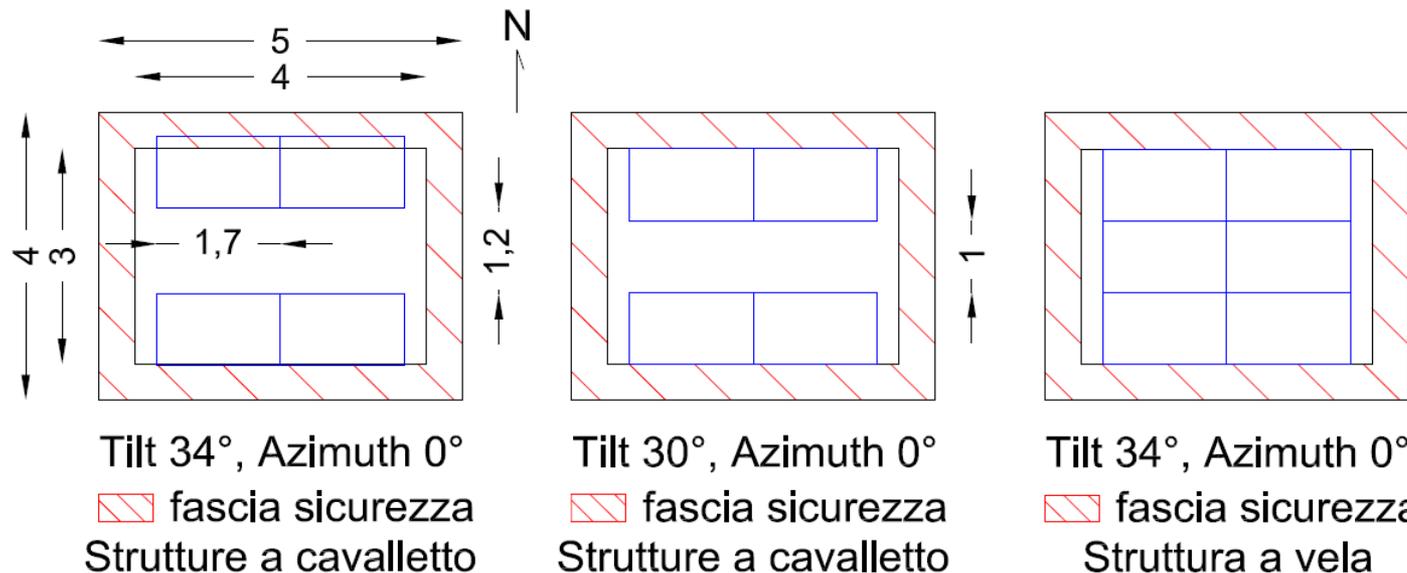
$$N_m = 2.227/300 = 7,42 \text{ si approssima per difetto } \mathbf{N_m = 7};$$

La **P_n** realizzabile è quindi di **2,1 kWp** (7x0,3 kWp) ed **E_p** è **3.045 kWh**; si copre circa il 92% dei consumi.

Occorre verificare l'effettiva possibilità di effettuare una **configurazione elettrica** con l'inverter (compatibilità delle tensioni e correnti di stringa) e verificare il **layout** dei moduli sulla **superficie** a disposizione.

Si ipotizza che la prima verifica sia soddisfatta.

La superficie di ogni modulo è di $\approx 1,7 \text{ m}^2$, quindi 7 moduli occuperanno $\approx \mathbf{12 \text{ m}^2} < \mathbf{20 \text{ m}^2}$ a disposizione.



Se si può realizzare la struttura a vela la **P_n** installabile sarà di **1,8 kWp** e la **E_p** di circa **2.600 kWh/a**, coprendo circa il **78%** dei consumi (**E_c**).

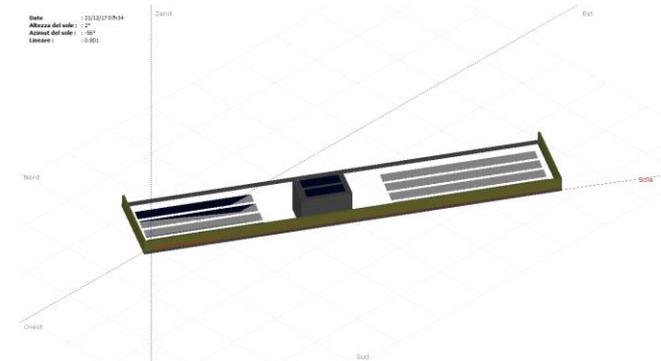
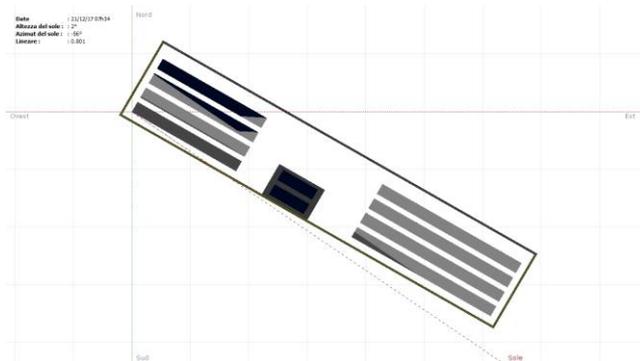
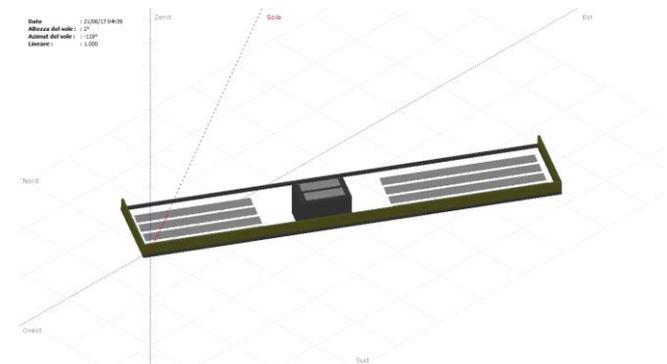
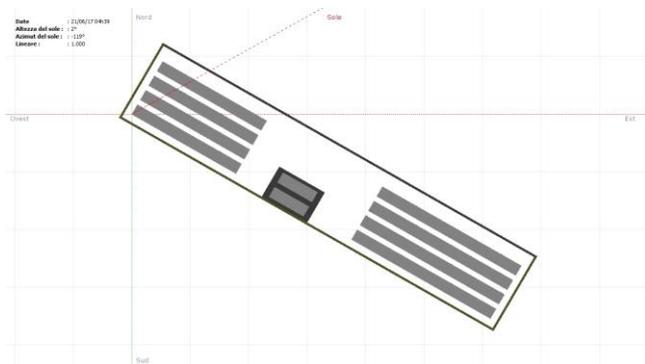
In caso contrario la **P_n** installabile sarà di **1,2 kWp** e la **E_p** (nuovo tilt 30°) di circa **1.740 kWh/a** coprendo circa il **53%** dei consumi (**E_c**).

I casi reali sono sempre più complessi e molto spesso si procede a massimizzare al E_p senza attenersi alle condizioni ideali; si realizzano impianti con **tilt inferiori** e si accettano anche **azimuth di 180°** (N)!

Un'ulteriore complicazione è la presenza di ombreggiamenti, molto frequente in ambito urbano (ringhiere, parapetti, antenne, palazzi adiacenti, vegetazione, etc.) ed industriale.

Lo studio accurato degli ombreggiamenti si effettua con software specifici ricorrendo alla modellazione 3D.

In alcuni casi, quando non è possibile un layout che li eviti si ricorre all'uso di **ottimizzatori di potenza**.



Dimostrazione “live”

<http://solarmanager.geatecno.it/backoffice/index.php>

Un impianto solare termico è un impianto che cattura la radiazione solare e la conserva come energia termica (calore) per un successivo utilizzo.



Gli impianti solari termici si distinguono in:

- impianti ad alta temperatura 350-600°C, tipicamente impiegati per la produzione di energia elettrica (sistemi a concentrazione, termodinamici);



Centrale ricettrice, H₂O



Cilindri parabolici, sali fusi - H₂O

- impianti a media temperatura (120-350°C), tipicamente impiegati per la produzione di calore di processo ed energia elettrica con cicli a fluido organico (ORC);
- impianti a bassa temperatura (<120°C), tipicamente impiegati in ambito civile per la produzione di ACS e/o riscaldamento.

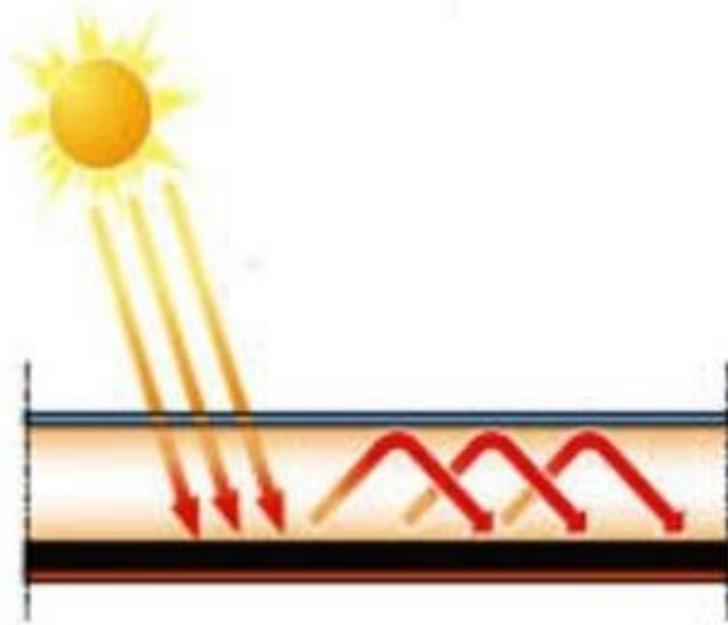


collettore piano



collettore cilindrico evacuato

Il pannello solare o collettore solare funziona secondo il principio dell'effetto serra che si produce attraverso un elemento captante capace di assorbire la maggior quantità di energia solare possibile ed una copertura trasparente (vetro) che contiene il re-irraggiamento.

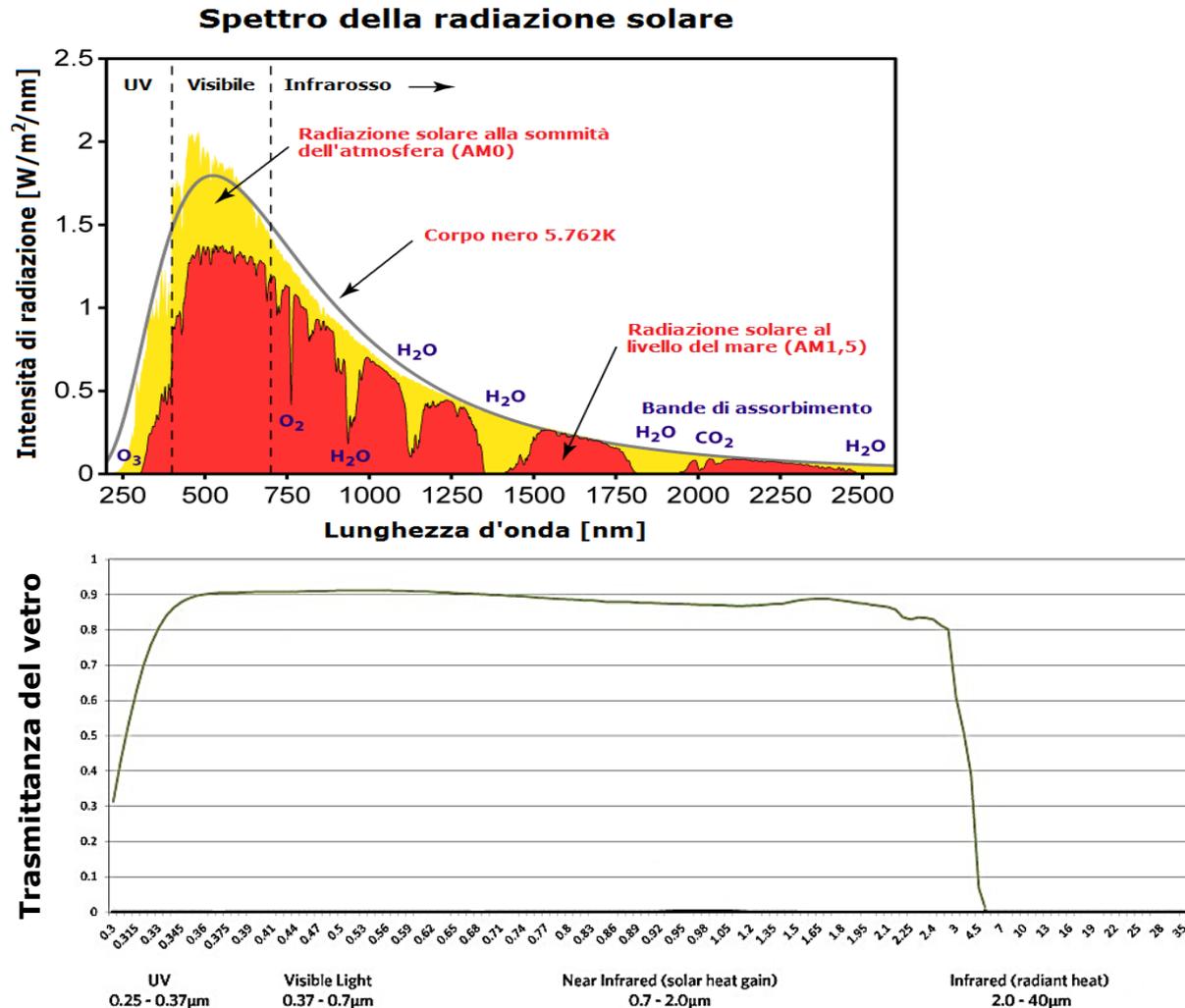


collettore piano

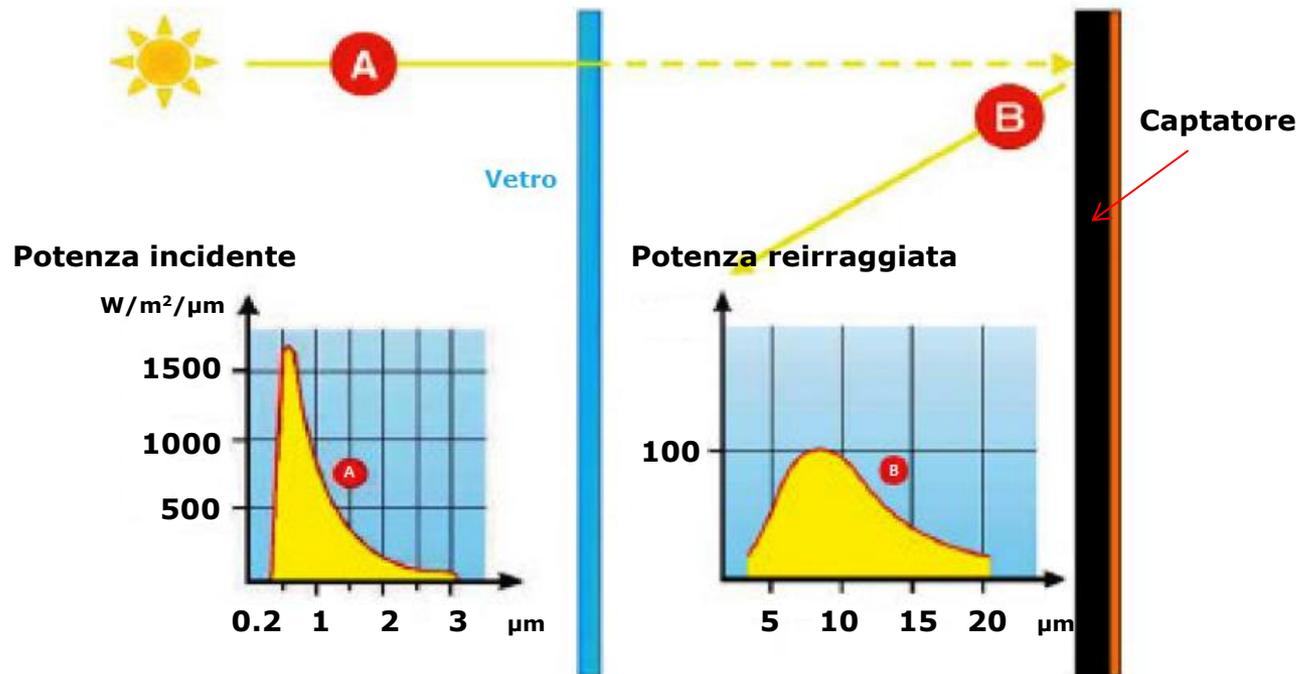


collettore cilindrico sotto vuoto

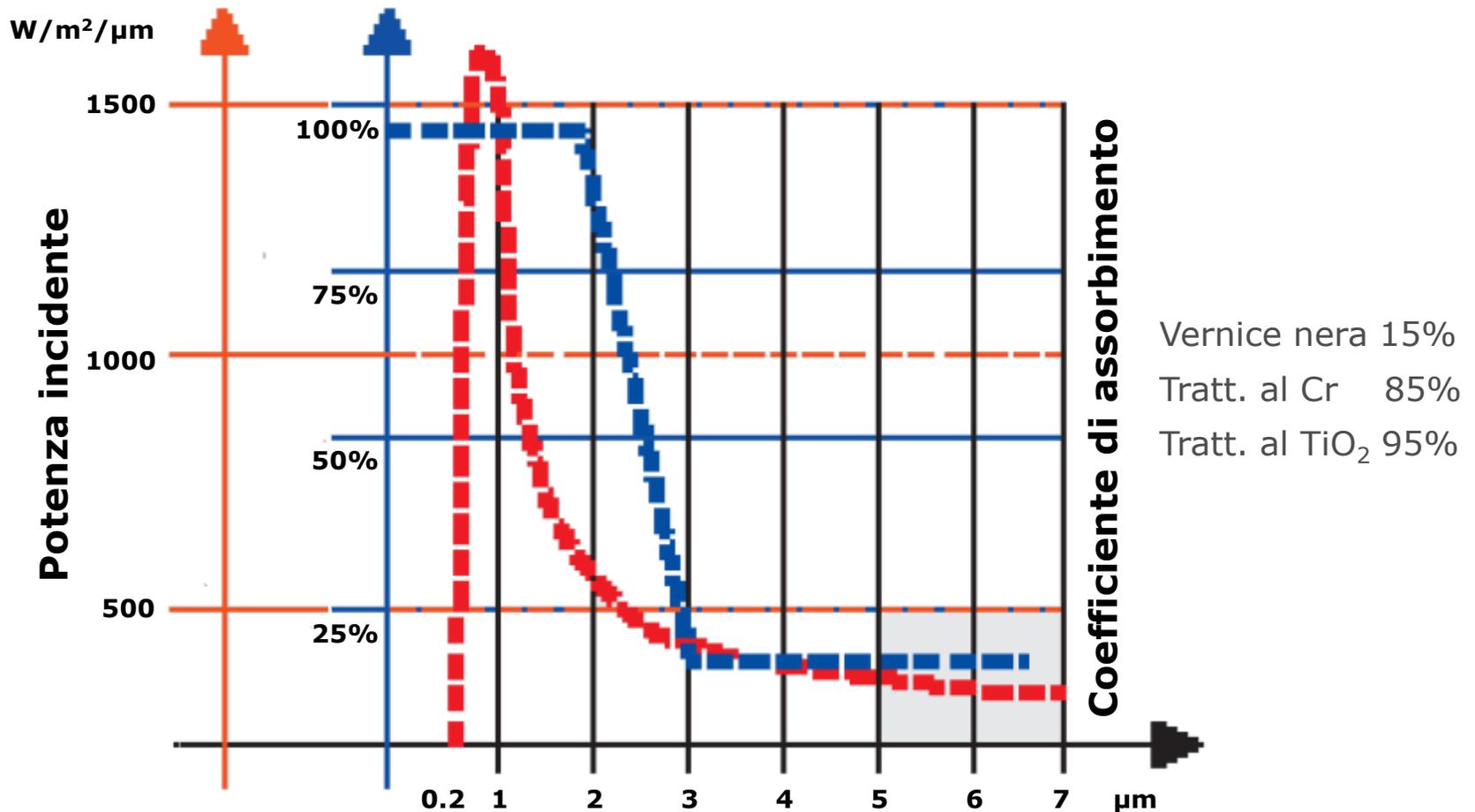
La radiazione solare ha λ compresa tra 0,2 e 3 μm , il vetro ha trasmittanza quasi unitaria nello stesso range.



Il vetro lascia quindi passare la maggior parte della potenza solare verso l'elemento captatore che, scaldandosi, riemette potenza (radiazione infrarossa termica) con λ tra 3 e 20 μm ; il vetro è opaco in tale intervallo e la riflette verso il captatore che si scalda ulteriormente.



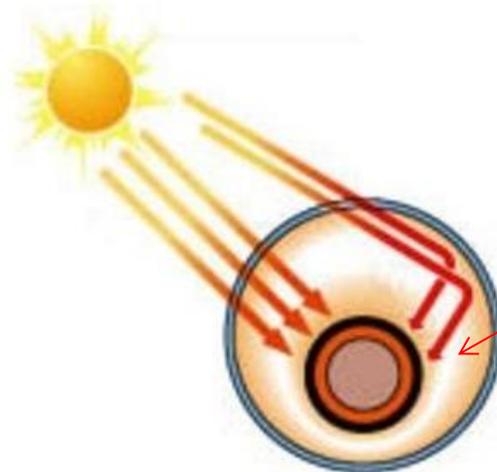
La superficie captante, solitamente in rame o alluminio, è opportunamente trattata con vernici selettive (0,2-3 μm) per aumentarne il coefficiente di assorbimento.



Per limitare le dispersioni verso l'esterno il collettore piano è adeguatamente coibentato (isolante in lana di roccia > 4 cm).



Nel collettore cilindrico evacuato è proprio il vuoto ad avere funzione coibente.



vuoto, assenza di
conduzione e convezione

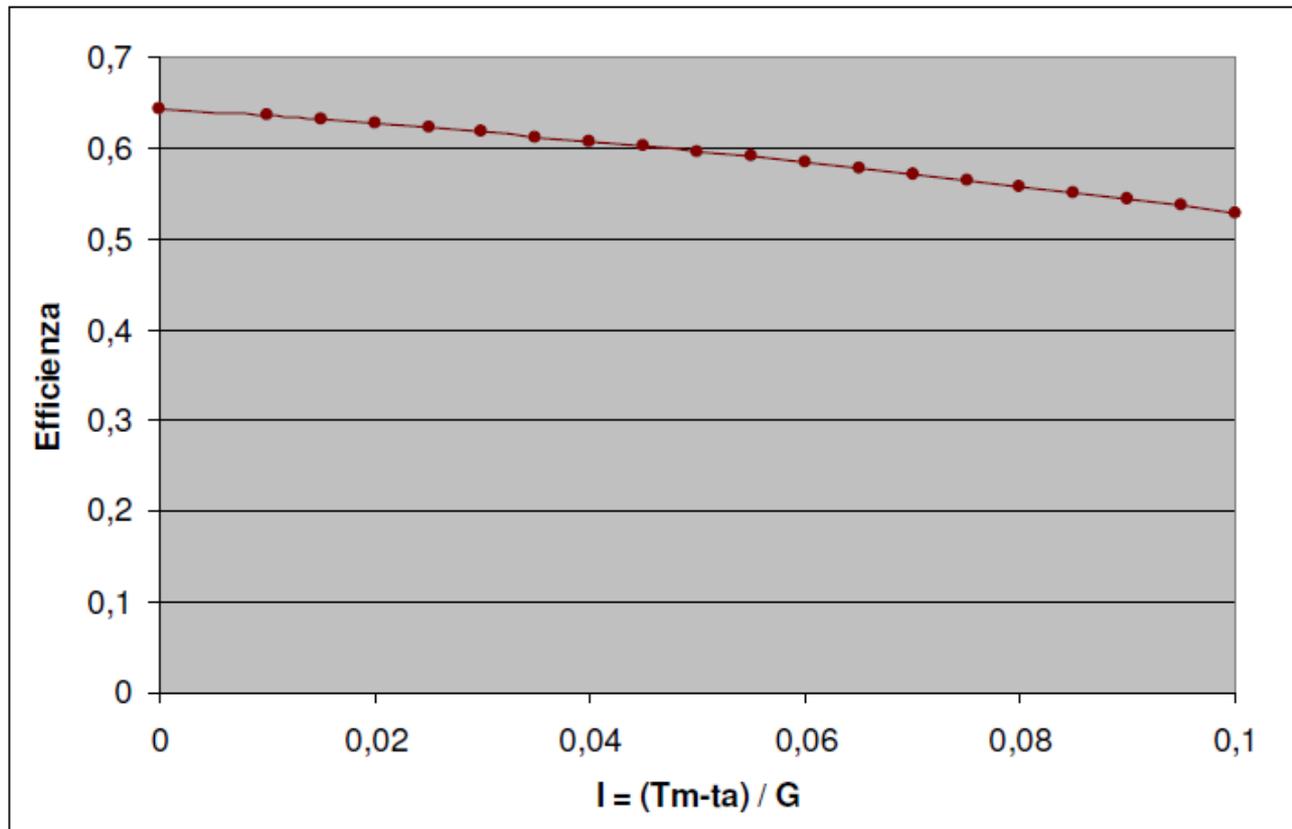
L'**efficienza** di uno specifico collettore solare non è costante ma varia al variare delle condizioni operative, temperatura media del pannello, temperatura ambiente, radiazione incidente.

Può esprimersi con la relazione

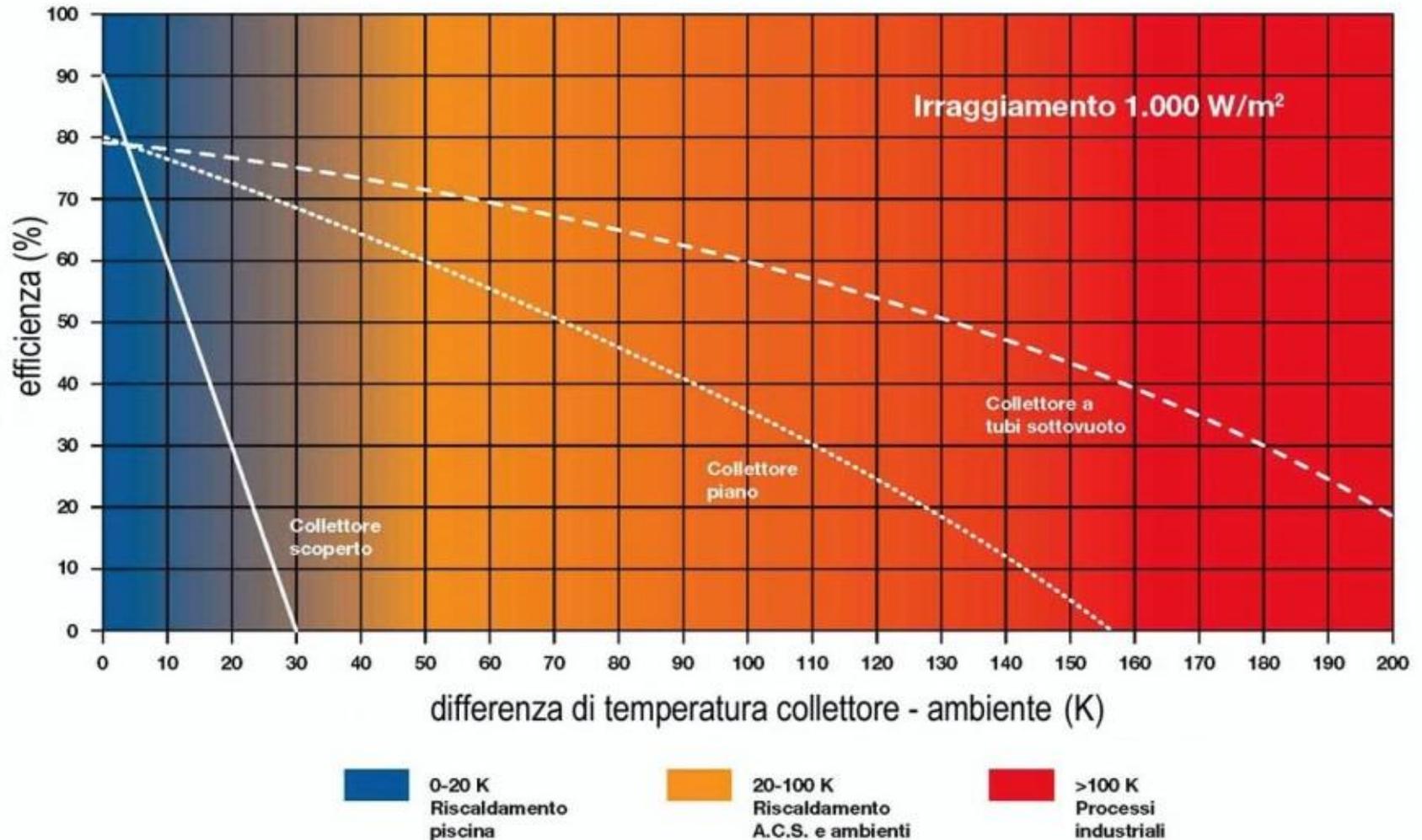
$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{\Delta T}{G} - k_2 \frac{\Delta T^2}{G}$$

dove η_0 , k_1 e k_2 sono costanti caratteristiche del collettore (determinate sperimentalmente e certificate dal costruttore), ΔT è la differenza tra la temperatura media del pannello $(T_i + T_u)/2$ e la temperatura ambiente e G è la radiazione incidente (W/m^2).

A parità di radiazione incidente l'efficienza diminuisce all'aumentare di ΔT , mentre a parità di ΔT aumenta al crescere della radiazione incidente; è massima per ΔT nullo.

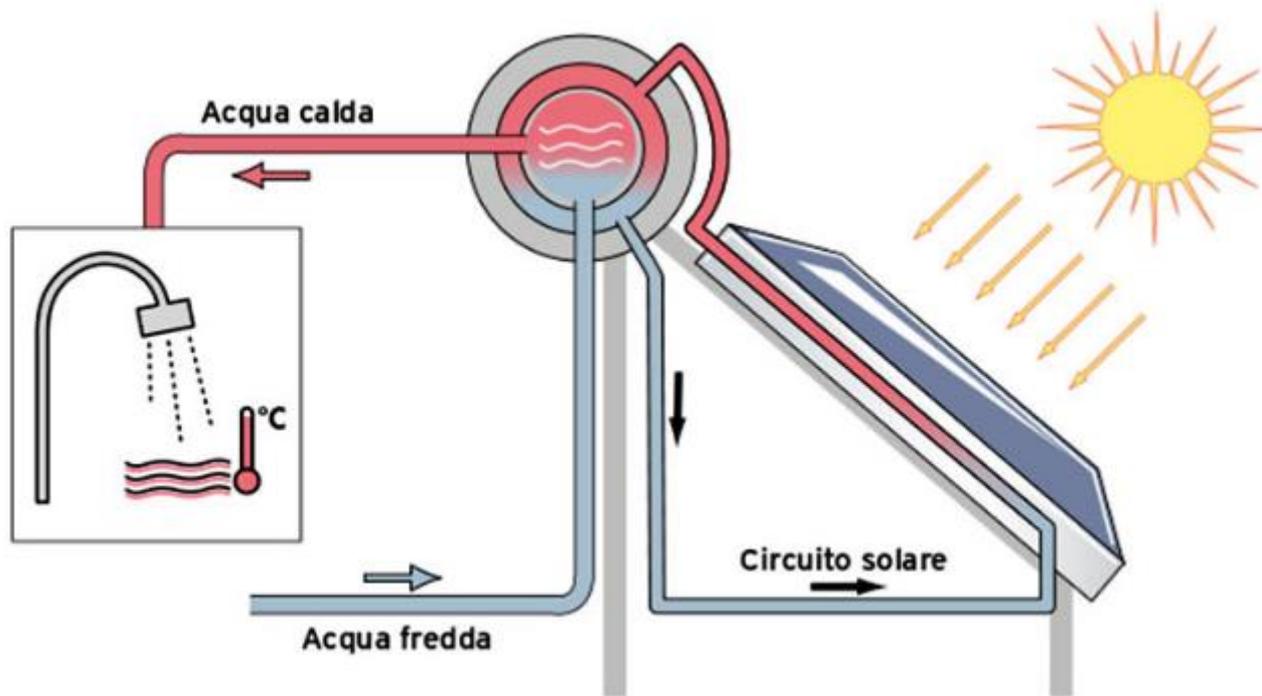


Efficienza a confronto per diverse tipologie di collettori.

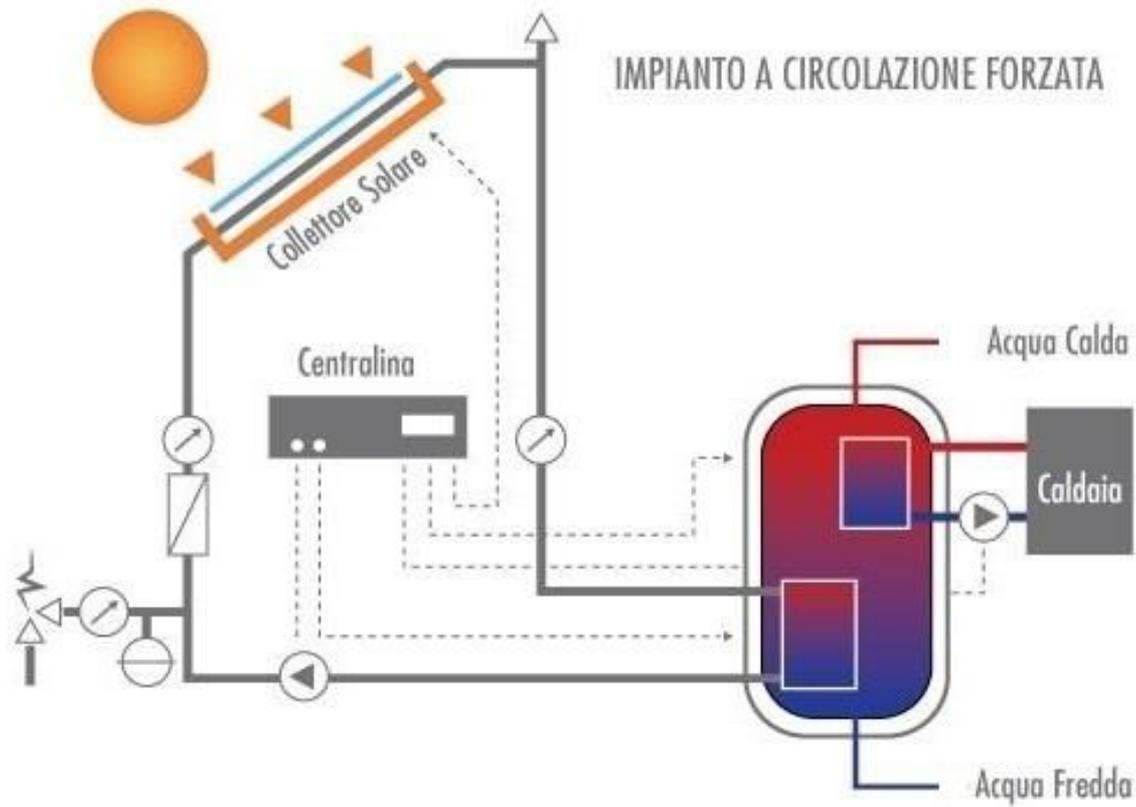


Gli impianti solari termici si suddividono, in aggiunta alla classificazione per temperatura di funzionamento e tipologia costruttiva, in:

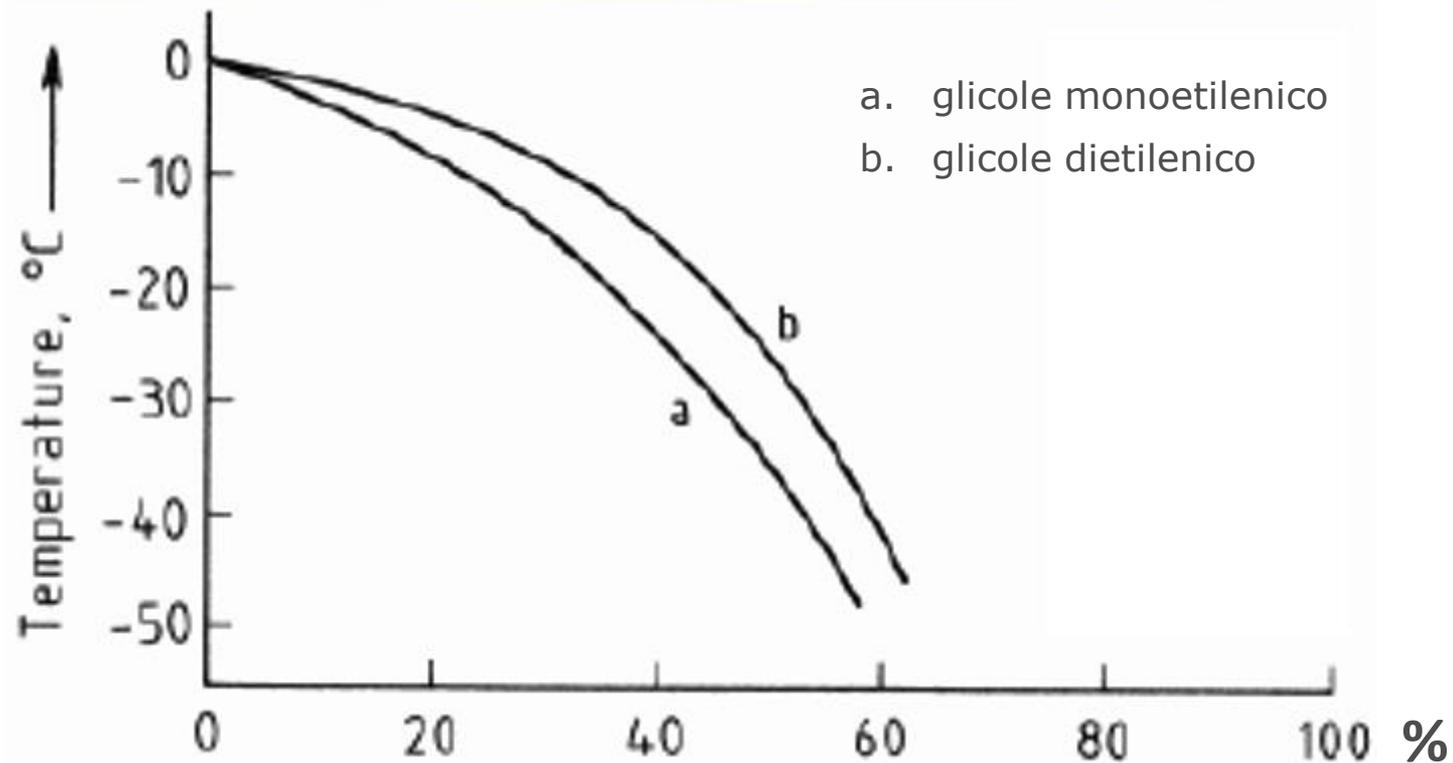
- impianti a circolazione naturale;



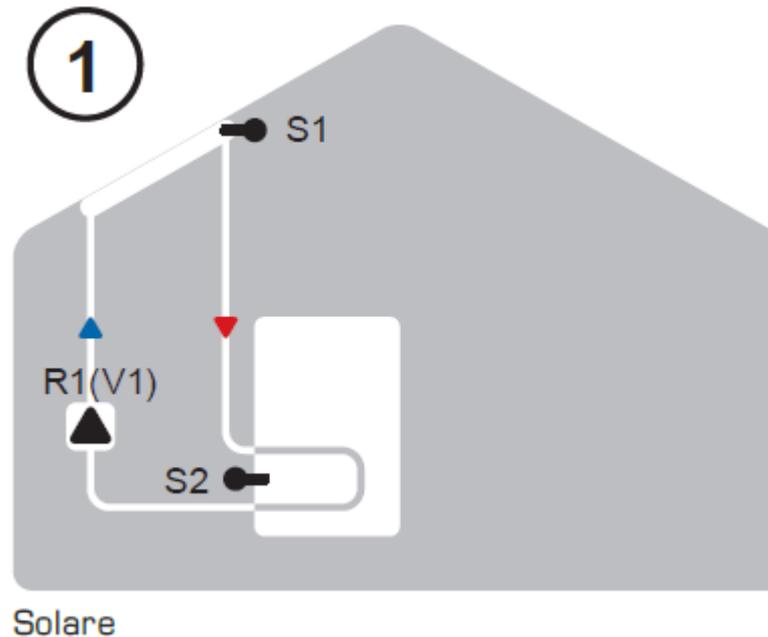
- impianti a circolazione forzata;



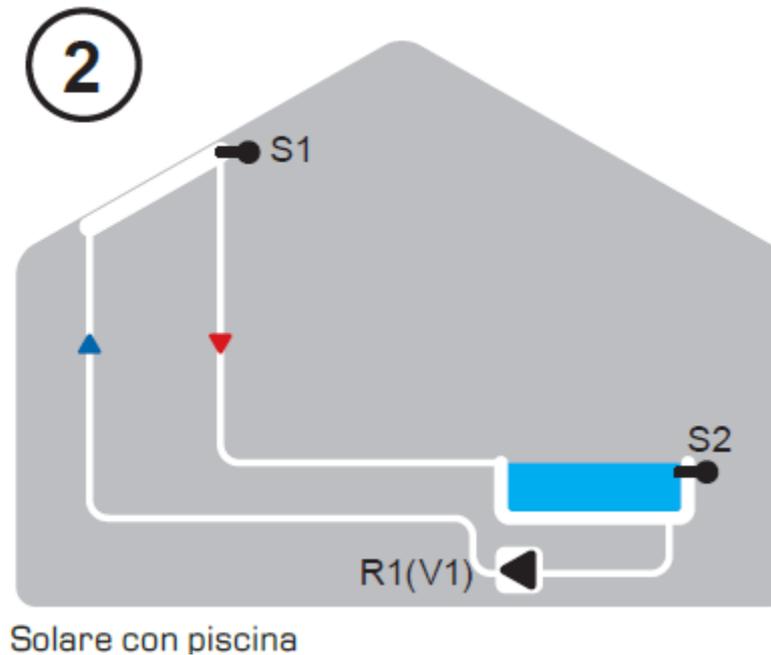
Il fluido termovettore è generalmente “acqua tecnica”, miscela di acqua e glicole etilenico impiegato come antigelo (abbassamento crioscopico).



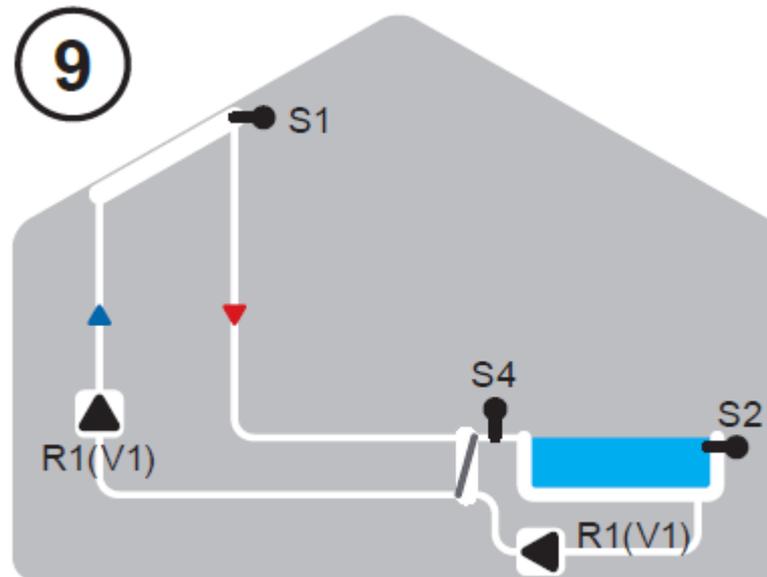
Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...



Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...

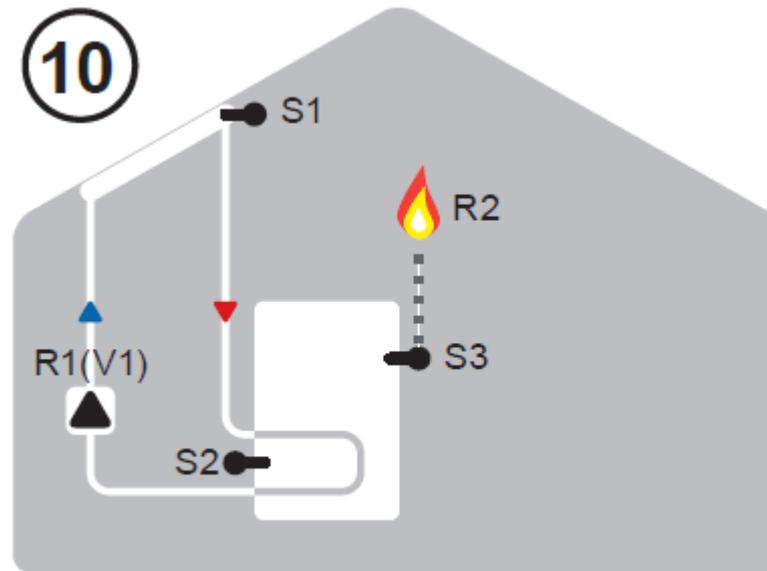


Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...



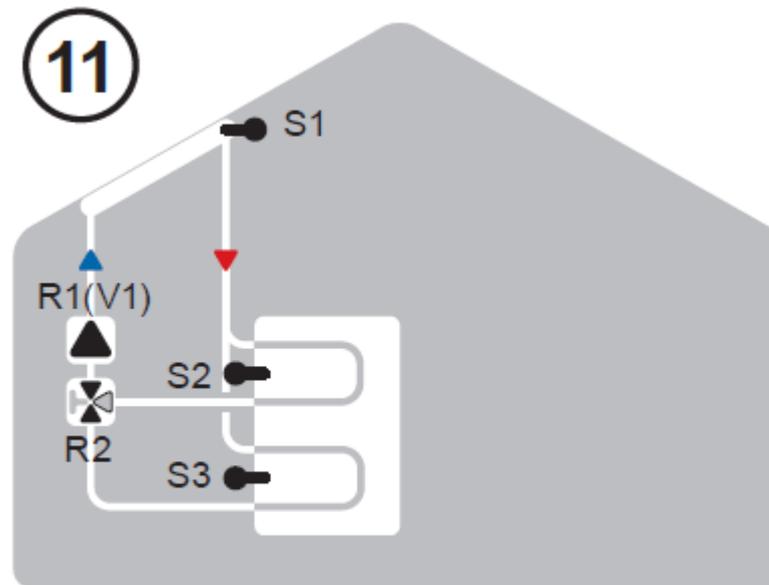
Solare con piscina + scamb.

Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...



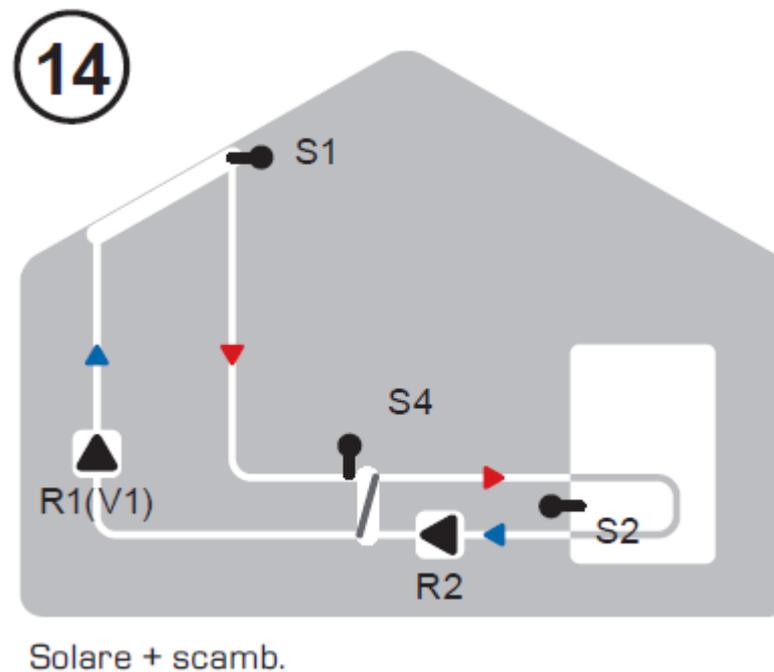
Solare + termostato

Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...

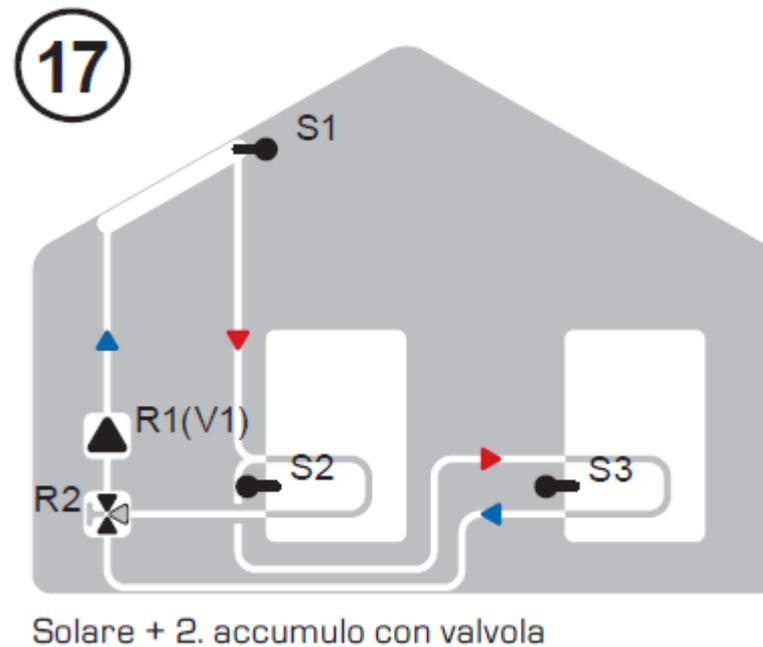


Solare + serbatoio 2 zone

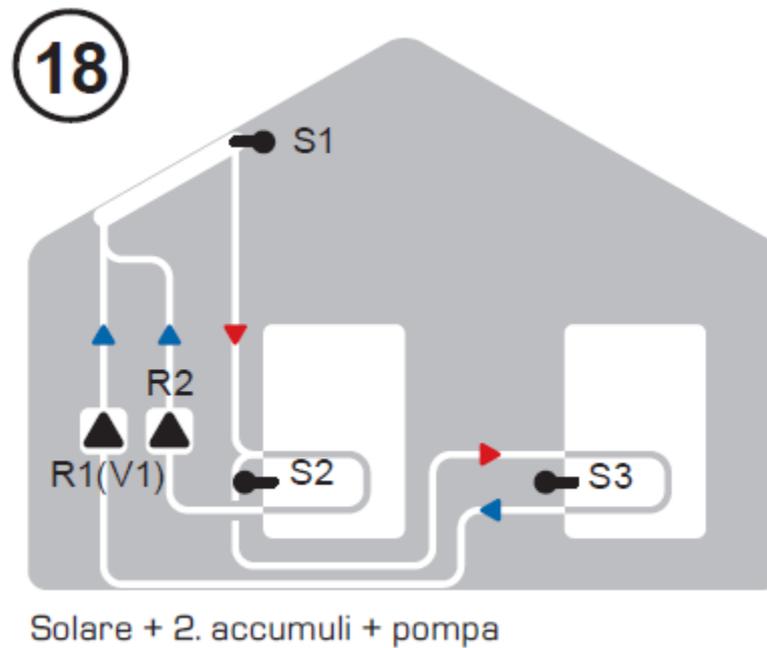
Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...



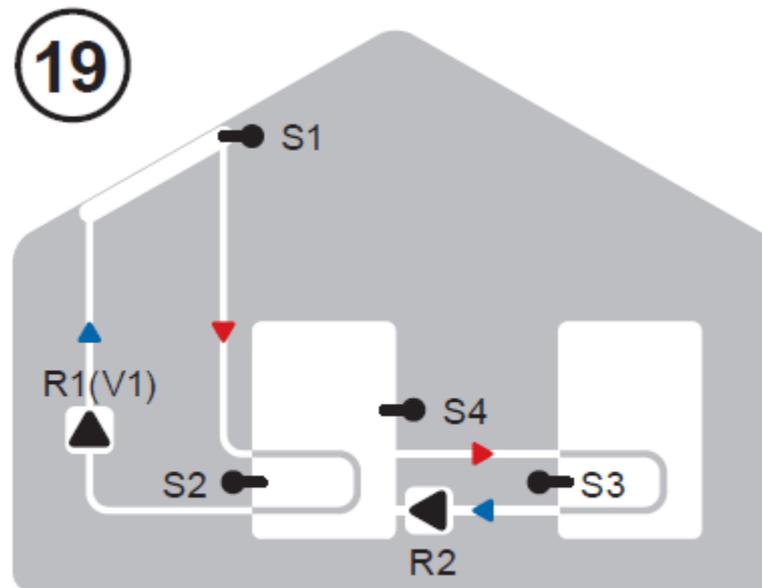
Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...



Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...

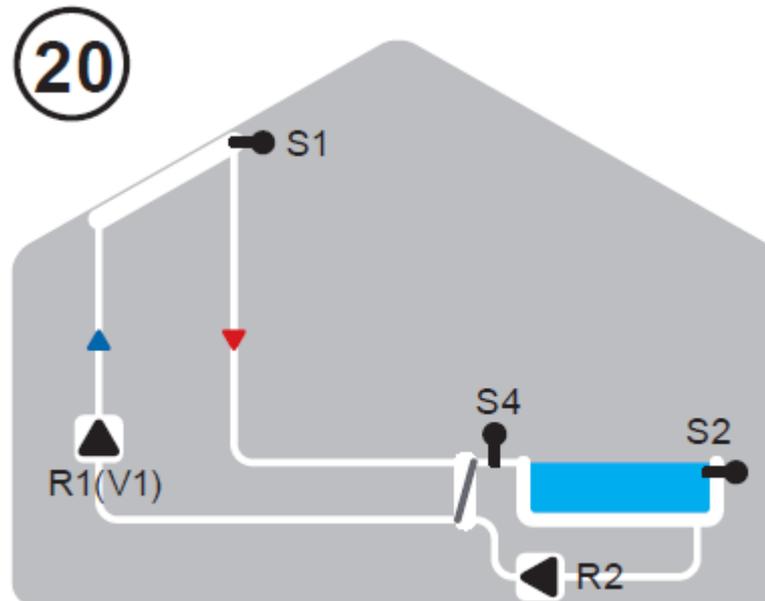


Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...



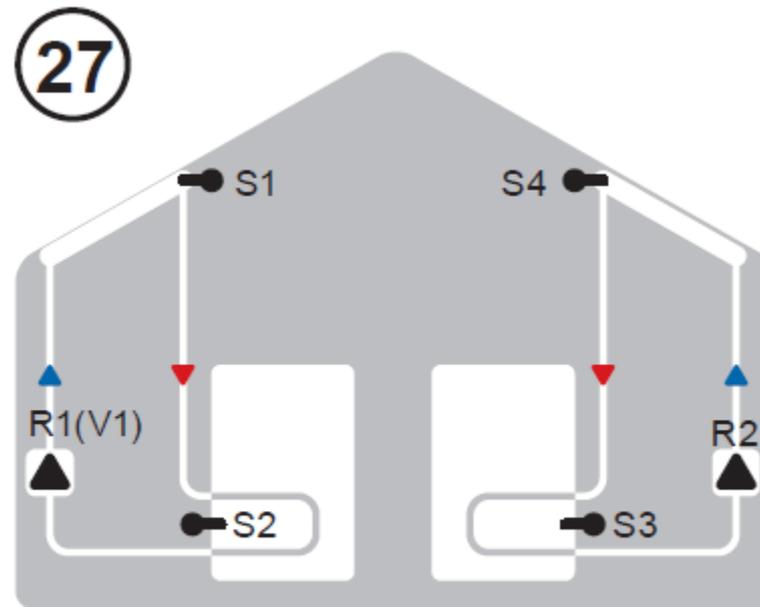
Solare + trasferimento accumulato

Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...



Solare con piscina e scambiatore

Esistono moltissime configurazioni d'impianto, in riferimento a ciò che è già esistente o, nel caso di nuova progettazione...



Doppio solare

Dimensionamento "live"...

<http://www.polysunonline.com/PsoPublic/app/home/system>