

Sistemi Fotovoltaici

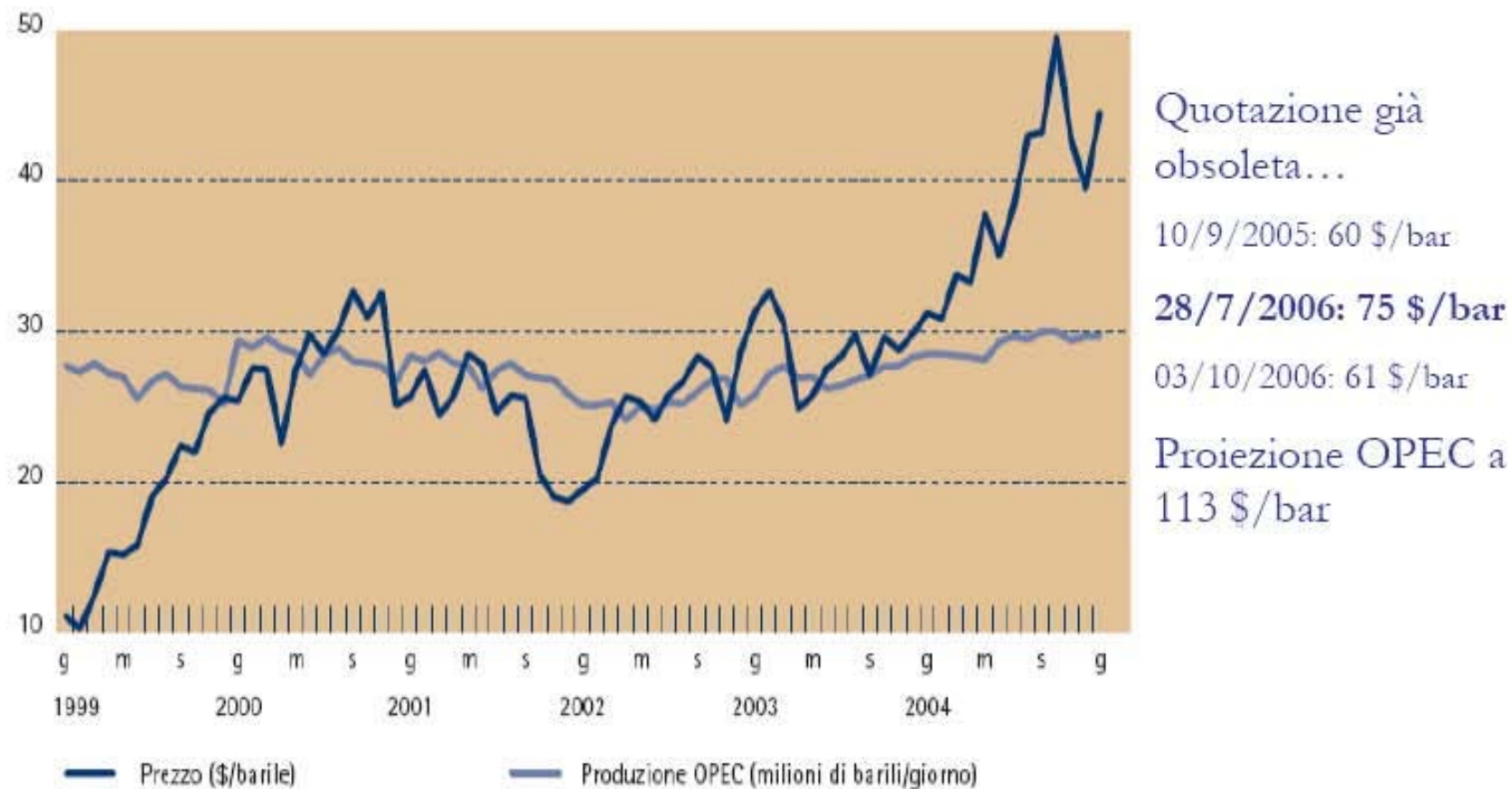
Sassari 20 Marzo 2009



Dott . Ing. Stefano Floris

FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI: FOTOVOLTAICO

FIG. 1.1 PREZZO DEL PANIERE E PRODUZIONE OPEC^(A) 1999-2004



Riserve di petrolio nel mondo...

In percentuale



Riserve di gas naturale



Riserve di petrolio



Fonte: Oil and Gas Journal, BP Statistical review of World Energy, 1998.

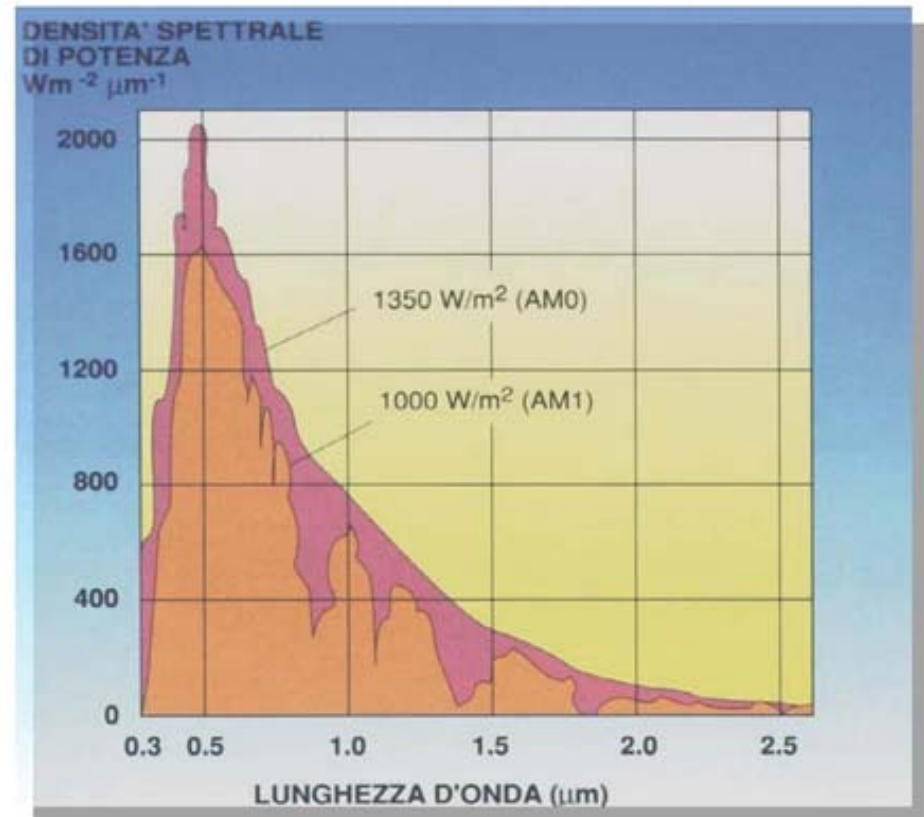
LA RADIAZIONE SOLARE

DEFINIZIONI

La **radiazione solare** è l'energia elettromagnetica emessa dal sole.

Densità di potenza **MASSIMA**
fuori dell'atmosfera terrestre **1350 W/m²**
(**costante solare**)
sulla superficie terrestre **1000 W/m²**

Lunghezza d'onda della radiazione solare
da 0,3 a 2,5 micrometri
Picco massimo 0,5 μm



LA RADIAZIONE SOLARE



Come è composta la luce solare

- 25% Riflessa dall'atmosfera
- 18% Diffusa nell'atmosfera
- 25% Assorbita dall'atmosfera
- 5% Riflessa dal terreno
- 27% Direttamente assorbita dalla superficie della terra

LA RADIAZIONE SOLARE

DISPONIBILITA'

La **radiazione solare** raccolta al suolo dipende:

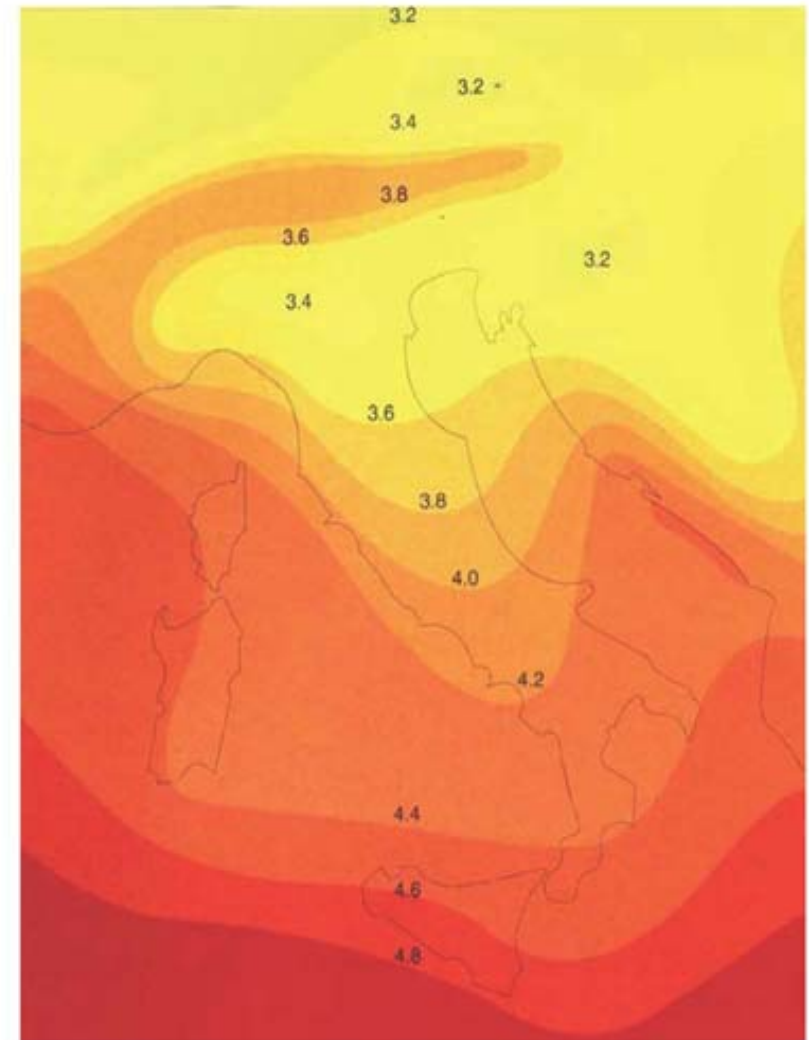
- dalle condizioni meteorologiche ed atmosferiche
- dall'angolo formato tra la radiazione incidente e la superficie al suolo

Disponibilità dati:

- norma UNI 10349
- mappe isoradiazione ENEA

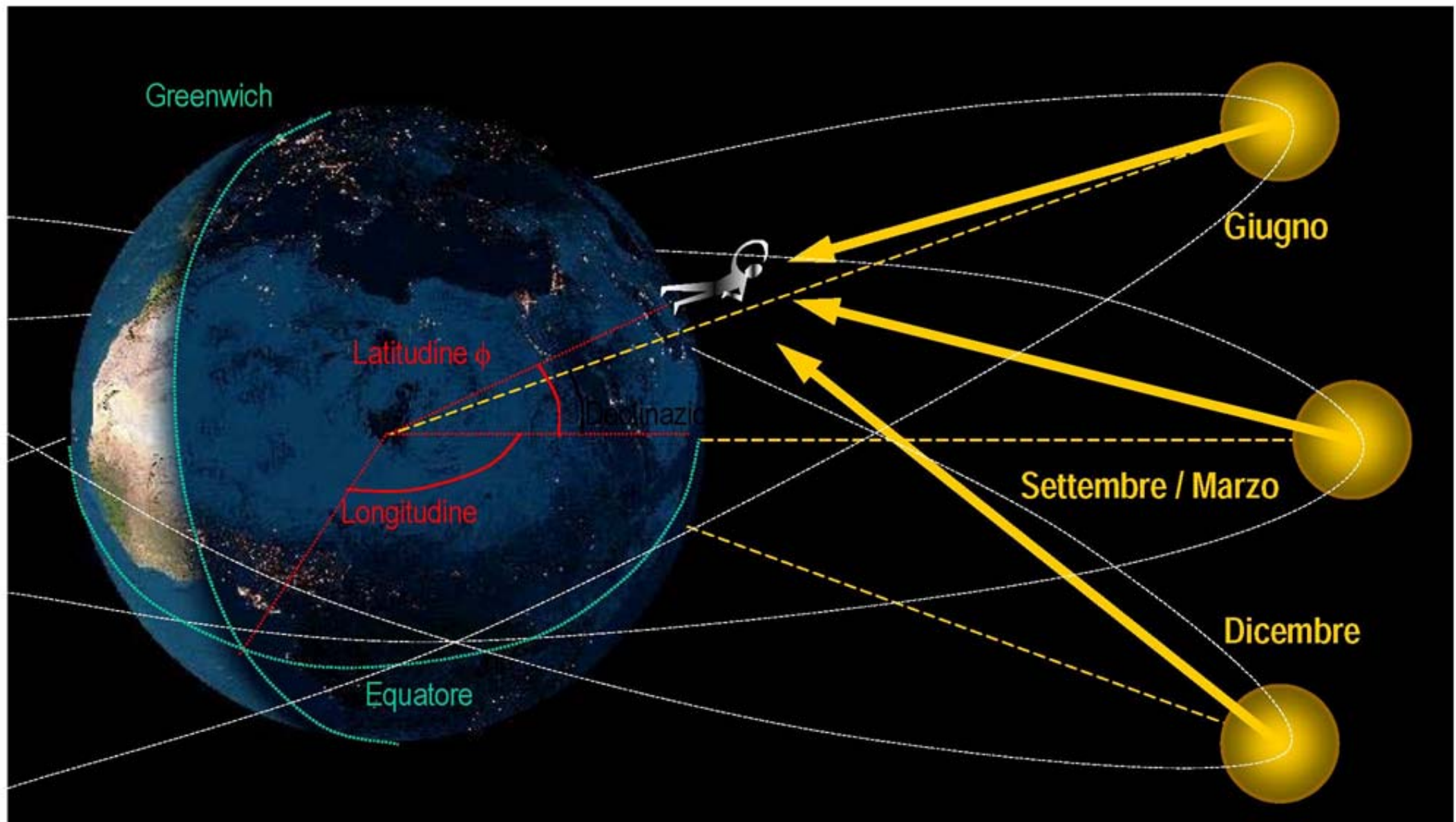
Determinazione della **radiazione solare** su una **superficie inclinata**:

- norma UNI 8477/1



Mappe isoradiazione per l'Italia
(valore giornaliero medio annuale in kWh/m²)

LA RADIAZIONE SOLARE



RADIAZIONE SU UN PIANO INCLINATO

θ angolo d'incidenza radiazione solare diretta

θ_z angolo zenitale (tra raggio solare direzione verticale)

α_s angolo d'altezza solare (tra superficie orizzontale e raggio solare)

γ_s angolo azimutale solare (proiezione raggio solare su piano orizzontale con direzione sud)

Questi angoli si possono esprimere come opportune funzioni di:

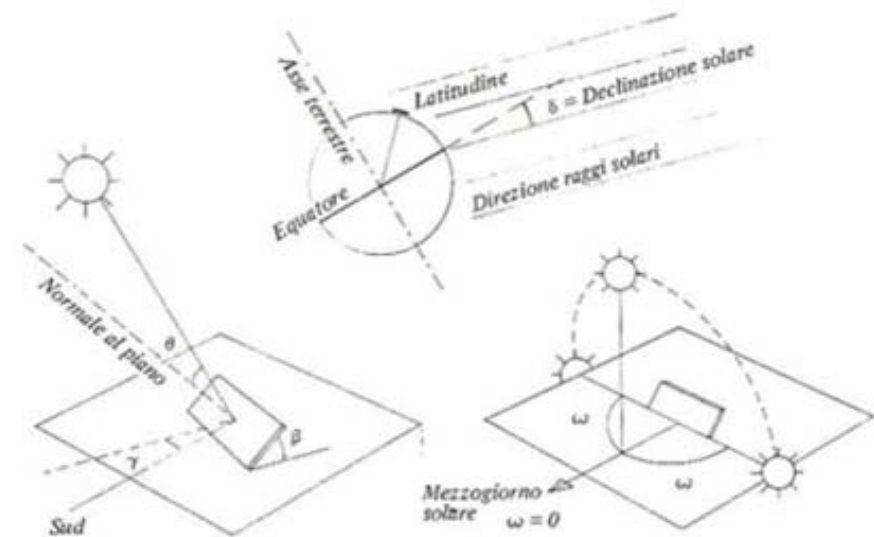
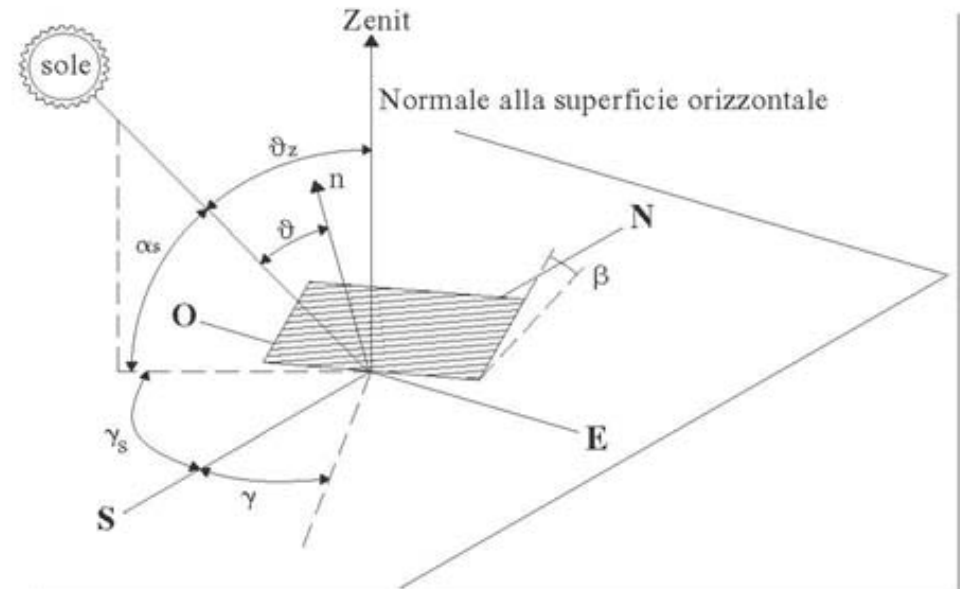
β angolo d'inclinazione superficie

γ angolo azimutale superficie (con direzione sud)

ω angolo orario (t tempo) = $(t - 12) \cdot 15^\circ$

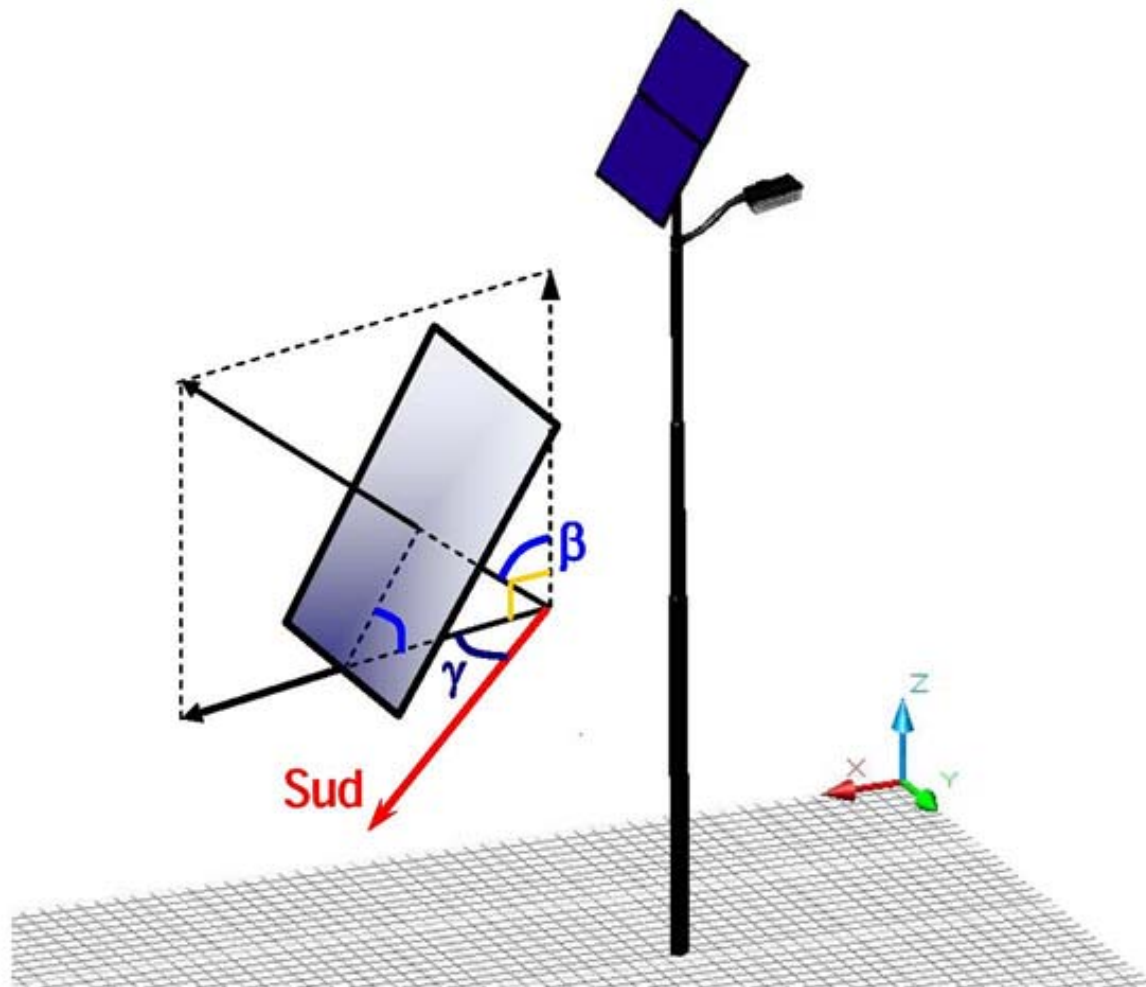
ϕ latitudine

δ angolo di declinazione



RADIAZIONE SU UN PIANO INCLINATO

Angoli di inclinaz. β e di orientaz. γ di una superficie



RADIAZIONE SU UN PIANO INCLINATO

L'irradianza totale media giornaliera sul piano inclinato si ottiene dalla UNI 8477/1 come:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_{Th} \cdot \left[\left(1 - \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_{Th}} \right) \cdot \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_{Th}} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right]$$

Dove:

$$\bar{R}_b = \frac{T(\omega'' - \omega') + U(\sin \omega'' - \sin \omega') - V(\cos \omega'' - \cos \omega')}{2(T_h \omega_s + U_h \omega_s)}$$

$$\bar{H}_{Th} = \bar{H}_{bh} + \bar{H}_{dh}$$

è il **fattore angolare** diretto medio giornaliero funzione degli angoli orari di alba e tramonto della superficie, ω' e ω'' , e delle funzioni:

$$T = \sin \delta \cdot (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma)$$

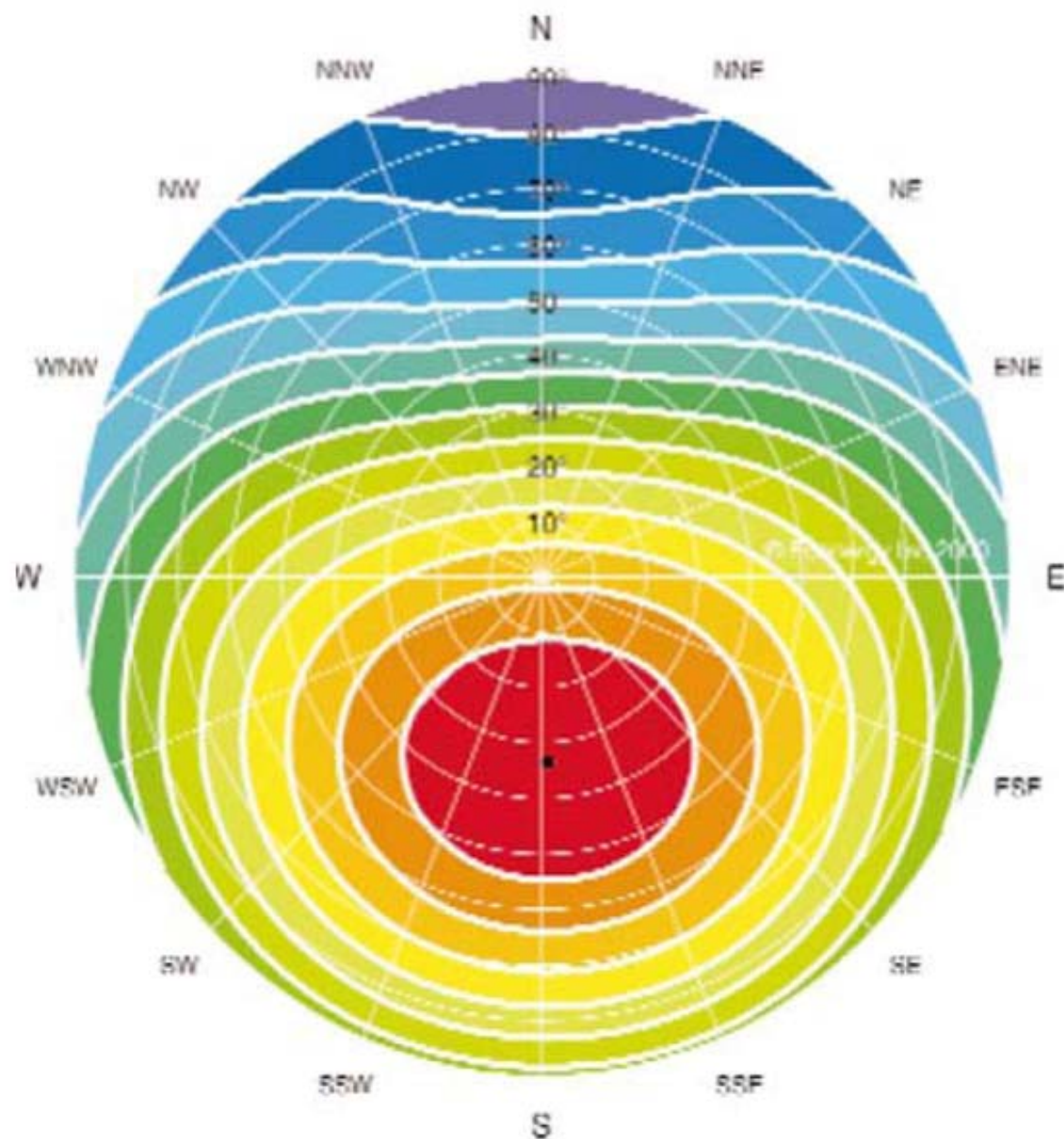
$$U = \cos \delta \cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma$$

$$V = \sin \beta \sin \gamma$$

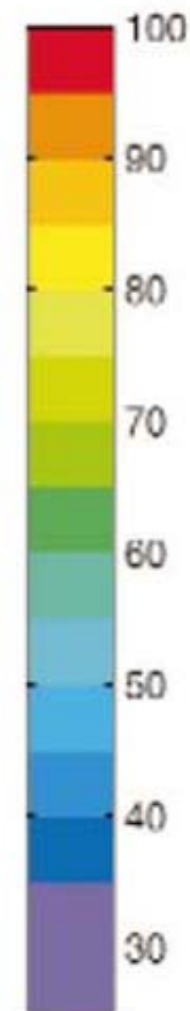
$$T_h = \sin \delta \sin \phi$$

$$U_h = \cos \delta \cos \phi$$

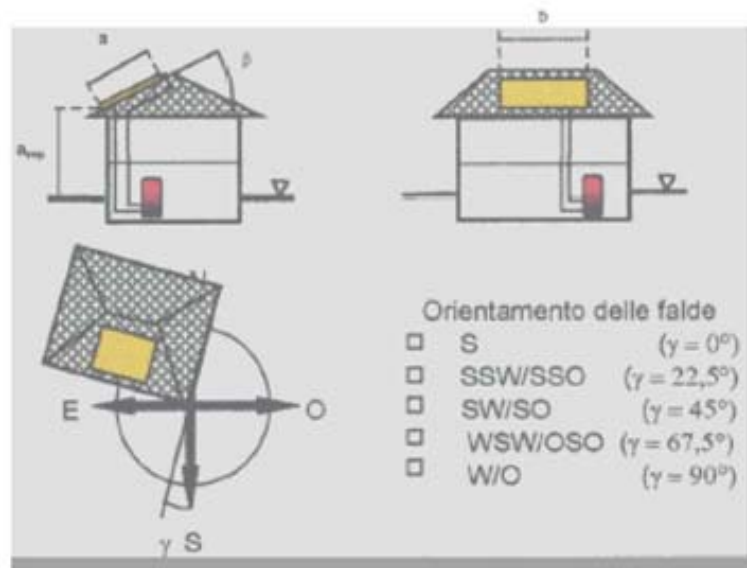
RADIAZIONE SOLARE GLOBALE ANNUA



Percentuale rispetto
al valore massimo



INCLINAZIONE E ORIENTAMENTO



| orientamento Sud: 0° Est/Ovest: 90° | angolo di inclinazione | | | | | | |
|--|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° |
| 0 | 0,89 | 0,97 | 1 | 0,99 | 0,93 | 0,83 | 0,69 |
| 15 | 0,89 | 0,96 | 1 | 0,98 | 0,93 | 0,83 | 0,69 |
| 30 | 0,89 | 0,96 | 0,99 | 0,97 | 0,92 | 0,82 | 0,70 |
| 45 | 0,89 | 0,94 | 0,97 | 0,95 | 0,9 | 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 | 0,89 | 0,88 | 0,87 | 0,83 | 0,78 | 0,71 | 0,62 |

IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Vantaggi

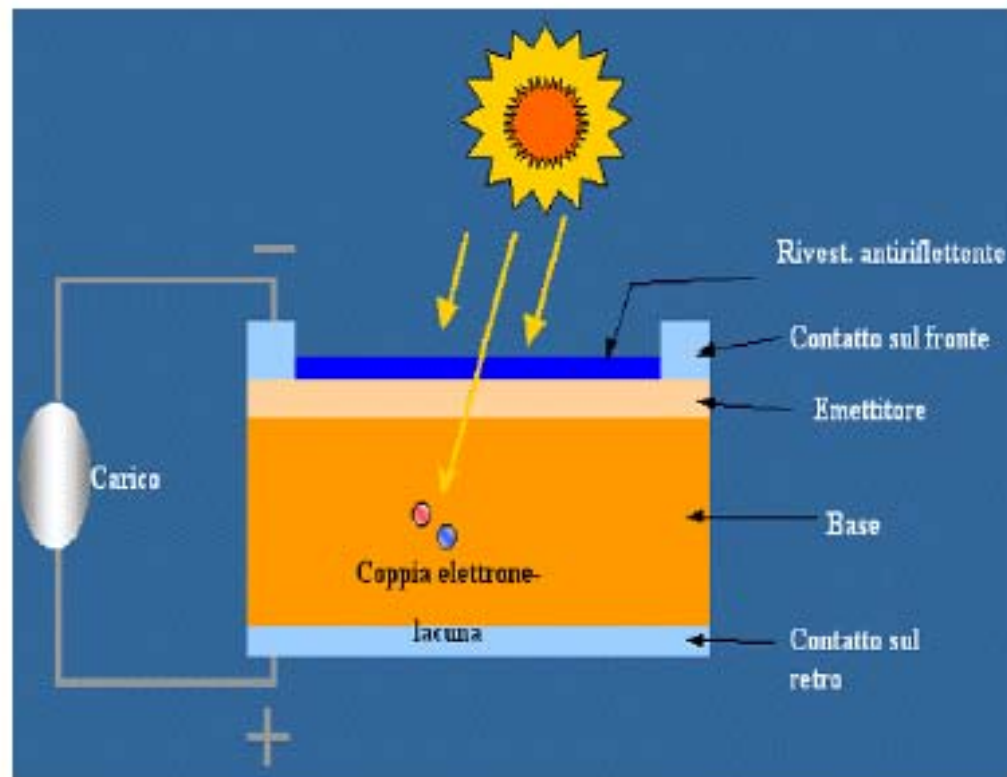
- indipendente dal sito
- nessun consumo di combustibile
- nessuna emissione inquinante
- nessun emissione acustica
- totale modularità (da 1W ai megawatt)
- tecnologia ingegneristica semplice
- vita utile e garantita di più di 20 anni
- ideale per l'ambiente urbano

Difetti

- bassa efficienza
- costo elevato
- evoluzione tecnologica lenta (laboratorio-produzione: 15 anni)



Cos'è l'effetto fotovoltaico



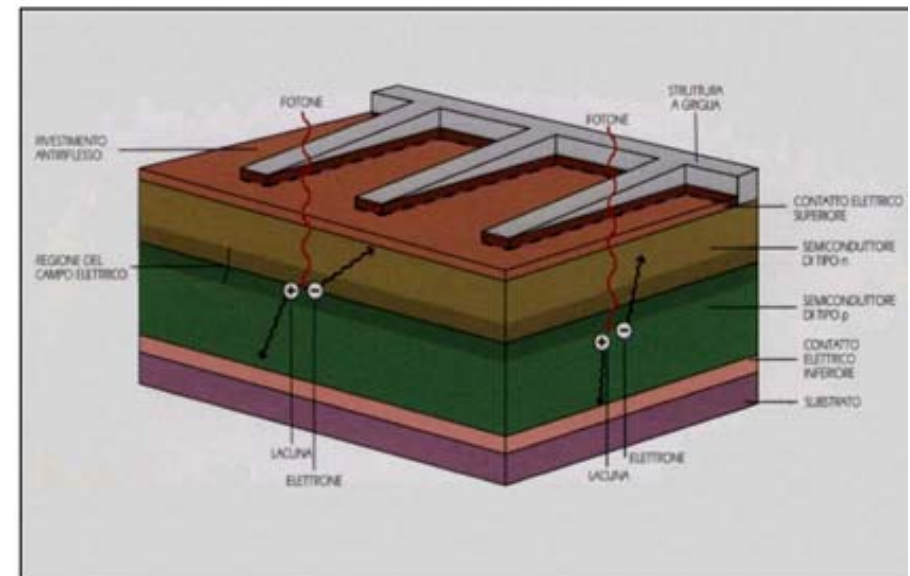
- Nel 1839 Henri Becquerel scoprì che la luce interagendo con alcune sostanze chimiche produceva corrente elettrica
- Nel 1954 fu realizzata la prima cella solare con un'efficienza del 6 % destinata ad applicazioni spaziali

LA CELLA FOTOVOLTAICA - PRINCIPI

Un fotone, dotato di sufficiente energia, è assorbito nella cella, creando una coppia di cariche elettriche di segno opposto, chiamate “*elettrone*” e “*lacuna*”.

Per generare effettivamente la corrente elettrica, però, è necessaria una differenza di potenziale che faccia muovere le cariche, e questa viene creata grazie all'introduzione di piccole quantità di impurezze, chiamate “*droganti*”, nel materiale che costituisce le celle, che sono in grado di modificare profondamente le proprietà elettriche del semiconduttore.

Per il **silicio**, drogato **con fosforo**, si ottiene la formazione di **silicio di tipo “n”** caratterizzato dal fatto di possedere una densità di elettroni liberi (cariche **negative**) molto più alta che quella presente nel silicio normale. Il drogaggio del **silicio con** atomi di **boro** porta al **silicio di tipo “p”** in cui le cariche libere in eccesso sulla norma sono di segno **positivo**.



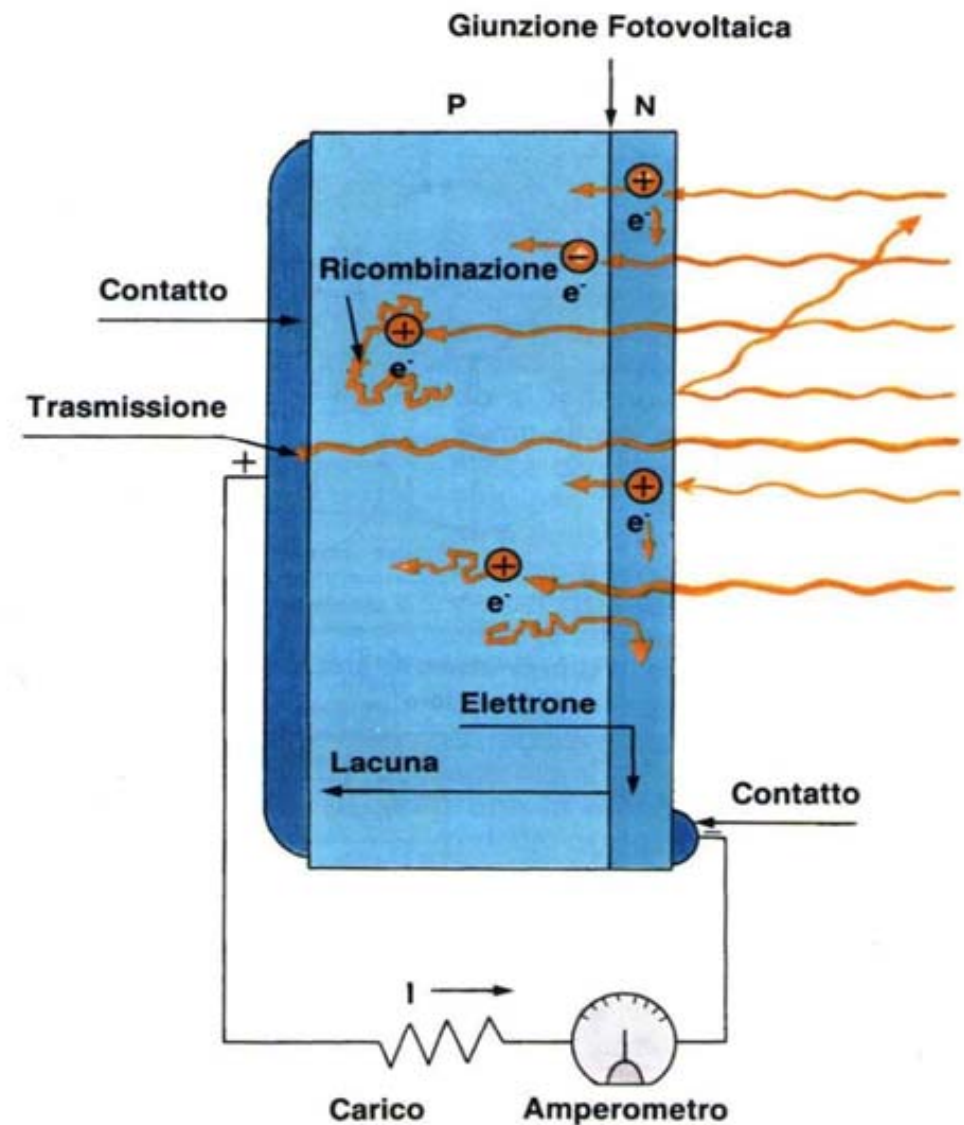
LA CELLA FOTOVOLTAICA - PRINCIPI

Nella zona di contatto tra il silicio di tipo n e il silicio di tipo p, detta “*giunzione n-p*”, si ha la formazione di un **forte campo elettrico, capace di muovere in direzioni opposte le cariche elettriche positive e negative** generate dalla luce nelle vicinanze della giunzione.

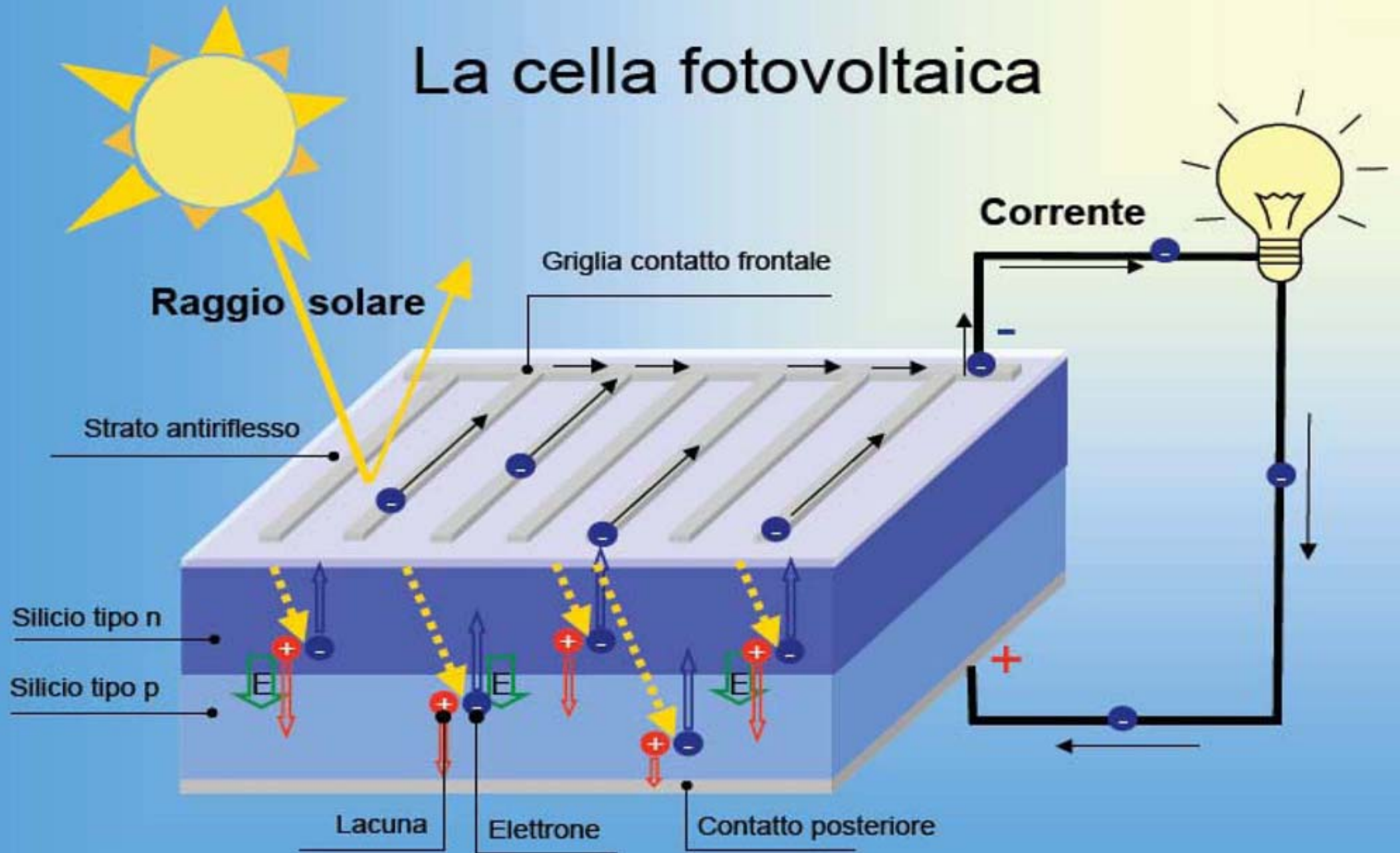
In questo modo, le cariche vengono separate e, se si collega questo dispositivo ad un circuito esterno, si potrà avere una circolazione di corrente: **tanto maggiore è la quantità di luce incidente, tanto maggiore è la corrente generata.**

Nella tipica cella fotovoltaica (vedi figura) si distinguono due strati semiconduttori:

- uno strato superiore, esposto alla radiazione solare, molto sottile di tipo n
- un secondo strato di tipo p in cui avviene l'assorbimento della luce incidente.

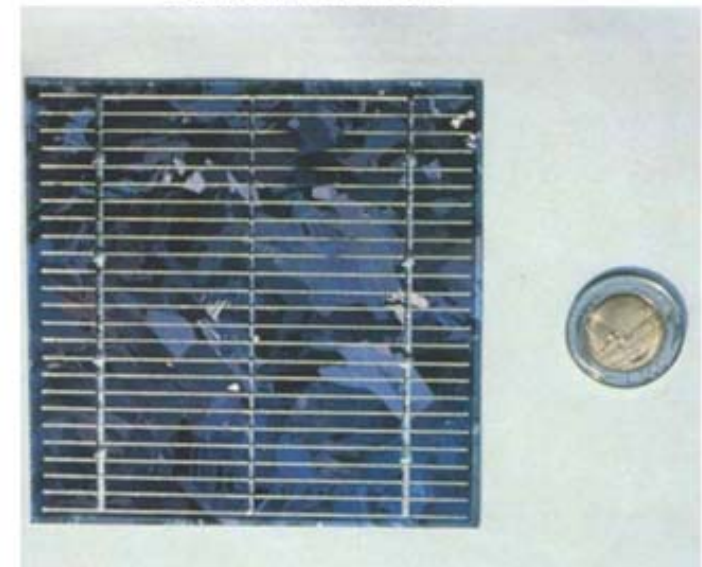
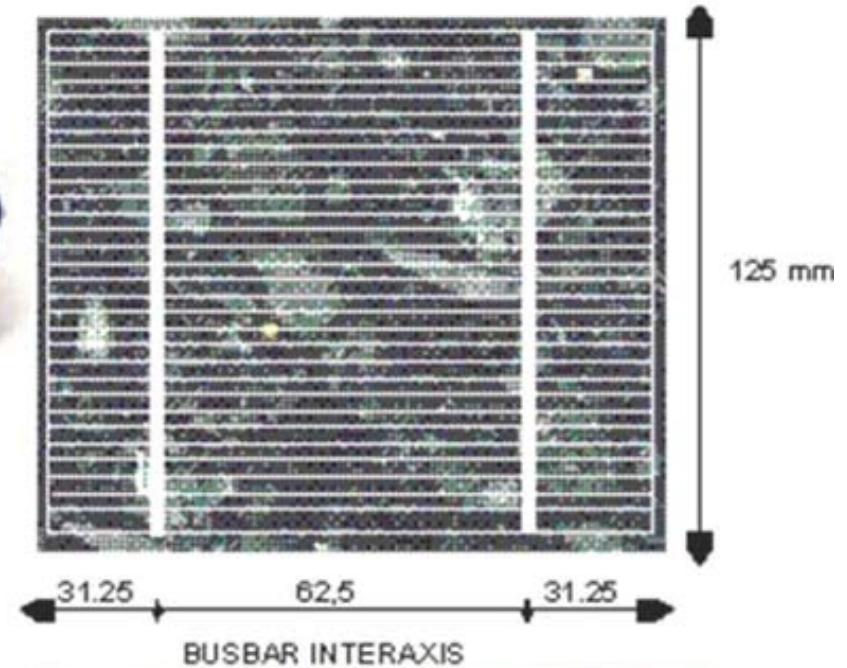


La cella fotovoltaica

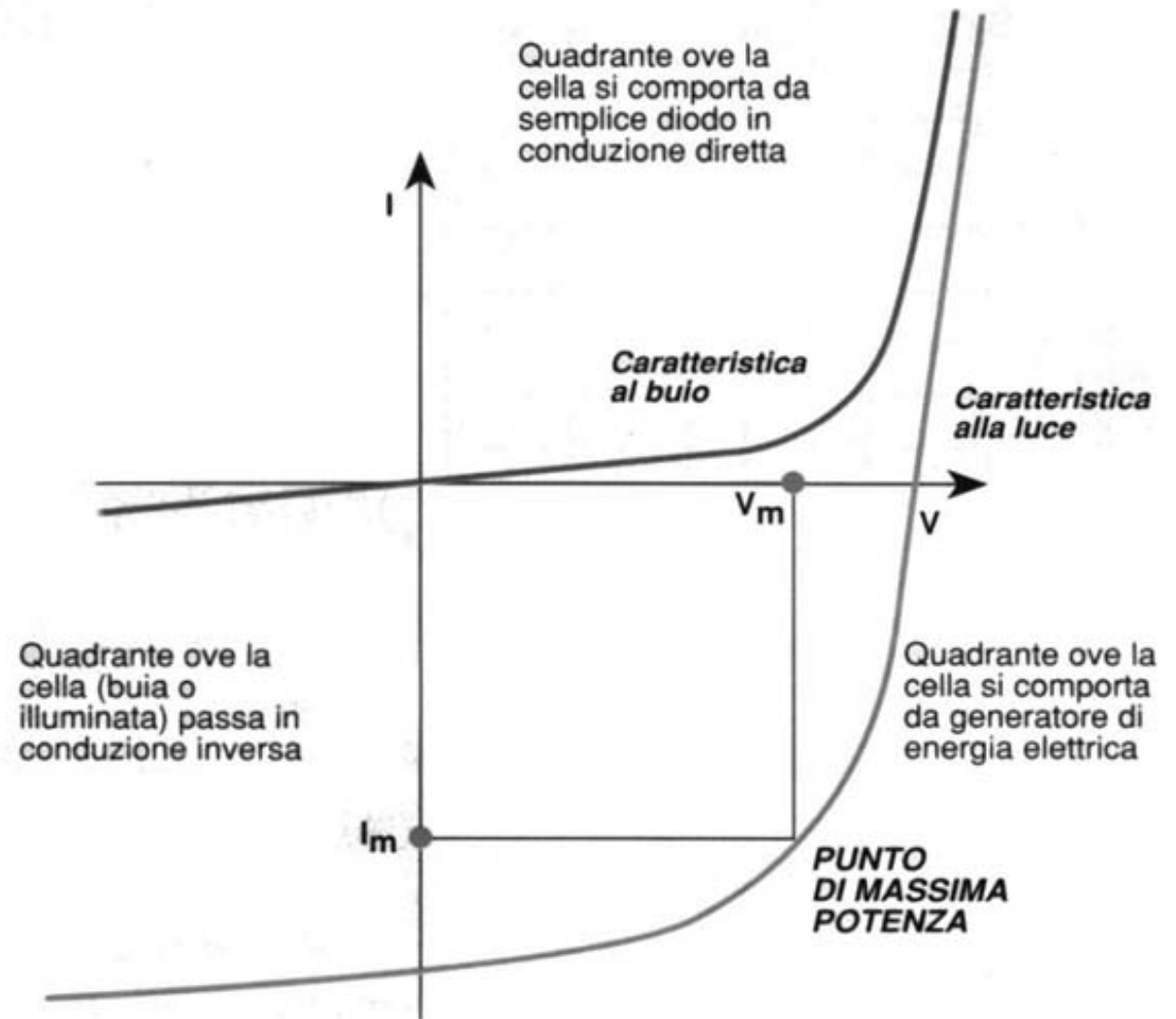


LA CELLA FOTOVOLTAICA

- **Caratteristiche costruttive di una tipica cella fotovoltaica**
 - spessore pari circa a 0,3 mm
 - forma circolare o quadrata
 - area pari circa a 100 cm²
- **Per essere utilizzati ai fini del processo di conversione i fotoni di cui è composta la luce solare, devono possedere un'energia superiore ad un livello minimo**
- **Per il silicio la parte di radiazione avente lunghezza d'onda superiore ad 1,1 micrometri non viene assorbita**



- La cella solare, esposta alla radiazione solare, si comporta come un generatore di corrente il cui funzionamento viene descritto mediante la **caratteristica tensione-corrente**



POTENZA NOMINALE O DI PICCO

La potenza è data dalla:

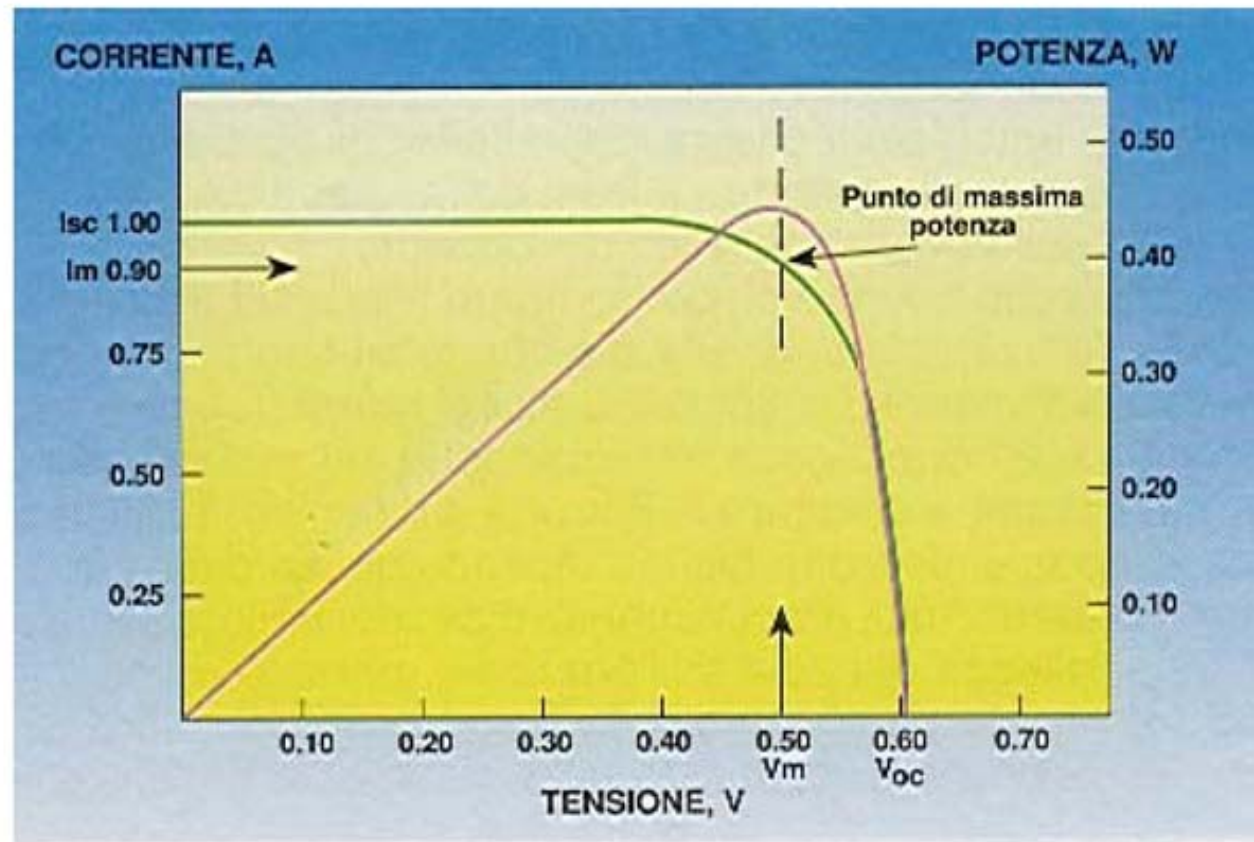
$$P=V \times I$$

in cui:

P è la potenza erogata dalla cella [W];

V è la differenza di potenziale [V];

I è l'intensità della corrente [A].



La **potenza massima** estraibile dalla cella in condizioni di irradianza e temperatura specificate,

(temperatura alla giunzione di 25°C , irradianza di 1000 W/m^2 , spettro della radiazione solare pari a quello riscontrabile in condizioni di AM(air mass) 1,5)

STC (*Standard Test Condition*), viene definita essere la **Potenza Nominale (W_N) o di Picco (W_p)**.

RENDIMENTO DI UNA CELLA

$$\eta = \frac{\text{potenza massima erogabile (in condizioni standard)}}{\text{potenza della radiazione incidente sulla superficie della cella}}$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{1000 \times A_{\text{cella}}}$$

- **celle commerciali al silicio $\eta = 11\% \div 16\%$**
- **celle di laboratorio $\eta \cong 30\%$**

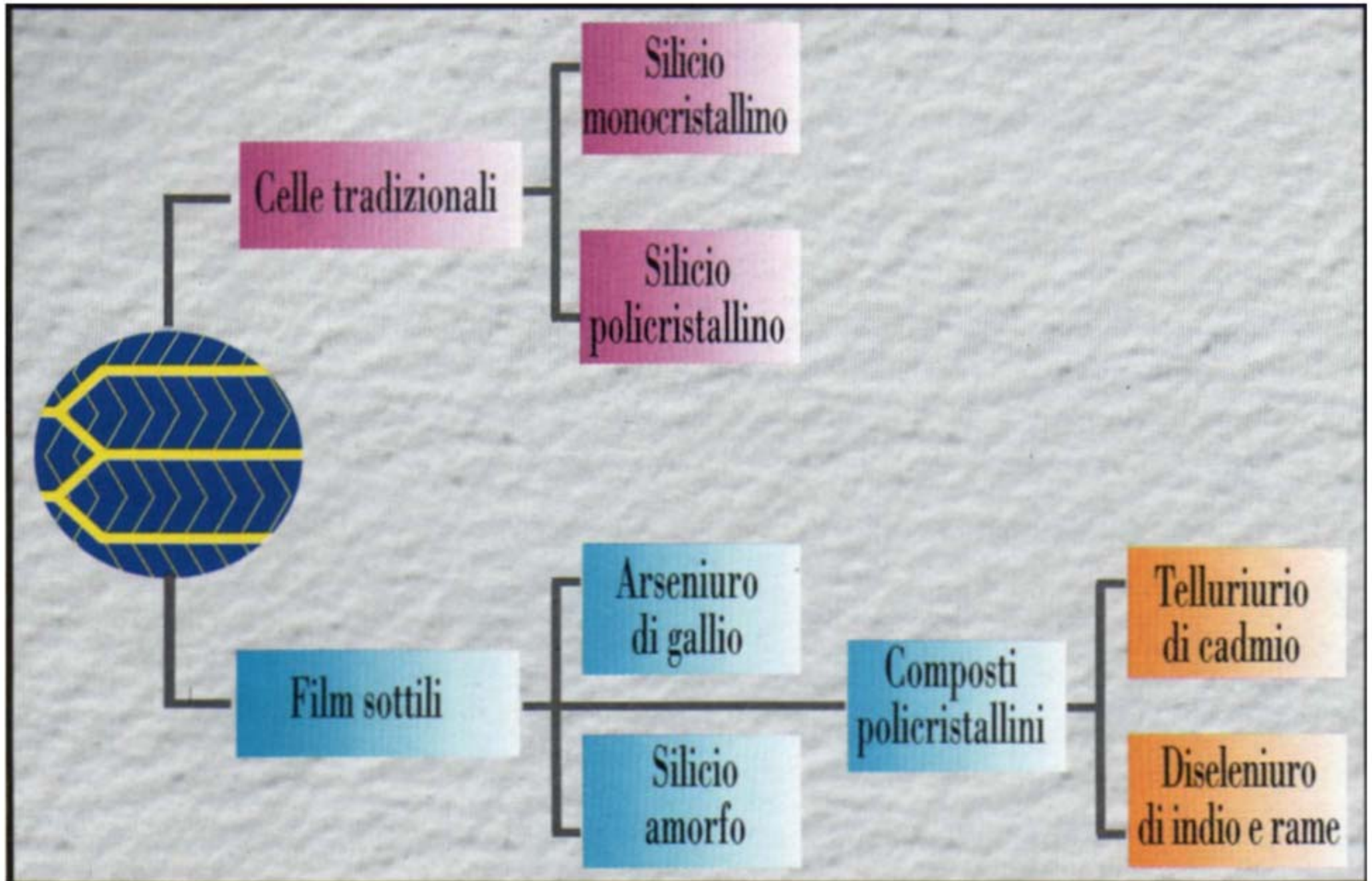
Cause di inefficienza di una cella fotovoltaica:

- **inefficienza di penetrazione dei fotoni all'interno della cella**
- **inefficienza di conversione dell'energia dei fotoni in energia della coppia elettrone-lacuna**
- **inefficienza di conversione dell'energia posseduta dalle coppie elettrone-lacuna in energia elettrica**
- **inefficienza di trasferimento al carico dell'energia fotoelettrica prodotta**

Le caratteristiche prestazionali di una cella, nell'esempio al **silicio monocristallino**, posta **nelle condizioni di riferimento, STC**, sono quindi fornite dai seguenti parametri :

- - efficienza $\eta = 15\%$
- - corrente generata: 2,5-3 A
- - voltaggio: 0,45-0,55 V
- - potenza erogata: 1,5 W
- - fattore di riempimento FF: 0,6 –0,8

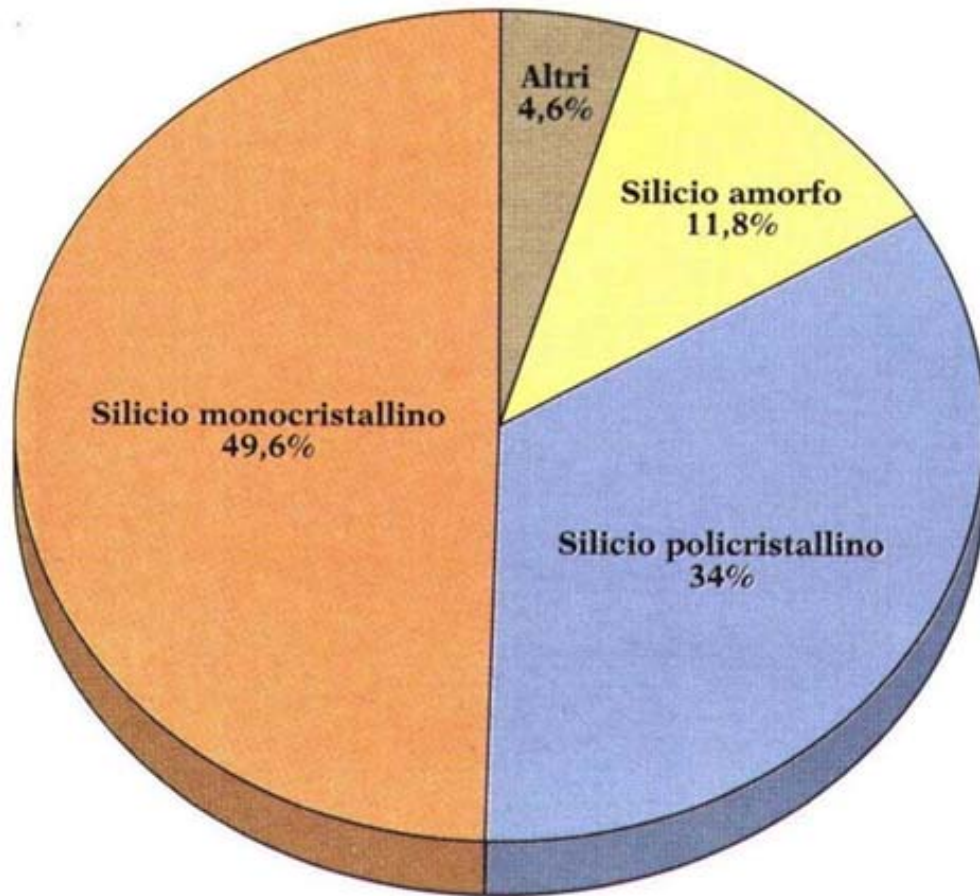
TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE



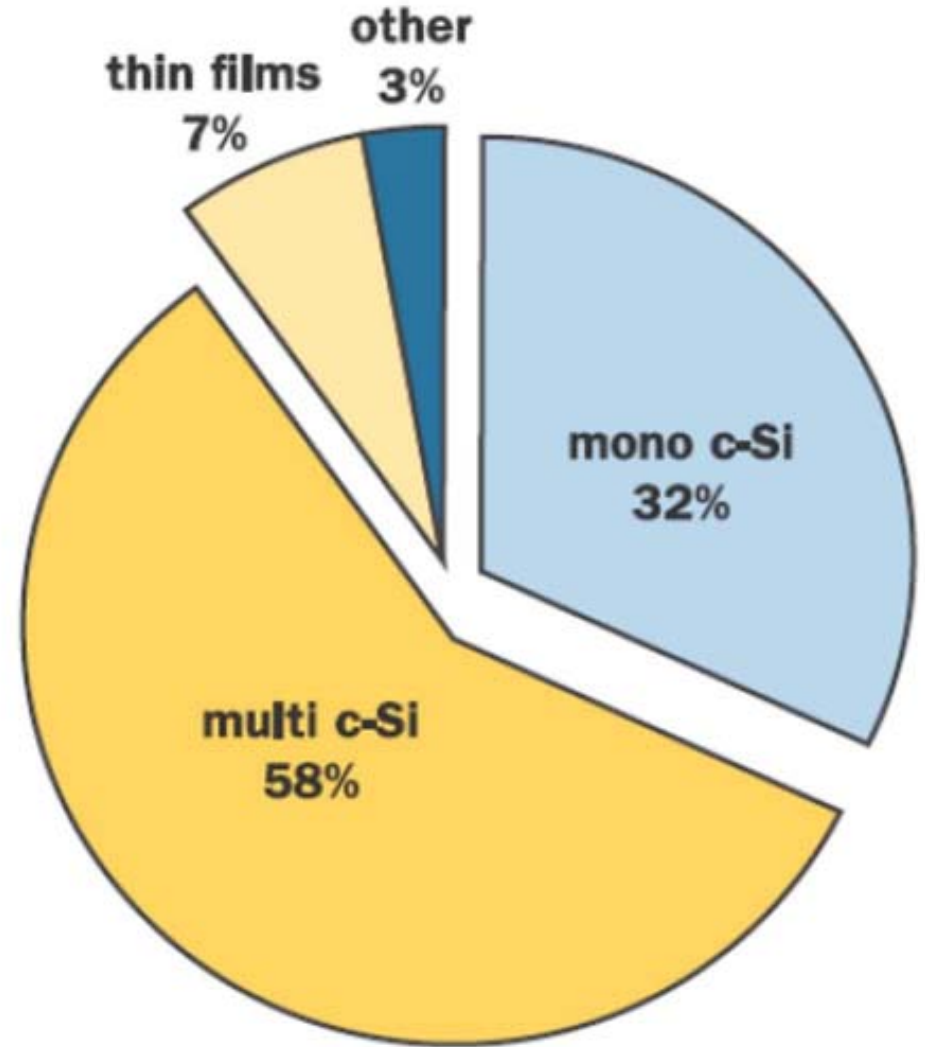
- **Silicio Amorfo**
- **Silicio Monocristallino**
- **Silicio Policristallino**
- **Arseniuro di Gallio et al.**



PRODUZIONE CELLE

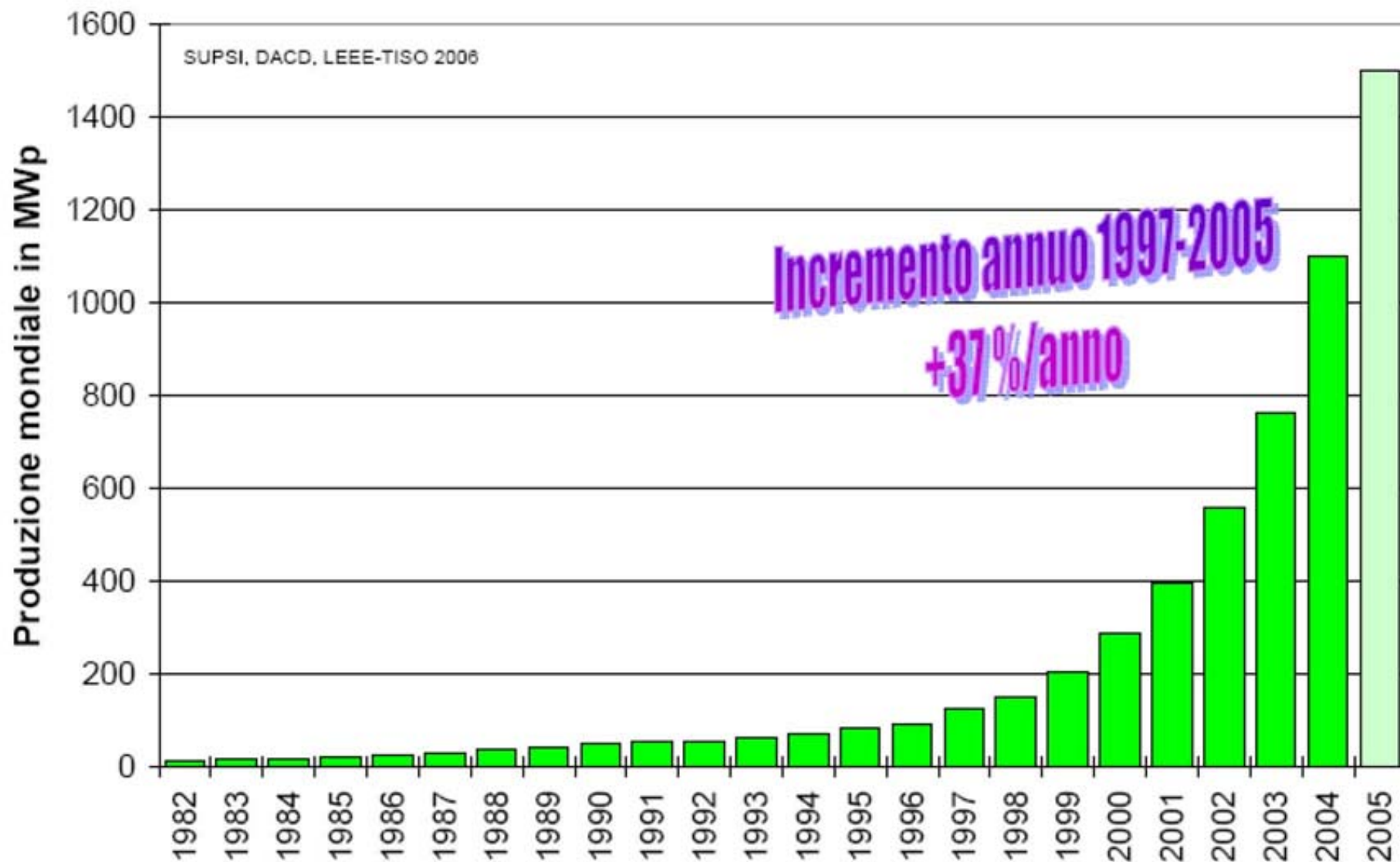


1997



2004

Produzione mondiale di moduli PV, in MWp

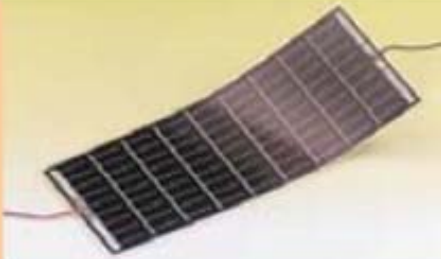


Le 3 principali tecnologie sul mercato FV

Tecnologia **cristallina**

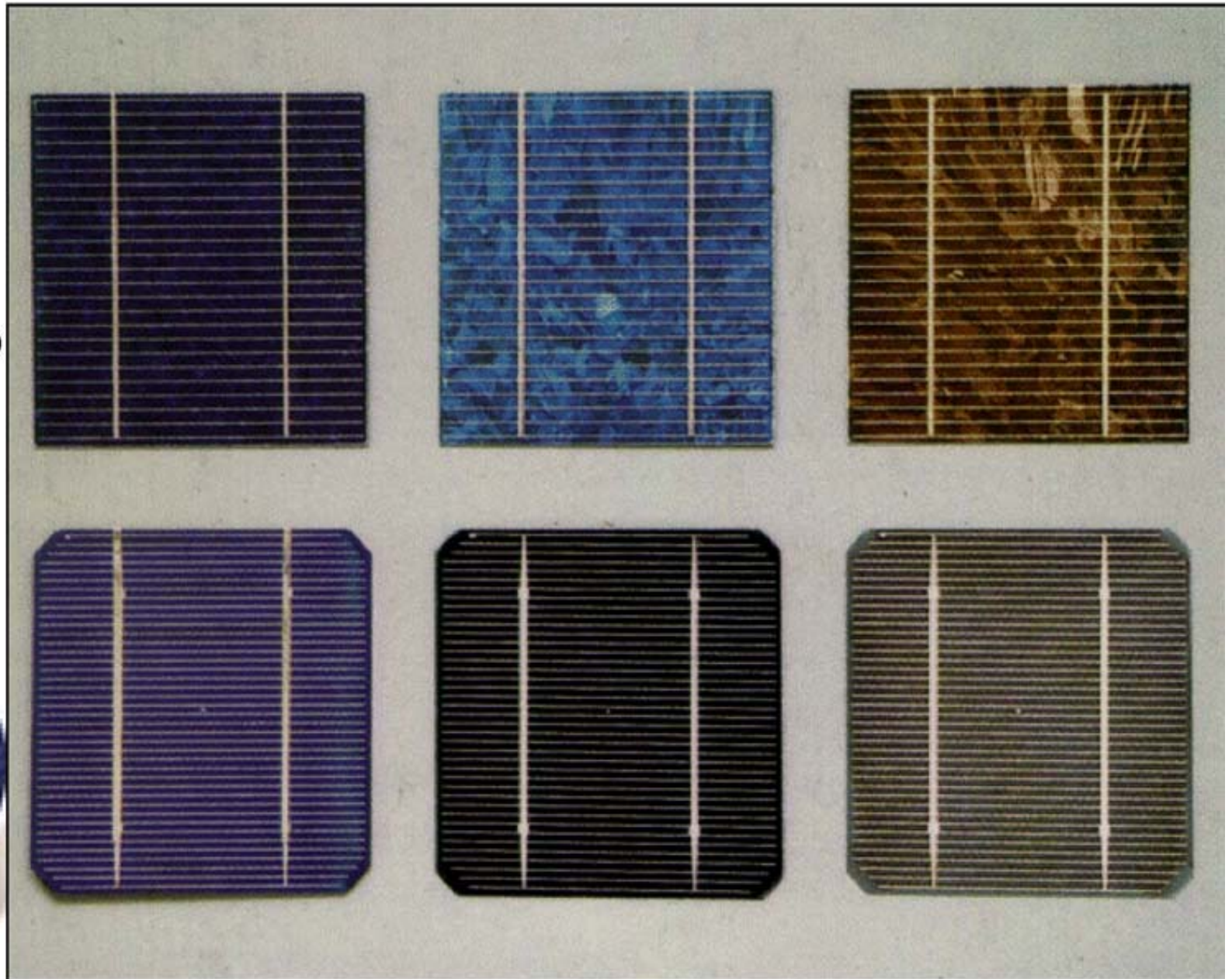
| | | | |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------|--|
| Silicio monocristallino | Single crystal Si | sc-Si (m-Si) |  |
| Silicio policristallino | Multi crystal Si | mc-Si (p-Si) |  |

Tecnologia **film sottile**

| | | | |
|--------------------------|-----------------|------|---|
| Silicio amorfo | Amorphous Si | a-Si |  |
|--------------------------|-----------------|------|---|

TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE

**Celle
al silicio
mono e
policristallino**



Cella in silicio monocristallino

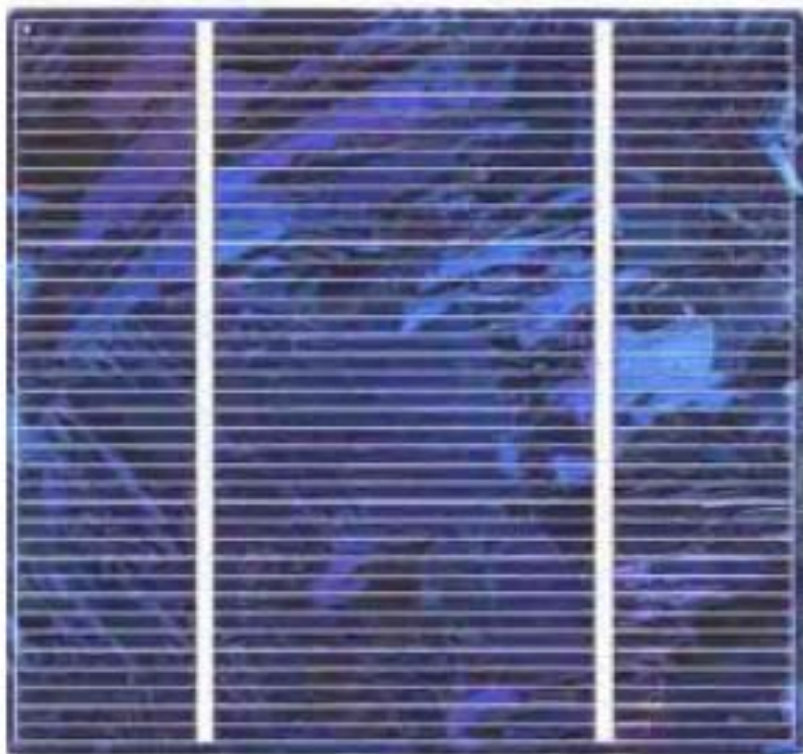
- Materiale ad un elevato grado di purezza
- Maggiore efficienza rispetto alle altre tipologie di celle al silicio
- Generalmente di forma pseudo-quadra



Efficienza massima 21.5 %

Cella in silicio policristallino

- Meno complesse da realizzare rispetto a quelle in monocristallino
- Rendimento di poco inferiore alle precedenti



Efficienza massima 19 %

Cella in silicio amorfo

- Flessibili: possono essere “ripiegati”... ma tendono a degradarsi più in fretta
- Rendimento inferiore alle precedenti perché struttura molecolare indefinita



Efficienza massima 7-8%

I PRODOTTI FOTOVOLTAICI COMMERCIALI (ESEMPI)

Le tipologie in commercio

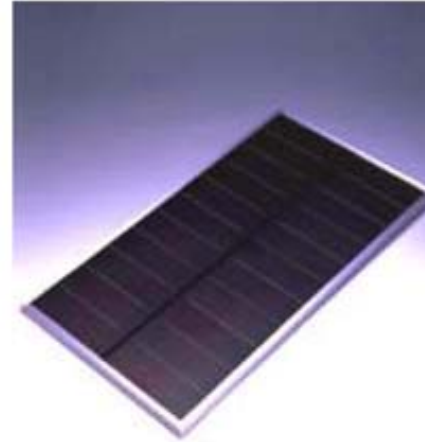
Cristallino con cornice



Cristallino senza cornice



Amorfo con cornice



Amorfo senza cornice



I PRODOTTI FOTOVOLTAICI COMMERCIALI (ESEMPI)

Le tipologie custom-made

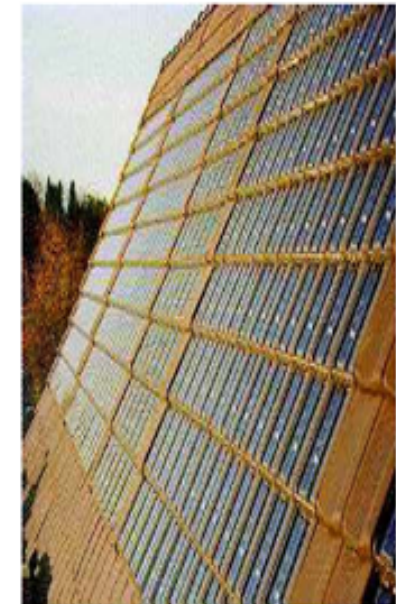
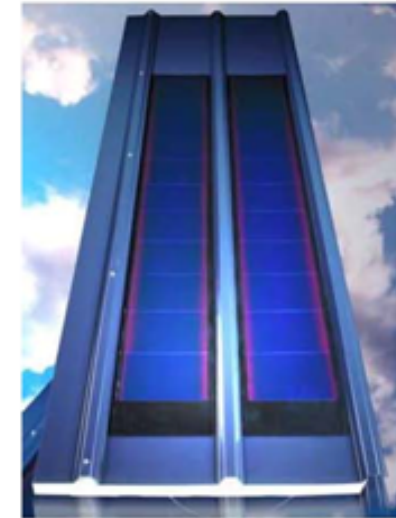
Cristallino colorato



Cristallino trasparente



Amorfo architetonico



Confronto tra tecnologie (1/2)

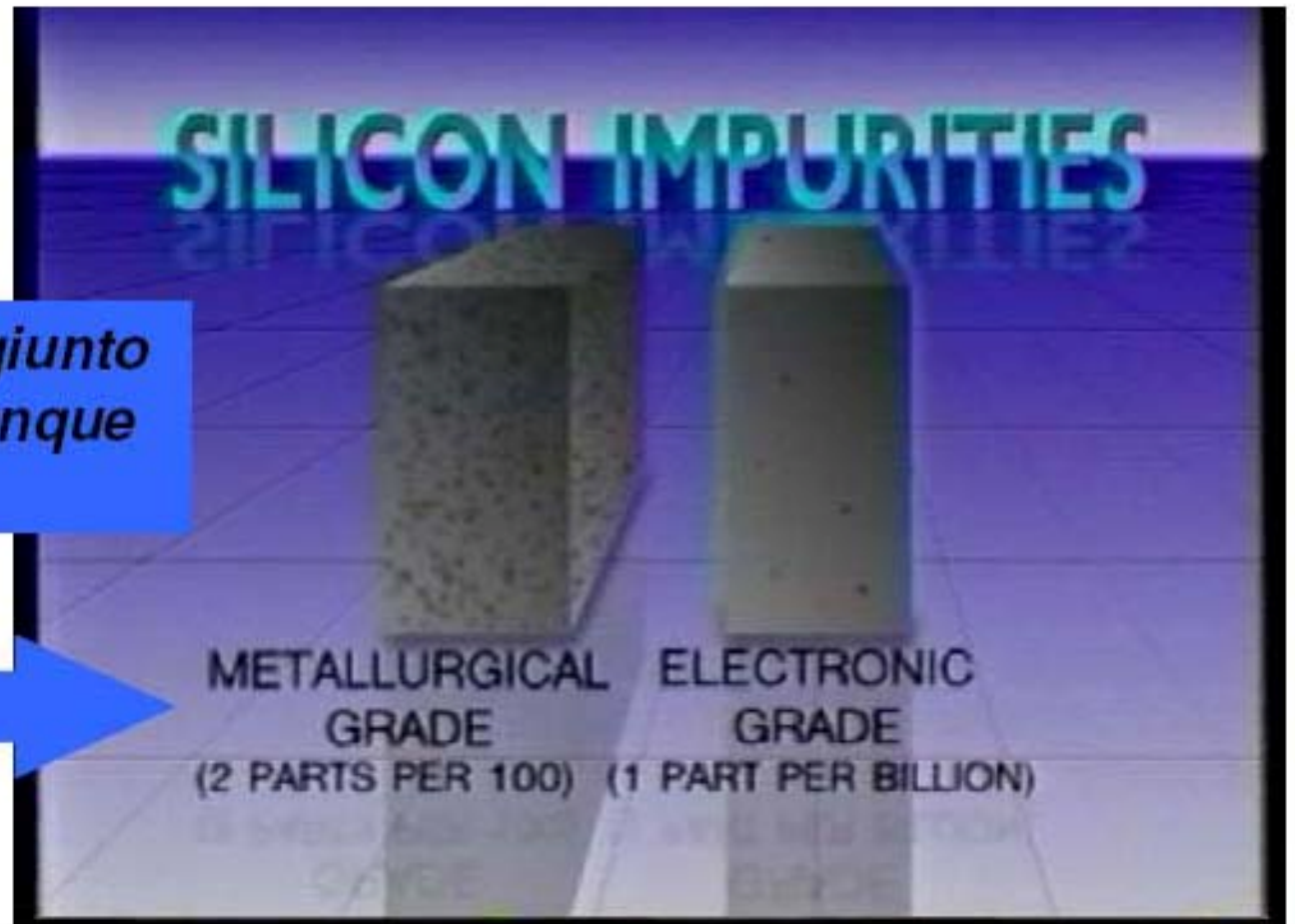
| Tecnologia | m-Si | p-Si | a-Si |
|---------------------|---|--|--|
| η cella tipico | 13 – 16 % | 11 – 13 % | 4 – 6 % 7 – 10 % |
| Vantaggi | <ul style="list-style-type: none"> - η elevato - η stabile - tecnologia affidabile | <ul style="list-style-type: none"> - costo - meno delicati (hot spot) - miglior occupazione | <ul style="list-style-type: none"> - costo - fabbricazione - meno materiale - buon η a G ↓ e luce art. - flessibile - coeff. Voc. f(T) |
| Svantaggi | <ul style="list-style-type: none"> - costo - E grigia - quantità materiale - complesso | <ul style="list-style-type: none"> - complesso - sensibile alle impurità | <ul style="list-style-type: none"> - η basso, che scende - degrado iniziale |

Confronto tra tecnologie (2/2)

| Tecnologia | GaAs arseniuro di Gallio | CdTe Tellurio di cadmio | CdS/CuS solfuro di cadmio e di rame | CuIn Sez. seleniuro di rame e di indio (EnS) |
|---------------------------------------|--|--|--|--|
| η cella tipico | 22 % (labo) | 10 % | 5 % | 12 % (labo) |
| vantaggi | - resiste a Televate - concentr. | - gap ideale | - fabbri- cazione | - molto stabile |
| svantaggi | - tossicità - disp. di materiale | - tossicità - disp. di materiale | - tossicità - sensibile all'umidità | - tossicità (Cd) |

FABBRICAZIONE BARRE DI SILICIO

Grado di purezza raggiunto normalmente in qualunque industria di materiali



La purezza del materiale che si deve avere in campo elettronico è almeno **7 ordini di grandezza** migliore di quella necessaria in altri settori industriali


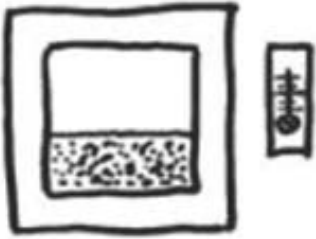

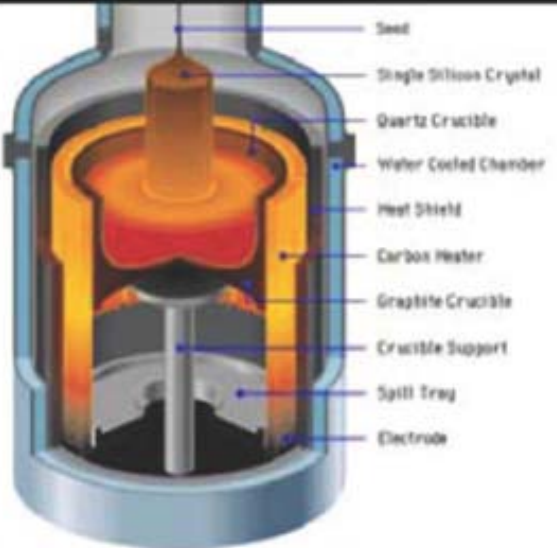

FABBRICAZIONE BARRE DI SILICIO (m-Si)

Estrazione


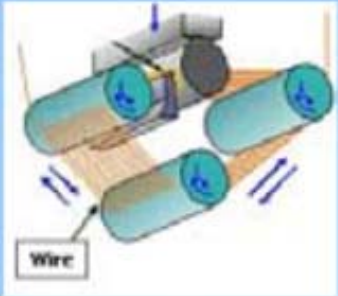
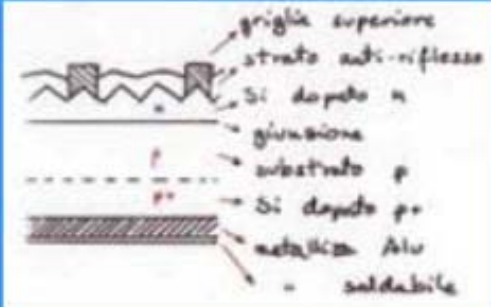


Riduzione

Purificazione

Cristallizzazione

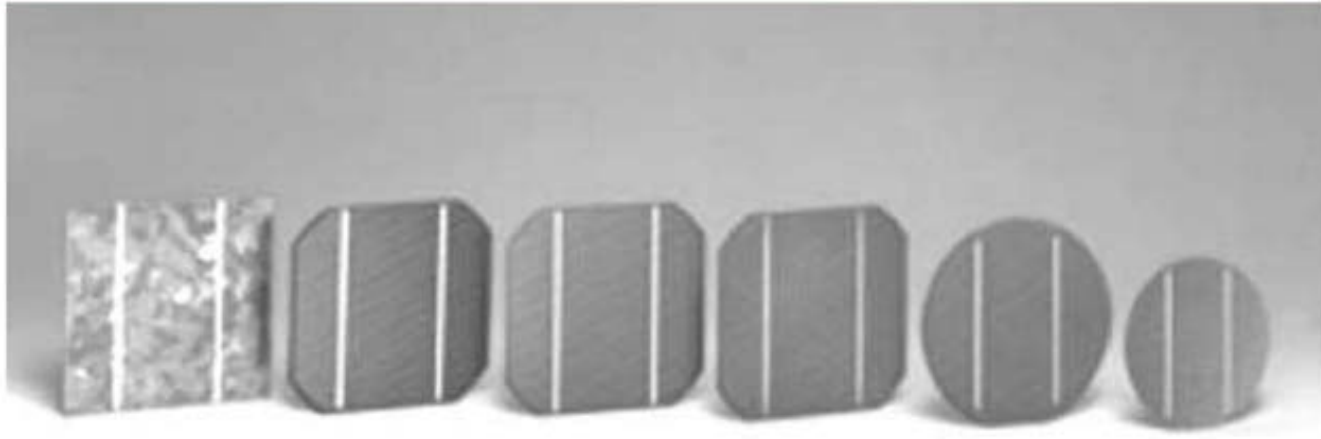
| | | | |
|---|--|--|--|
|  |  |  |  |
| <p>SiO_2 (sabbia di quarzo)</p> | <p>$\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ (silicio metallurgico)</p> | <p>$(\text{Si} + 3\text{HCl} \leftrightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2)$ Triclorosilane ↓ Distillazione</p> | <p>Metodo Czochralski</p>  <p>lingotto di silicio</p> |
| <p>purezza: -</p> | <p>purezza: 98-99 %</p> | <p>purezza: 99.999 %</p> | |

FABBRICAZIONE DELLA CELLA

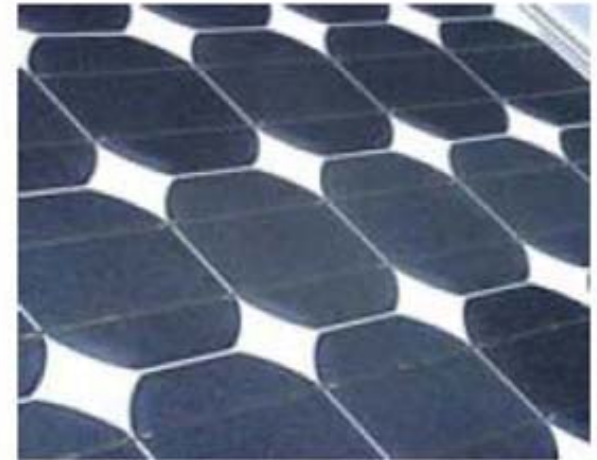
| Fase: | Squadratura | Taglio | Drogaggio Deposito chimico Metalizzazione |
|-------------|--|--|---|
| Operazione: | <p><i>Taglio con lama diamantata</i></p>  | <p><i>Taglio</i></p>  |  |
| Risultato: | <p><i>Barra di silicio</i></p> | <p>« wafers »</p>  | <p>Cella m-Si</p>  |

- Formate a partire dal silicio cristallino
- Spessore wafers: 250-350 μm
- 130-180 μm : limite robustezza
- Proc. richiede molta E (Temp: 400-900 °C)

CARATTERISTICHE FISICHE



- Le **misure** più comuni sono:
10 x 10 cm 12,5 x 12,5 cm 15 x 15 cm
- Le **forme** più comuni sono:
quadrate, quadrate con smussatura
sugli angoli, circolari
- Lo **spessore** tipico è compreso
tra 0.25 e 0.35 mm
- La **potenza** tipica è di ca. 1,5 Watt



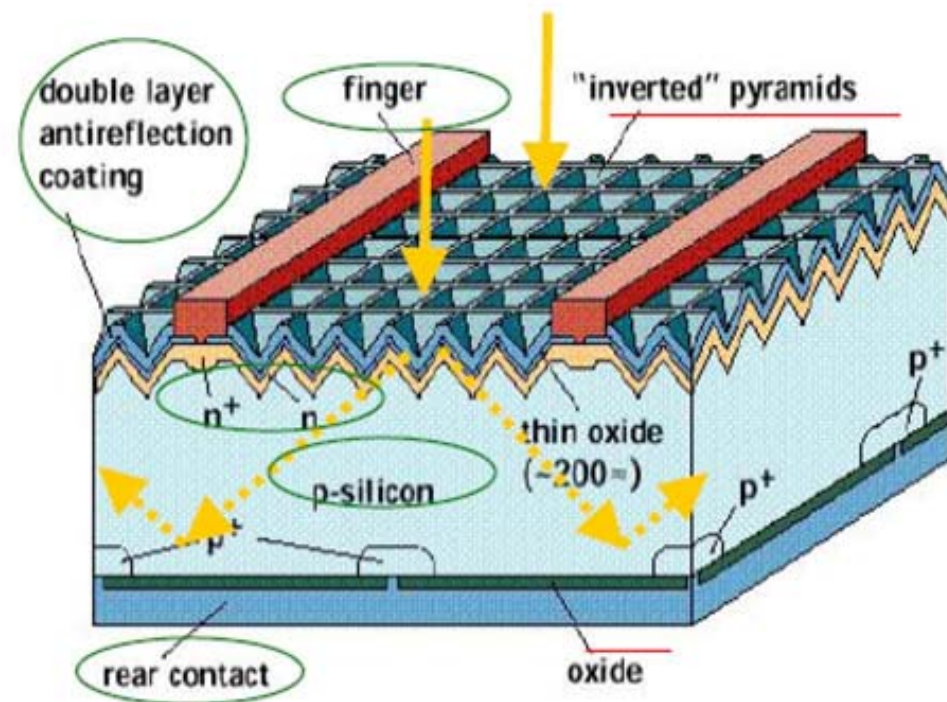
CELLE AD ALTA EFFICIENZA

Struttura piramidale (fronte della cella)

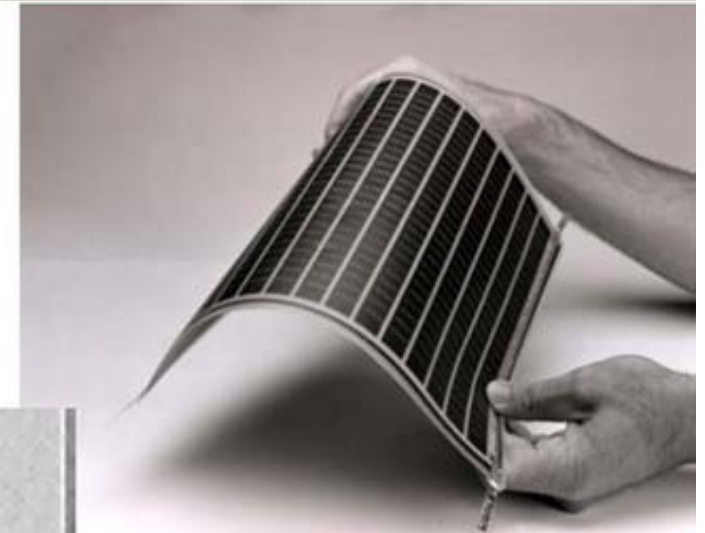
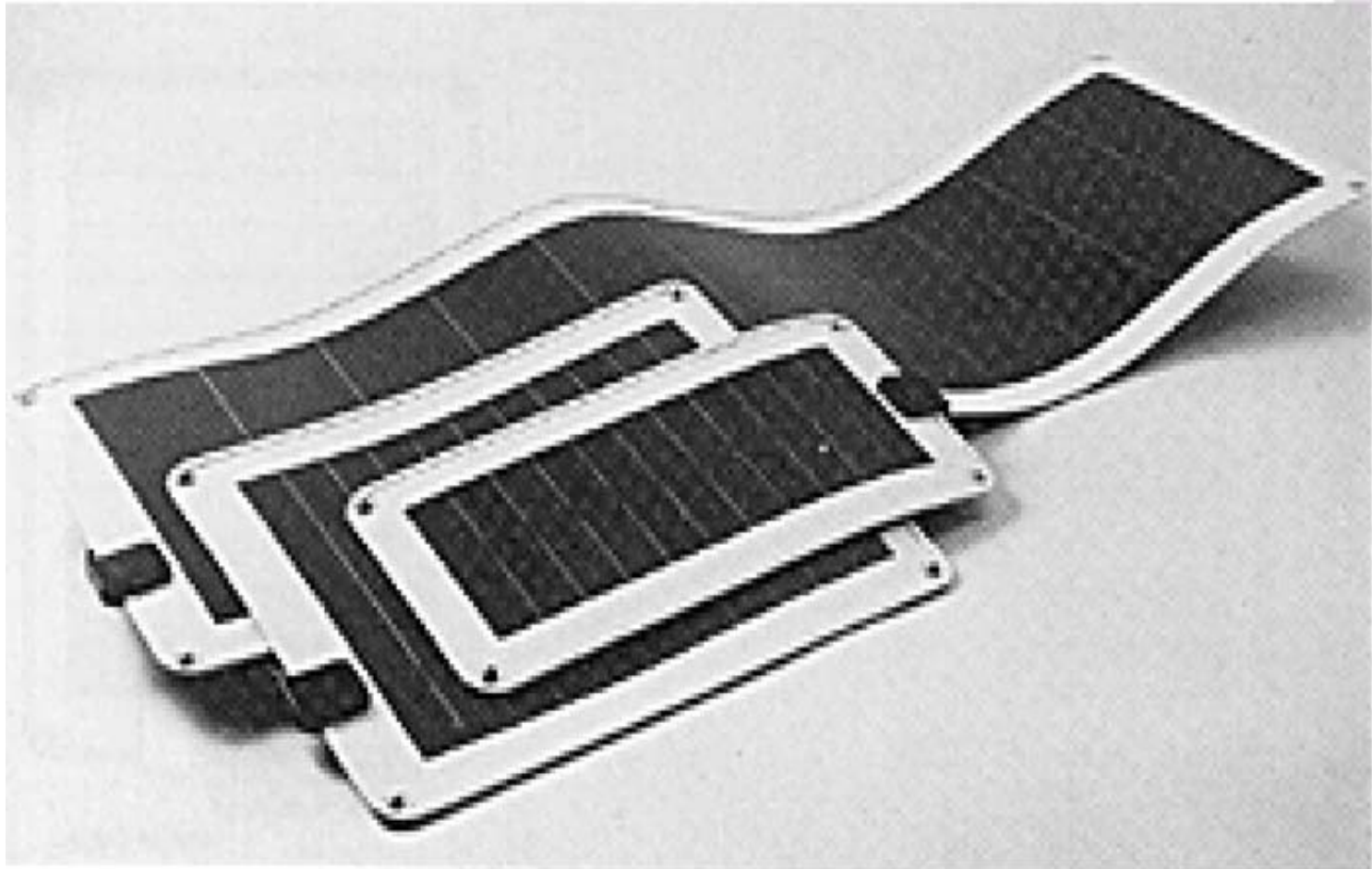
Strato riflettente (retro della cella)

Assorbimento e Riflettanza \uparrow

=> \uparrow efficienza cella FV

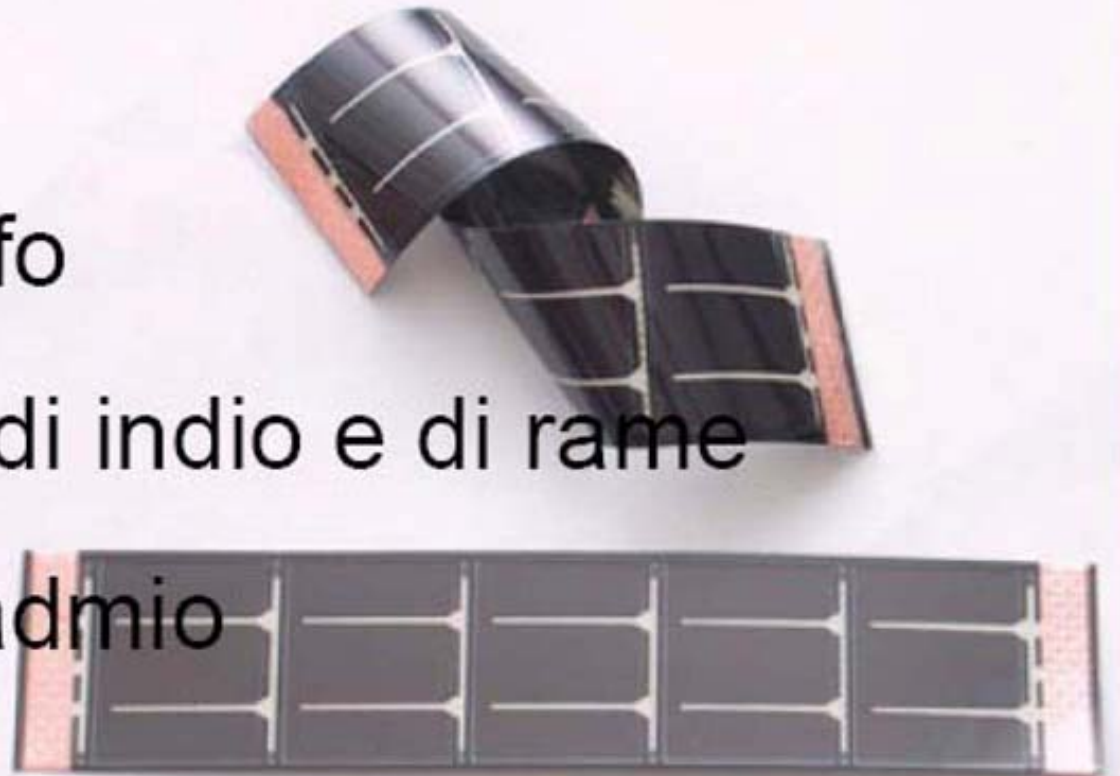


Celle al silicio amorfo – film sottile


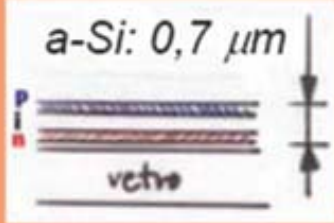



THIN FILM

- a-Si silicio amorfo
- CIS diseleniuro di indio e di rame
- CdTe telluro di cadmio



FABBRICAZIONE CELLA FILM SOTTILE

| Fase: | Metallizzazione superiore | Deposito a-Si | Metallizzazione inferiore |
|-------------|---|--|--|
| Operazione: | Deposito conduttori trasparenti ($0.7 \mu\text{m}$) su substrato p.e. vetro (1.6 mm) | Deposito struttura p-i-n (deposizione al plasma: SiH_4) | Deposito metallizzazione inferiore (Ag) |
| Risultato: |  <p>TCO vetro</p> |  <p>a-Si: $0,7 \mu\text{m}$ vetro</p> | <p>Cella a-Si</p>  <p>$< 2\text{mm}$</p> |

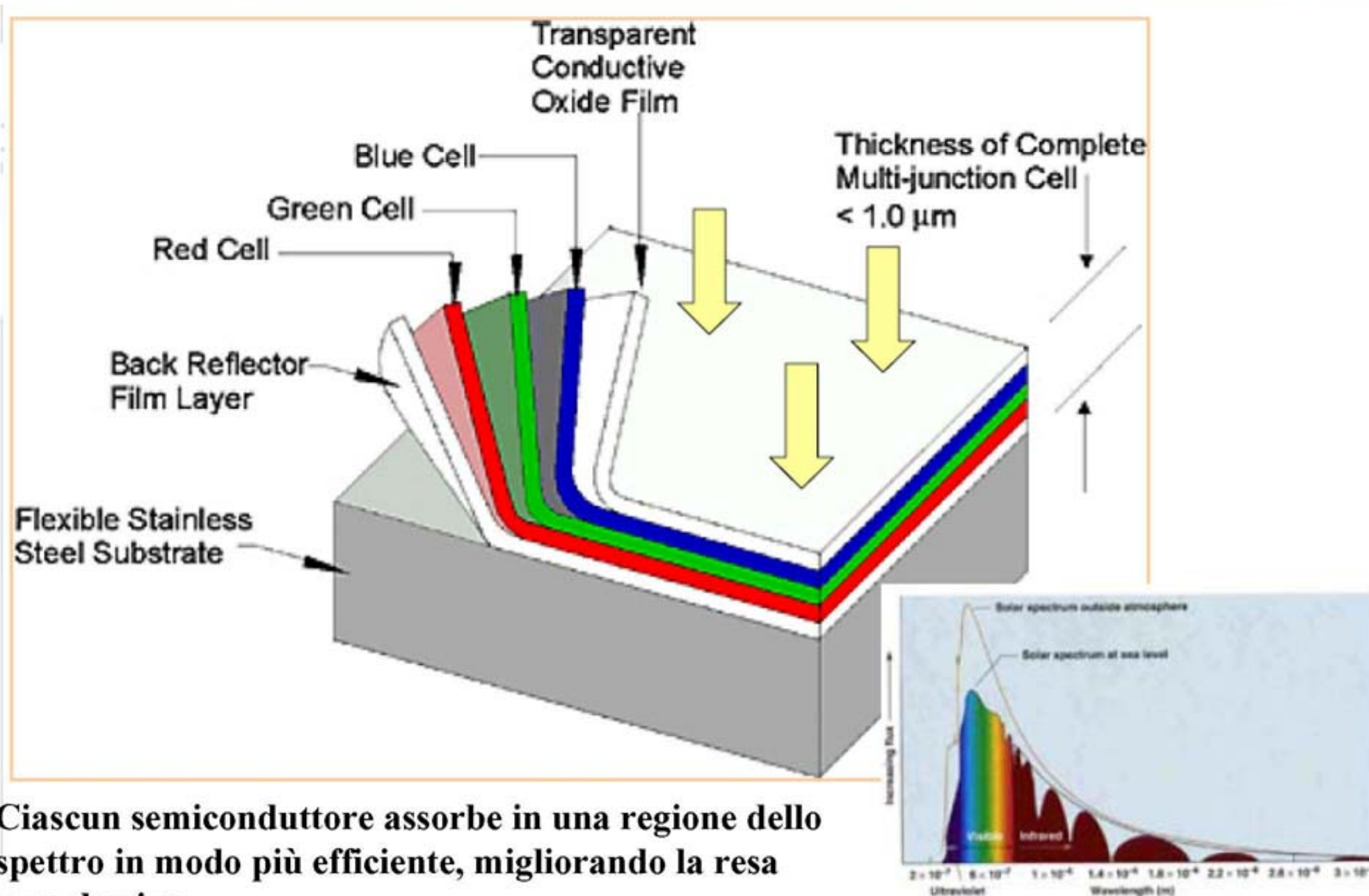
Formate a partire dal silicio gassoso (silano)

Basta $1 \mu\text{m}$ per captare tutto lo spettro

Costi di produzione contenuti (basso consumo di mat.)

Possibile realizzare strutture a giunzione multipla

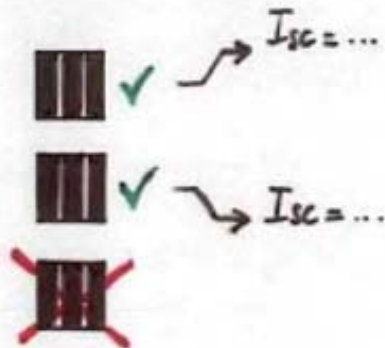
STRUTTURA A GUNZIONE MULTIPLA



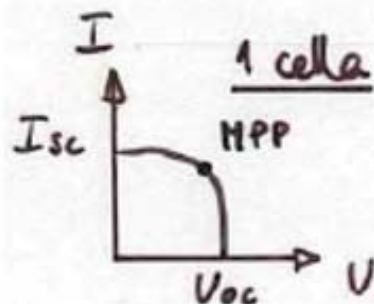
Ciascun semiconduttore assorbe in una regione dello spettro in modo più efficiente, migliorando la resa complessiva

FABBRICAZIONE DEI MODULI

Test e triage celle



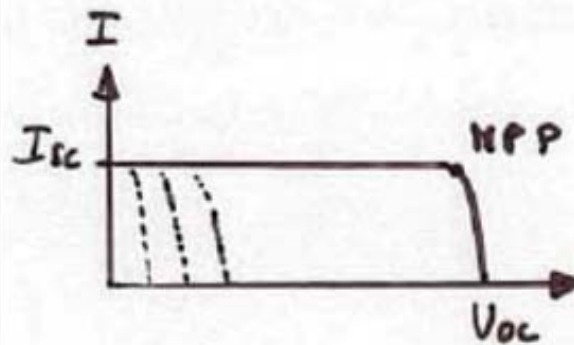
- controllo ottico
- test foto-elettrico
- misura I_{sc}



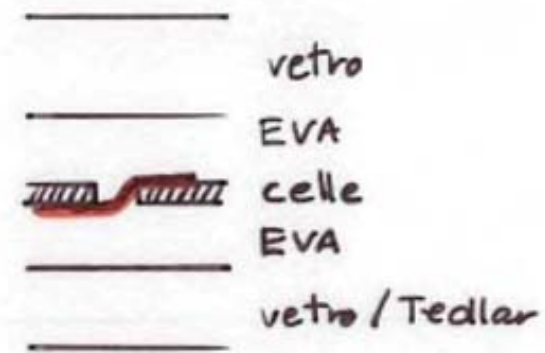
Collegamento in serie delle celle



*messa in serie di celle
con I_{sc} uguale*



Connessioni elettriche e Assemblaggio

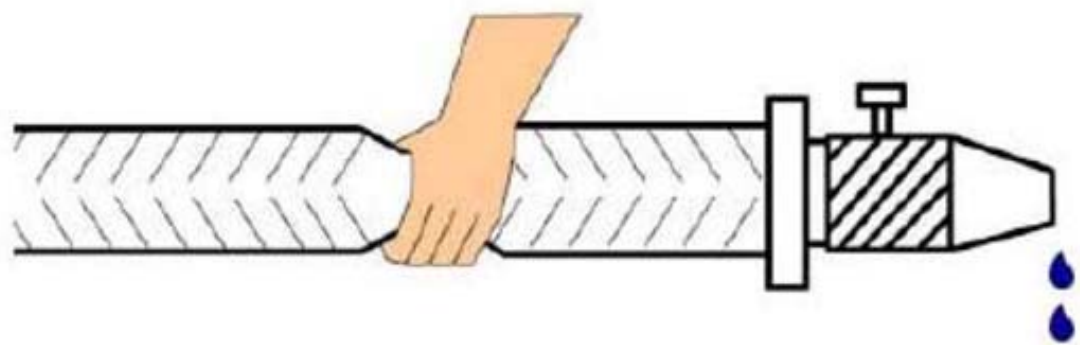
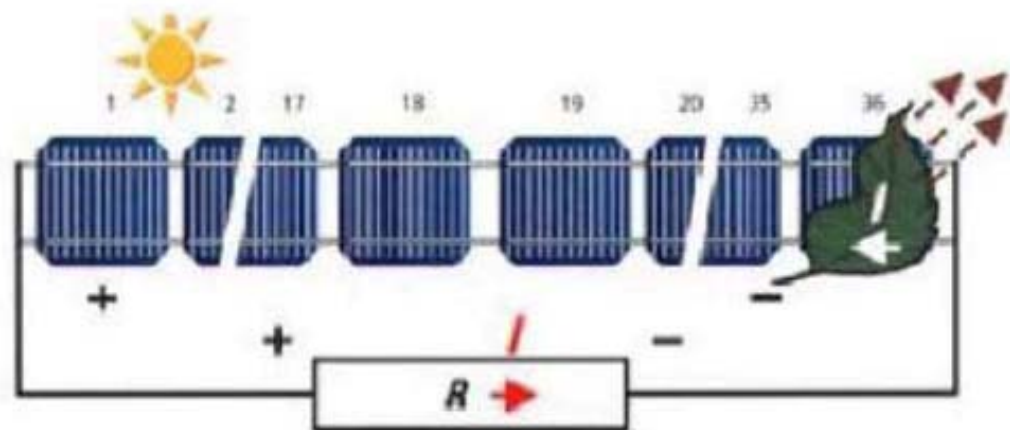


*EVA = etilvenilacetato
(diventa trasparente
tramite polimerizzazione)*



COLLEGAMENTO IN SERIE DELLE CELLE

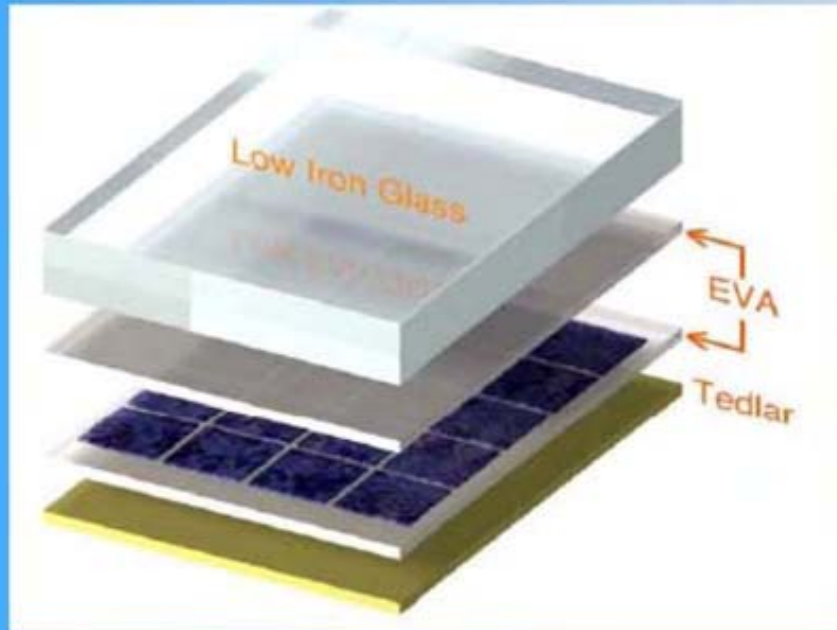
La cella meno efficiente
limita tutte le altre !



Mismatch:

$$P_{\max} \text{ modulo} < \sum P_{\max} \text{ celle}$$

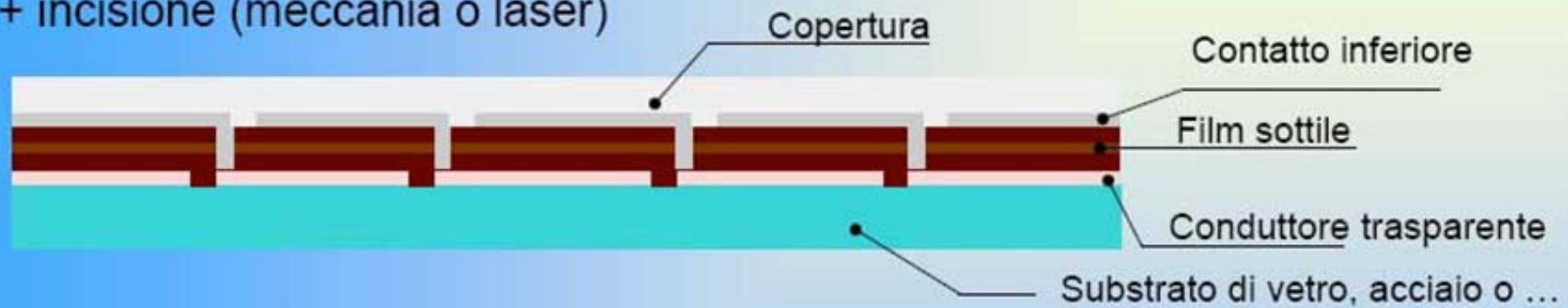
Moduli cristallini sandwich FV (c-Si)



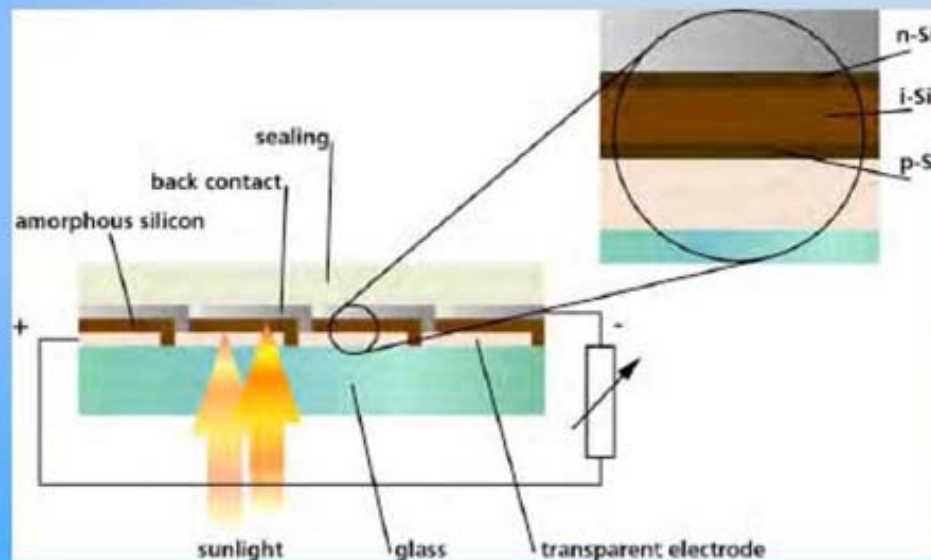
- Sigillante: fissaggio celle al vetro di copertura e alla chiusura posteriore
- Processo di laminazione: 150 °C, sigillatura dei componenti
- Protezione dagli agenti atmosferici (grandine, pioggia, umidità)
- Tenuta meccanica (vento, dilatazioni termiche, ...)
- Essenziali per garantire una durata di vita elevata dei moduli

Fabbricazione di moduli FV: I film sottili

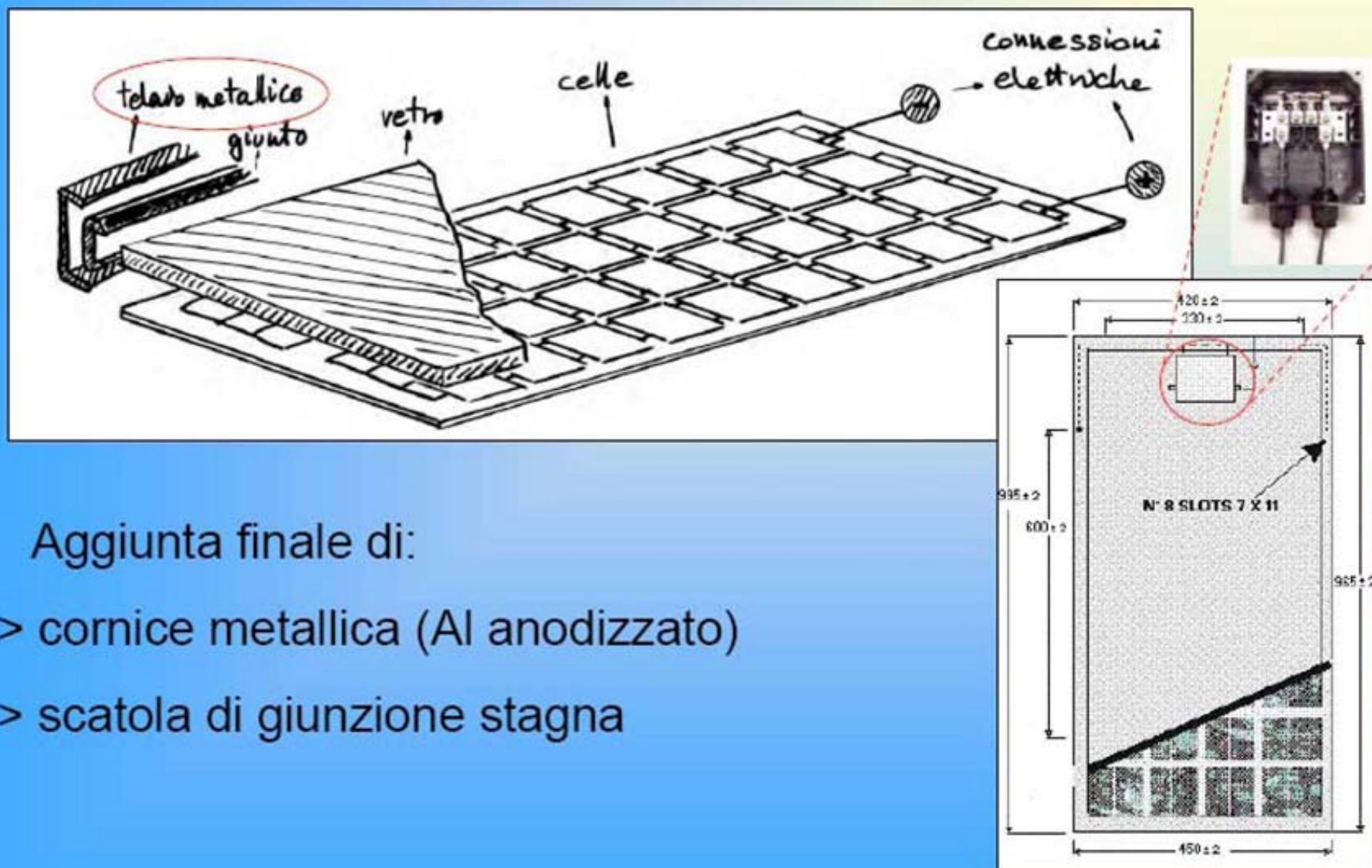
- > Deposizione
- + incisione (meccanica o laser)



Modulo Thin Film:
collegamento
in serie di singole
celle longitudinali



Moduli cristallini



Aggiunta finale di:

- > cornice metallica (Al anodizzato)
- > scatola di giunzione stagna

moduli cristallini



Tedlar / EVA / Vetro

- Condizioni limite di utilizzo tipiche**
(specificate dal produttore per ogni tipologia):
- > T_{amb} dove il modulo può operare: -40 / +50 °C
 - > Escursione termica sopportata: -40 / +90 °C
 - > Carico massimo distribuito applicabile: 5.400 Pa
 - > Umidità relativa dell'aria: 0 – 100 %
 - > Resistenza alla grandine: 25 mm diametro, 23 m/s



Modulo laminato (senza cornice)

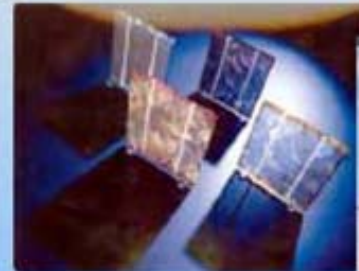
CARATTERISTICHE FISICHE

Moduli semitrasparenti

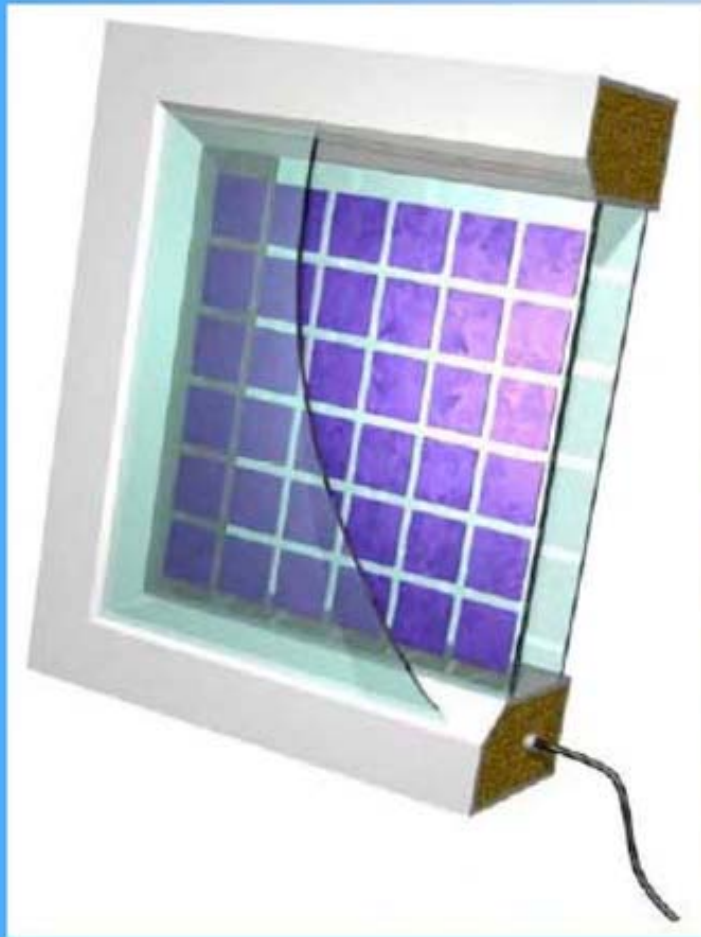


Vetro / EVA / Vetro

Celle semitrasparenti



Modulo semitrasparente incorporato in finestra a doppio vetro



Caratteristiche:

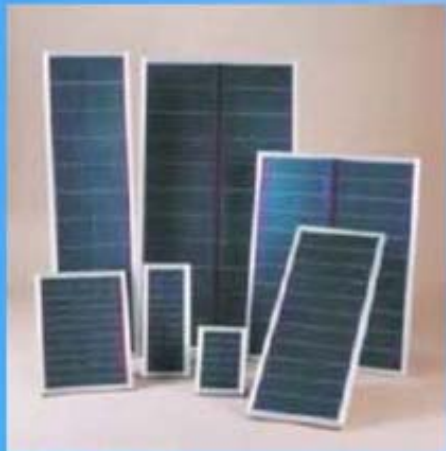
- Isolamento termico
- Filtraggio di luce

Applicazioni:

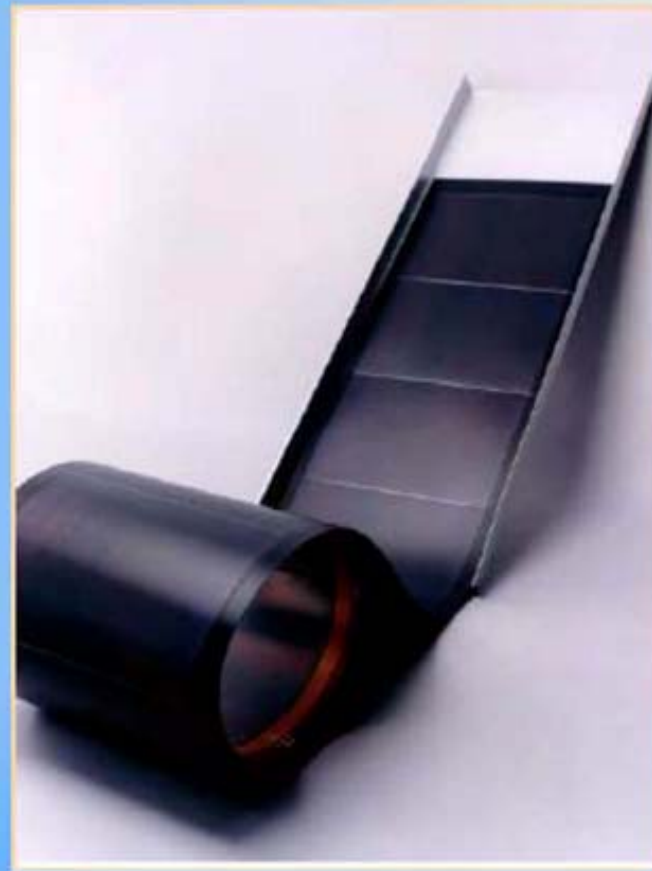
- Facciate sud
- Tetti

Moduli *thin film*

Senza vetro



Substrato: acciaio
Copertura: polimero
(non vetro)



Flessibile

Semitrasparente



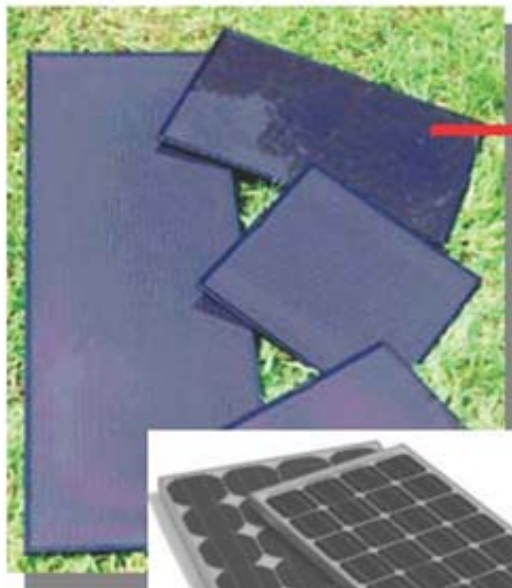
Substrato: vetro
Copertura: vetro

CARATTERISTICHE FISICHE



*Moduli al silicio
amorfo flessibili*

*Moduli al silicio
multicristallino*

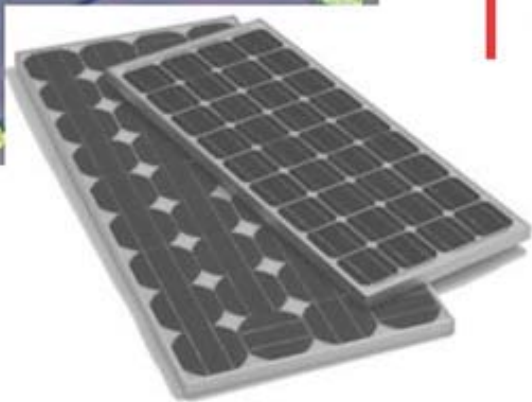


*Moduli al silicio
amorfo rigidi*

*Moduli al silicio
multicristallino
portatili*



*Moduli al silicio
monocristallino*



Tegole solari



Moduli fotovoltaici



Scatola di connessione
con diodi di by-pass

Cornice in alluminio

Vetro temperato
ad alta trasparenza

Eva

Celle

Stringhe di celle
fotovoltaiche in serie

Tedlar





Primi moduli (per sistemi autonomi)

36 celle in serie (4x9 o 3x12)

40-50 Watt

0.5 m²

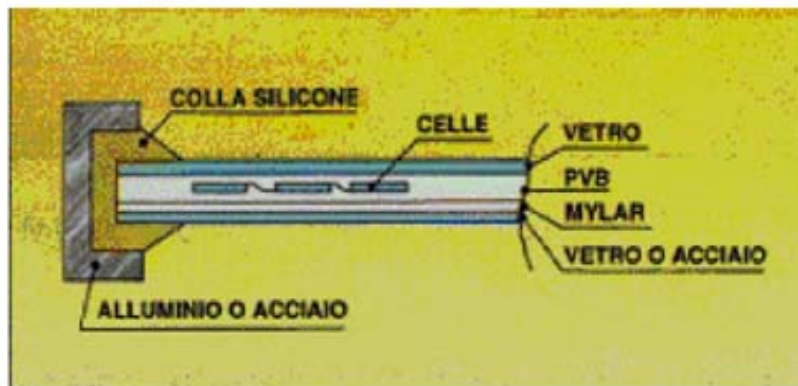
I moduli oggi :

1. Minimoduli o tegole solari (2-12 celle / 2-50 Watt)
2. Tradizionali allacciati alla rete (100-200 Watt)
(no. celle: multipli di 36)
3. Per facciate (100-300 Watt)
(no. celle: variabile, secondo caratteristiche facciata)

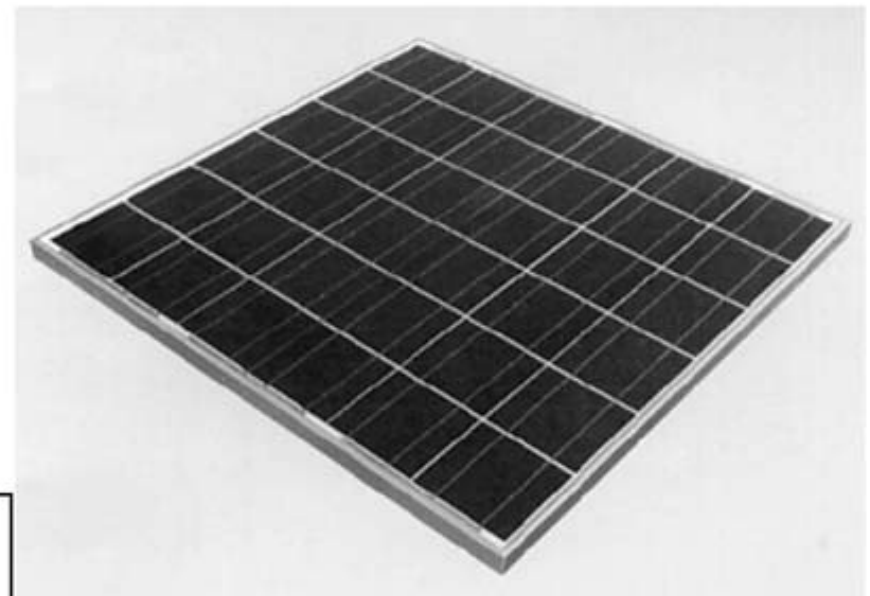
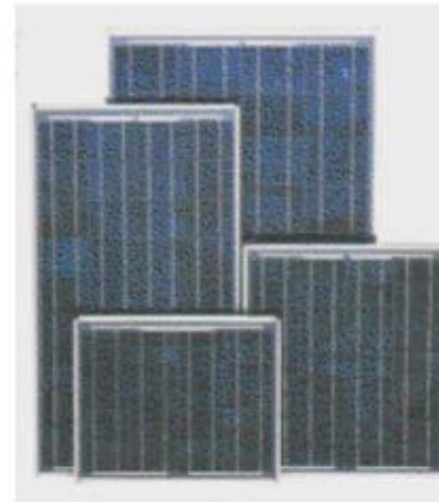


MODULO FOTOVOLTAICO

- Le celle fotovoltaiche vengono commercializzate sotto forma di **moduli** fotovoltaici.
- I moduli sono costituiti da una cornice (generalmente in alluminio anodizzato) coperta da uno strato di vetro con particolari caratteristiche in termini di resistenza meccanica, trasparenza ed antiriflessione, all'interno della quale trovano alloggio le celle.



Le celle **possono essere collegate in serie o serie-parallelo**, in modo da ottenere il voltaggio desiderato.

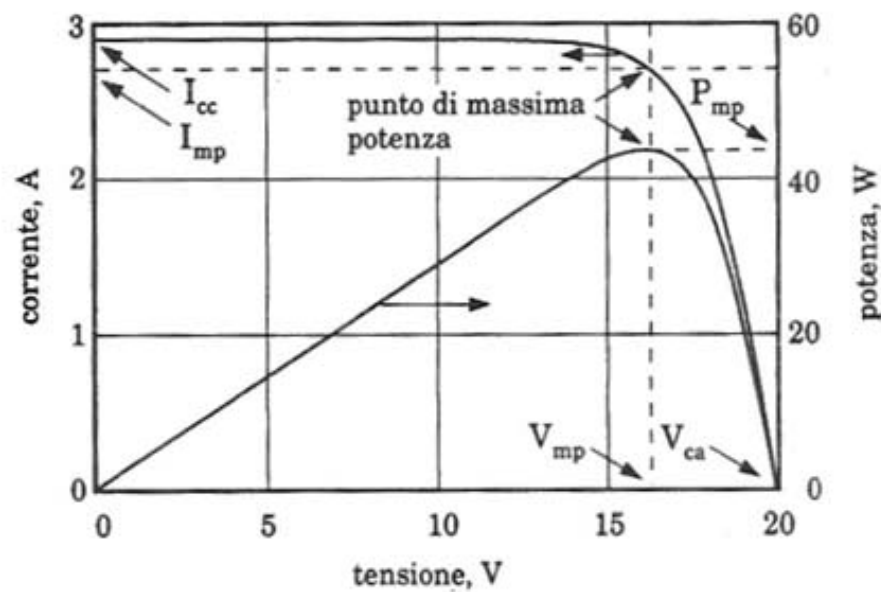
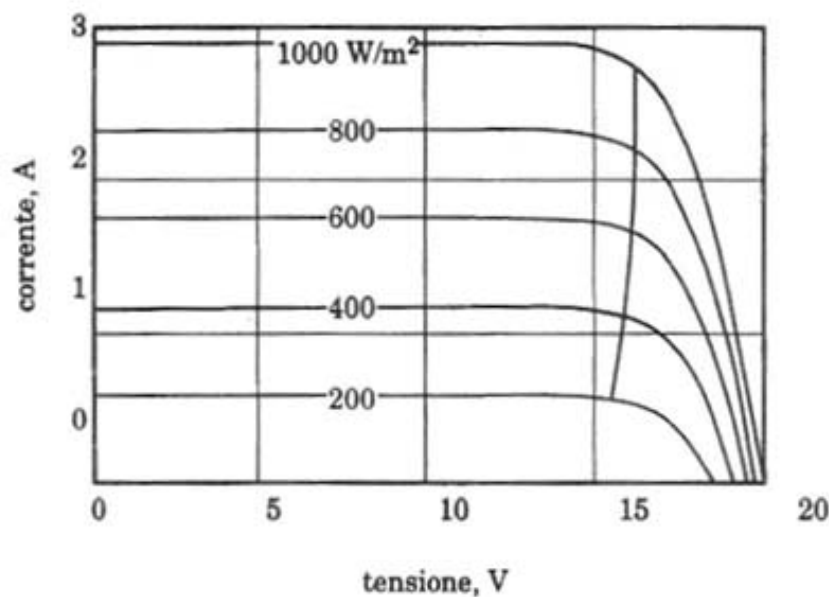


MODULO FOTOVOLTAICO

Caratteristiche del modulo fotovoltaico - struttura tipica:

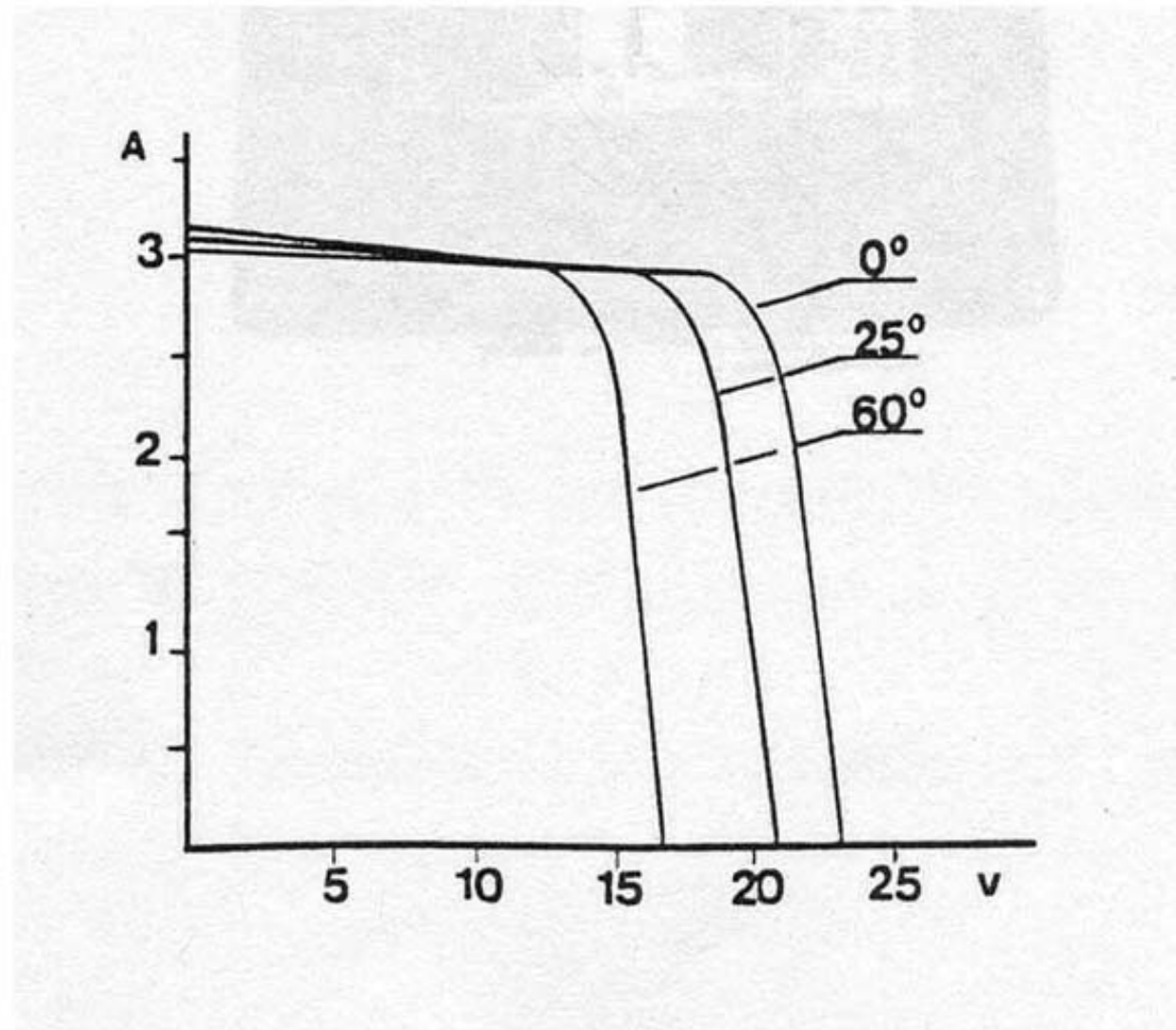
- 36 celle disposte su 4 file parallele e collegate in serie
- potenza erogata circa $40 \div 50 \text{ W}$
- tensione di lavoro ai morsetti circa 17 V

efficienza di conversione pari al $12\% \div 13\%$



curva caratteristica del modulo (silicio monocristallino)

Variazione della caratteristica con la temperatura del modulo

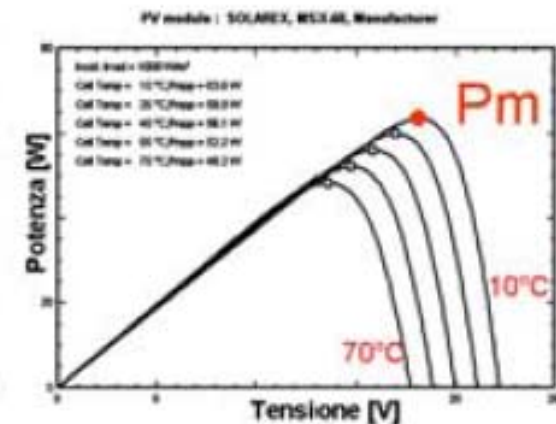
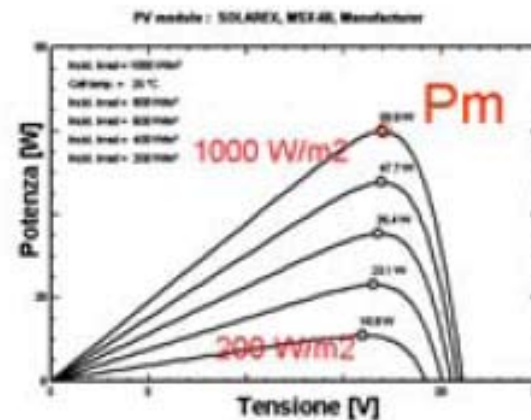


Fattori che influenzano il funzionamento di un modulo FV

Irraggiamento
Temperatura
Area

Spettro della radiazione solare
Angolo d'incidenza, riflessioni

...



Caratteristiche elettriche di un modulo

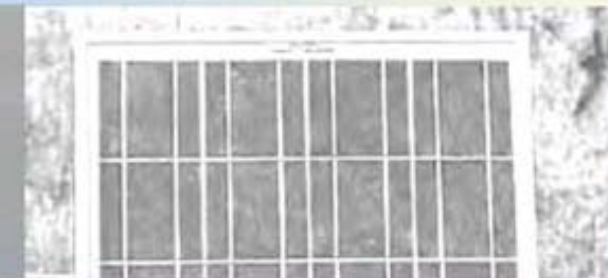
PHOTOVOLTAIC MODULE

Electrical Specifications
(at 100 mW/cm², 25°C, AM 1,5)

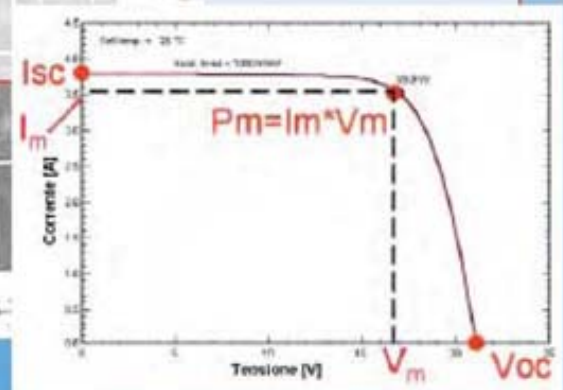
| | | |
|-----------------------|-----------|-----------|
| Peak Power | 80 | WP |
| Short Circuit Current | 5,40 | Amps |
| Open Circuit Voltage | 20,9 | Volts |
| Voltage at Max Power | 17,0 | Volts |
| Current at Max Power | 4,70 | Amps |
| Noct | 43 | °C |

Dimensions mm 565x1250x34 +/- 1 mm
Output Values are +/- 10%
Module tested at 3500 Vdc

MODULE CERTIFIED TO CEC Spec. 503 by JRC ISPRA
20 years limited output guarantee.
Specifications are subjected to change without notice

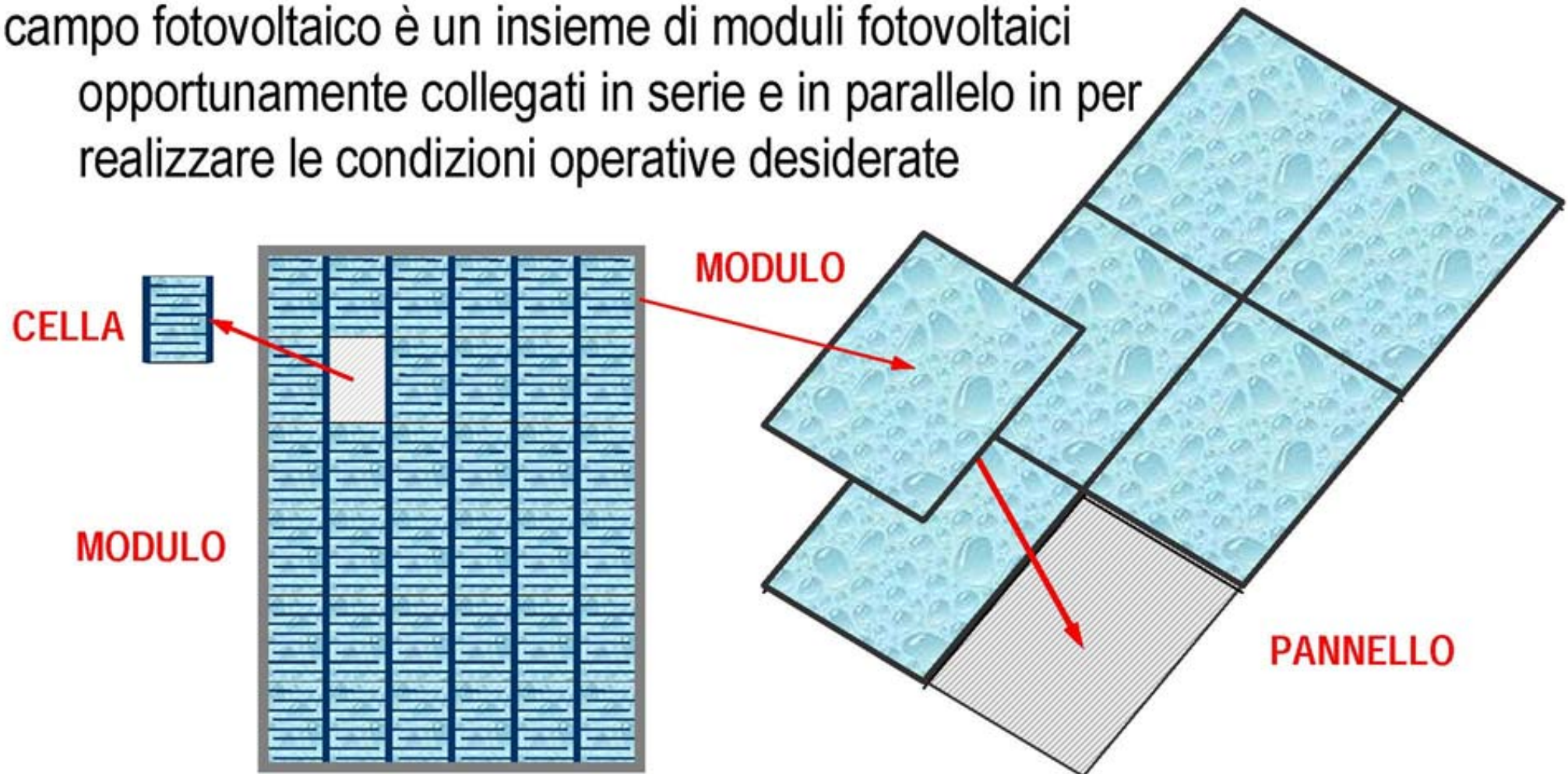


- **Potenza di picco: Pm**
- Corrente di corto circuito: Isc
- Tensione a vuoto: Voc
- Tensione al punto di massima potenza: Vm
- Corrente al punto di massima potenza: Im
- Temperatura nominale di funzionamento di una cella: NOCT
- Dimensioni modulo
- Tolleranza valori
- Garanzie



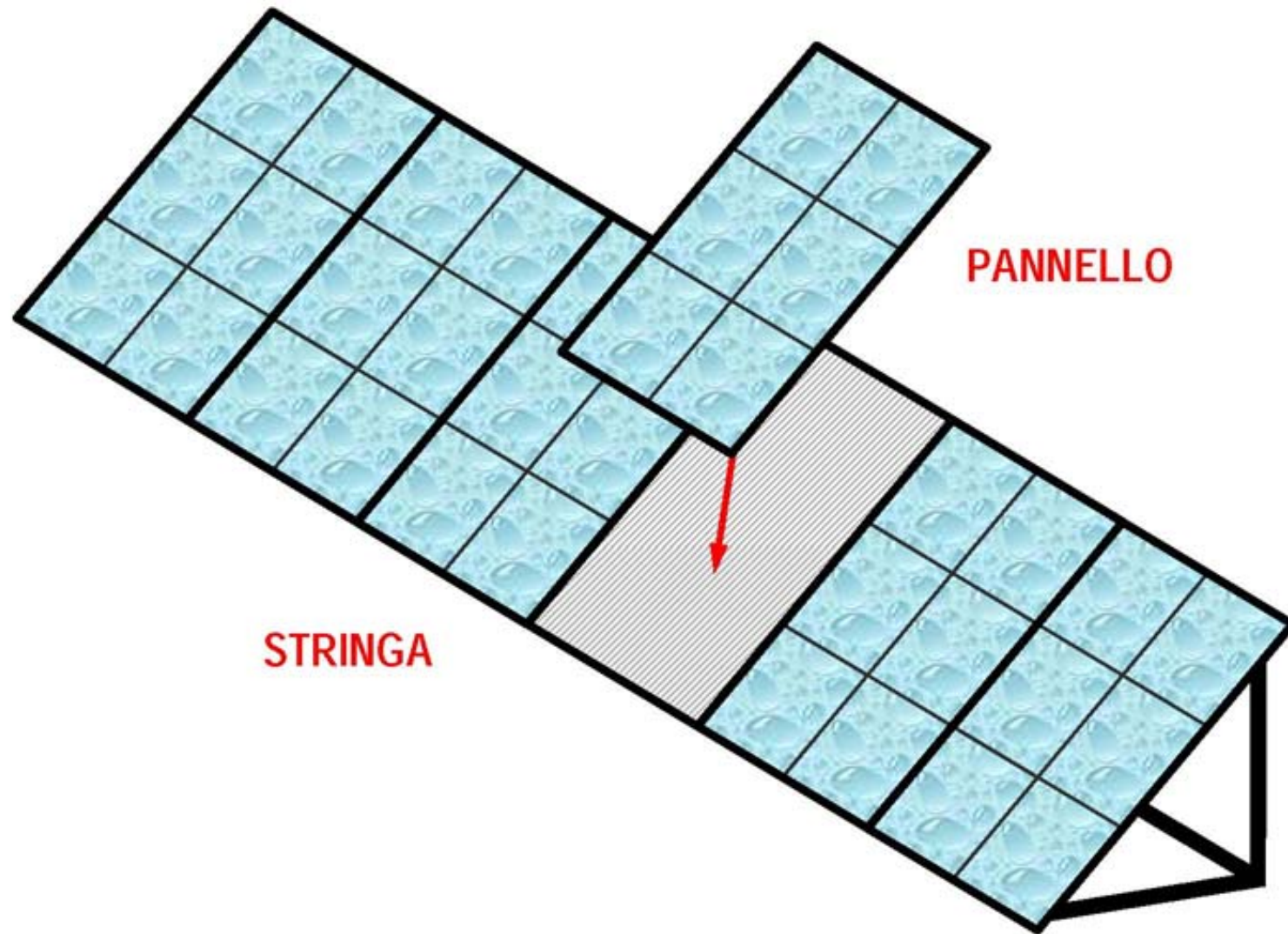
Il Campo Fotovoltaico

Il campo fotovoltaico è un insieme di moduli fotovoltaici opportunamente collegati in serie e in parallelo in per realizzare le condizioni operative desiderate



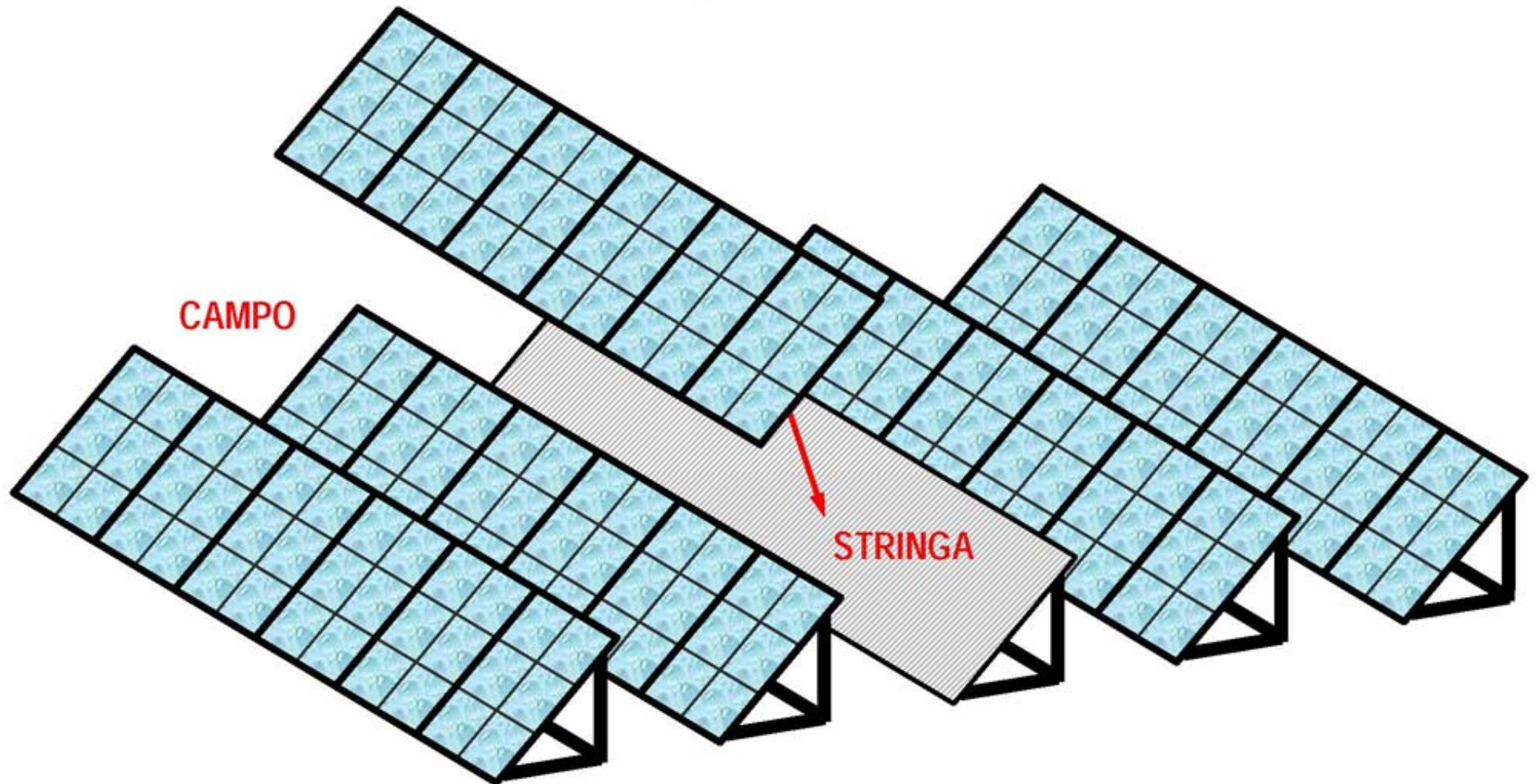
CAMPO FOTOVOLTAICO

Il Campo Fotovoltaico

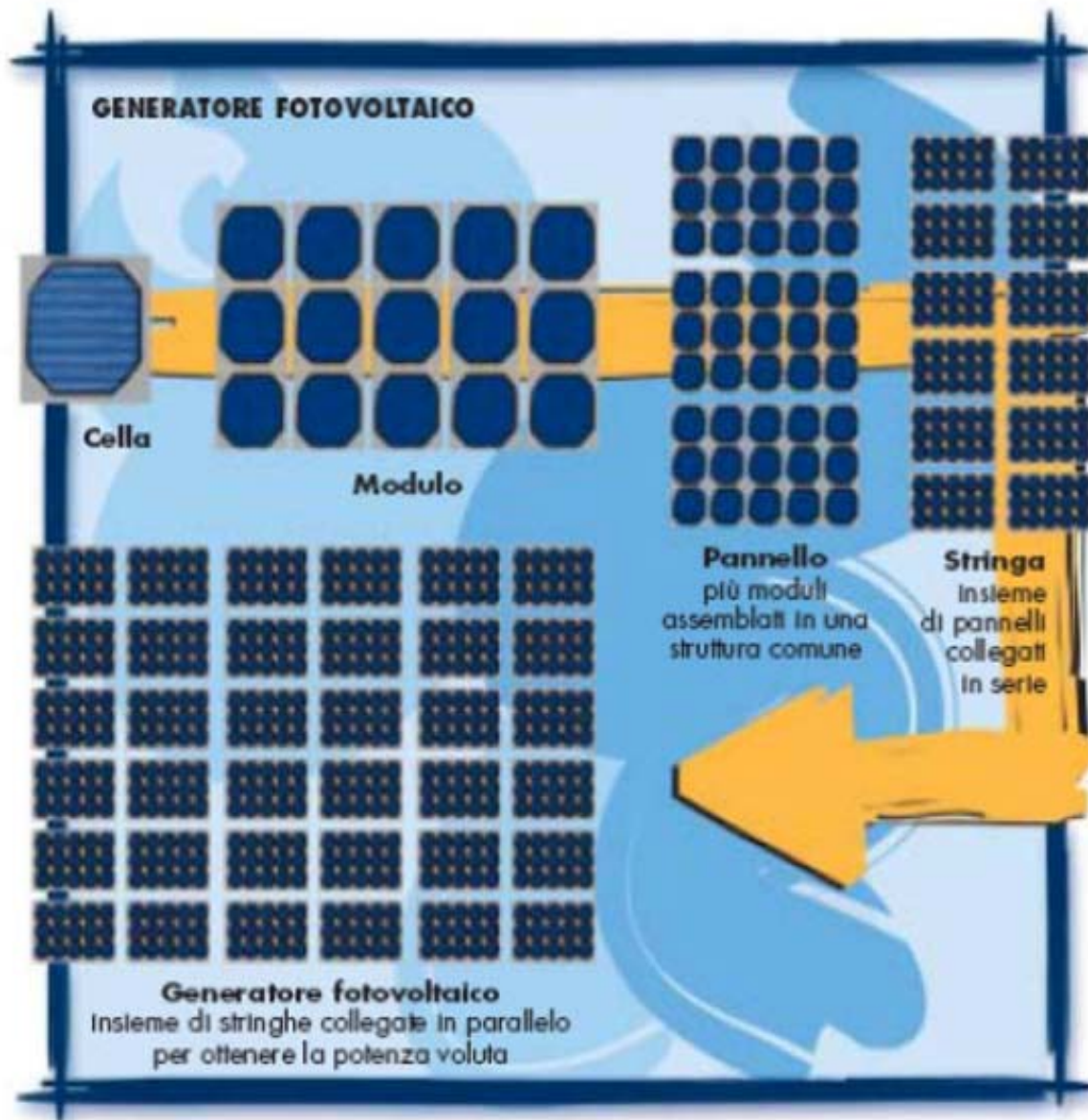


CAMPO FOTOVOLTAICO

Il Campo Fotovoltaico



Moduli fotovoltaici

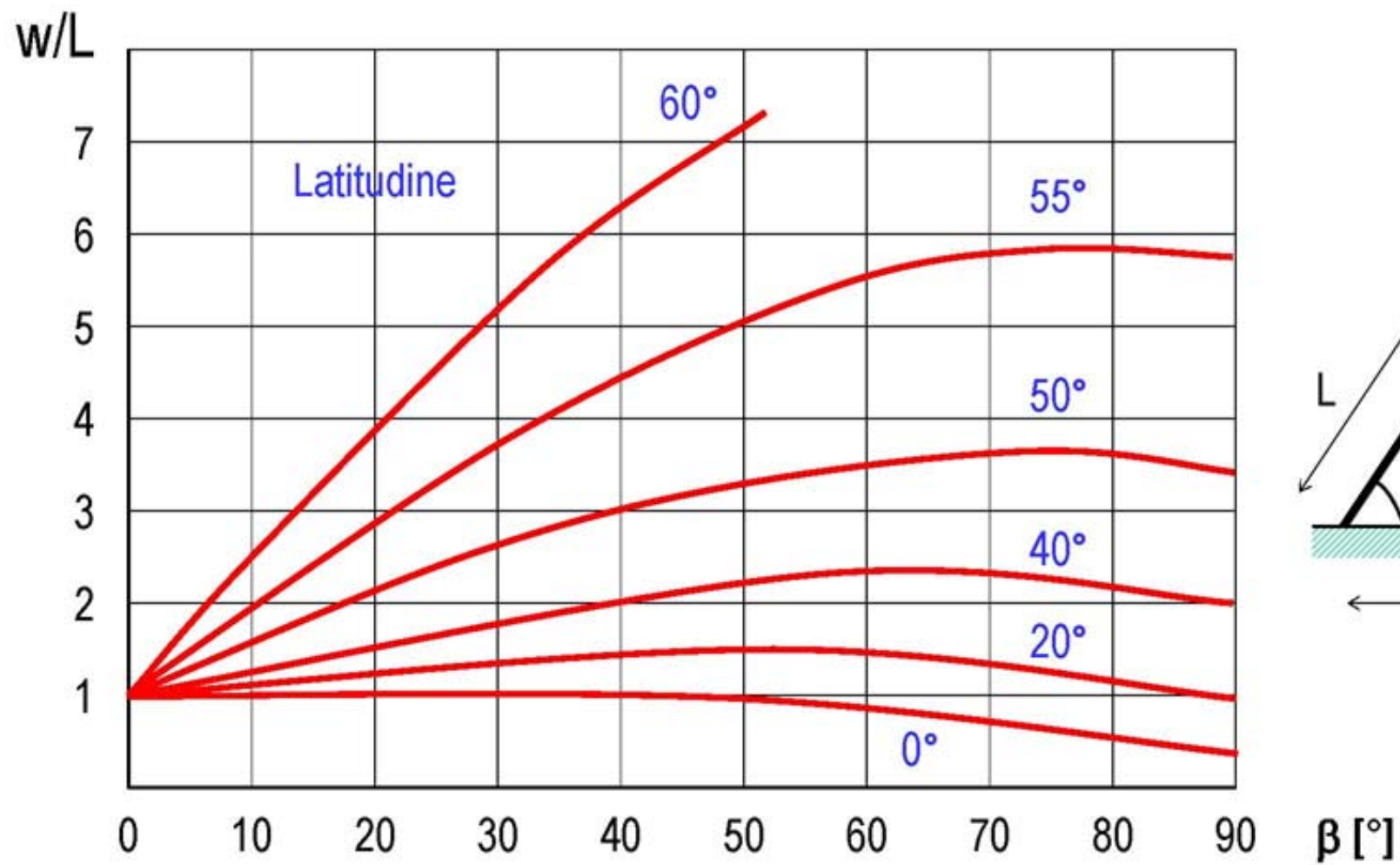


Un modulo fotovoltaico è composto da un insieme di celle connesse in serie (per aumentare la tensione) e in parallelo (per aumentare la corrente).

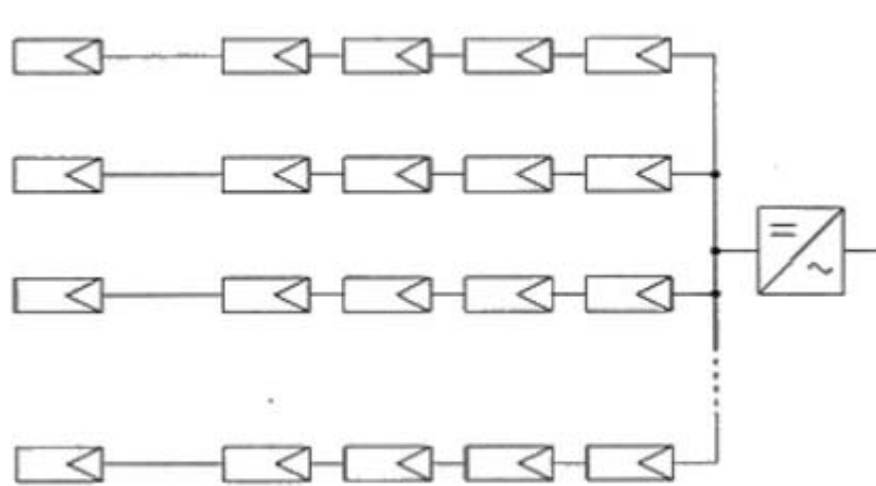
L'efficienza complessiva del modulo è sempre leggermente inferiore a quella delle celle.

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

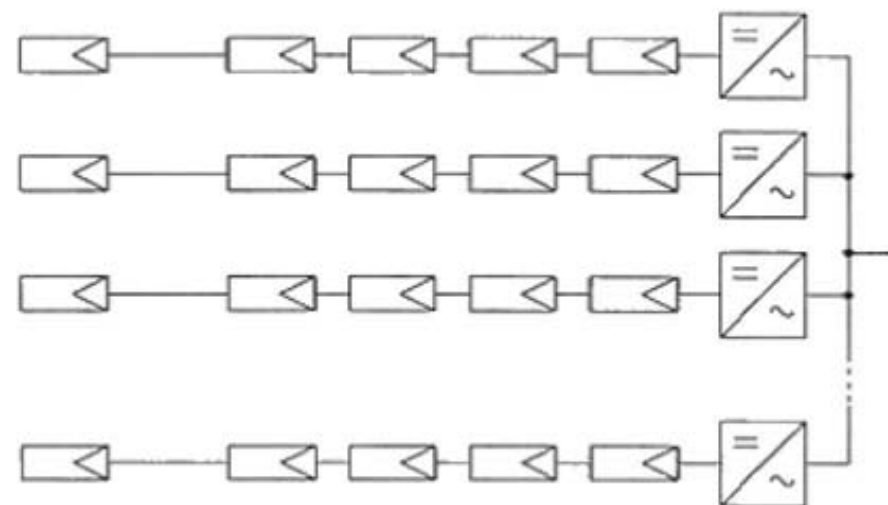
(Minima distanza tra le file w) / (Lunghezza dei pannelli L)



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



Conversione centralizzata

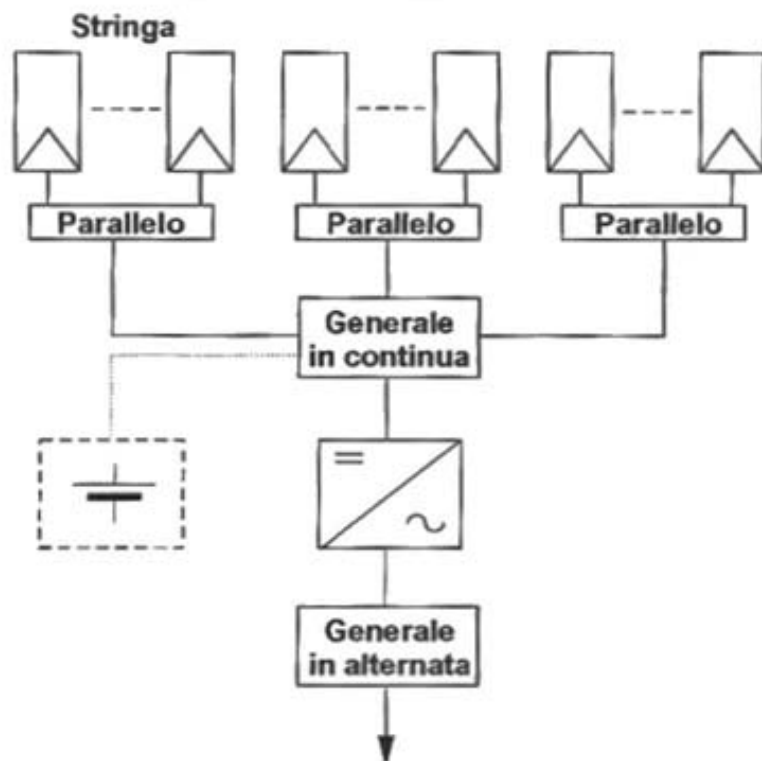


Conversione di stringa

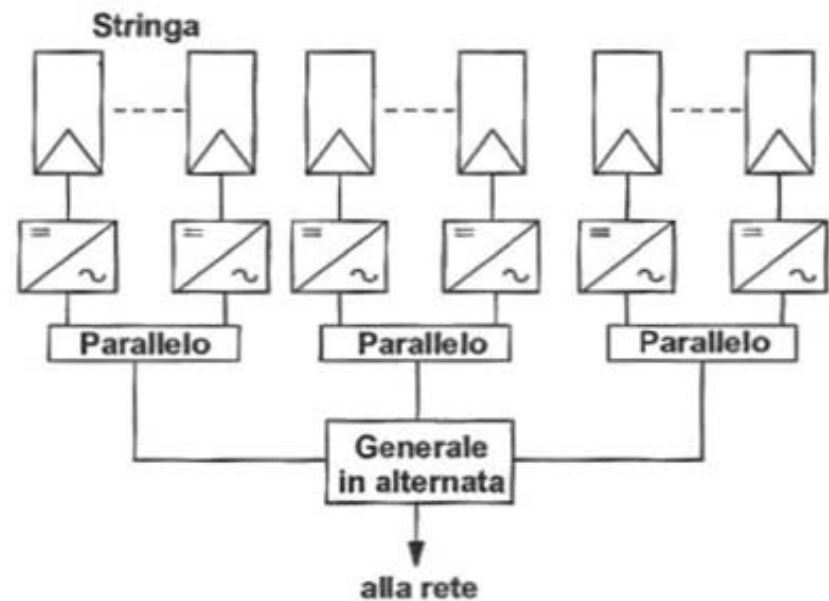
Conversione CC-CA **centralizzata** un solo inverter per il generatore
una maggiore estensione della rete in CC

Conversione CC-CA per ogni **stringa** un inverter per ogni stringa
minore estensione della rete in CC sistema più modulare

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



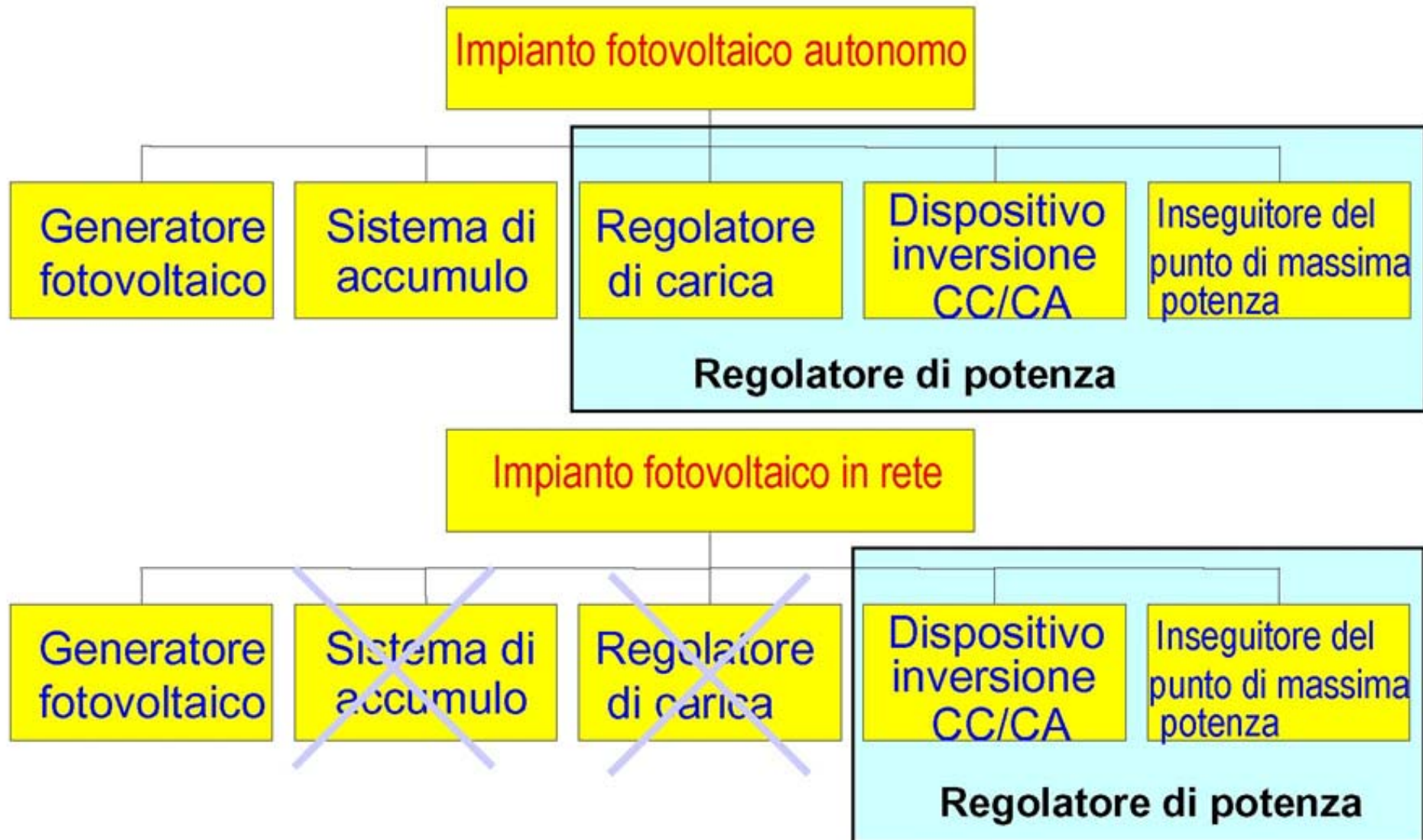
Conversione CC-CA **centralizzata**



Conversione CC-CA per ogni **stringa**

Influenza dell'architettura sull'organizzazione dei quadri elettrici

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



Generatore: Rendimento

Il **rendimento** del generatore dipende da:

rendimento dei singoli pannelli o moduli

le perdite per scostamento delle condizioni di funzionamento effettive da quelle nominali **(5÷8%)**

temperatura diversa da quella standard (25°C)

irradianza solare diversa da quella standard (1000 W/m²K)

perdite per riflessione della radiazione solare incidente

il rendimento nominale è misurato per radiazione incidente perpendicolare, mentre in realtà l'angolo d'incidenza e quindi la quota riflessa variano in funzione dell'ora del giorno; **(3%)**

le perdite di mismatch tra le stringhe

in una **serie** di moduli la corrente è limitata dal modulo che eroga l'ampereaggio più basso, mentre in un **parallelo** è il voltaggio ad essere limitato dal modulo che ha la tensione di lavoro minore

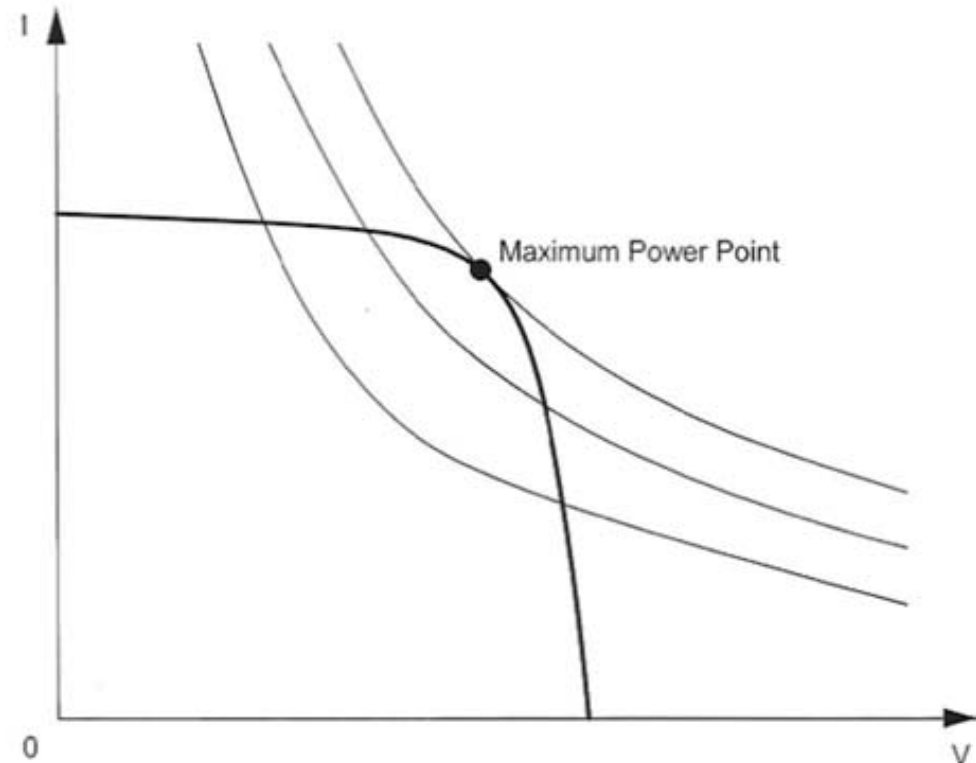
tale fenomeno può arrivare a provocare perdite dell'ordine del **5-10%** della potenza nominale, che possono, tuttavia, essere sensibilmente ridotte studiando una opportuna e specifica configurazione serie - parallelo del generatore

Inseguitore di Massima Potenza

L'inseguitore del punto di massima potenza MPPT è un dispositivo composto di un **convertitore CC/CC** con **rapporto di trasformazione k variabile** e da un sistema di regolazione che, in base alla richiesta di carico, agisce sul k **massimizzando la potenza trasferita** dal campo fotovoltaico in quella situazione di irradianza e temperatura. Esso fa in

modo che il generatore "veda" sempre ai suoi capi un carico ottimale.

Il punto di massima potenza è individuato dalla tangenza dell'iperbole $I \cdot V = cost$ (potenza costante) con la curva caratteristica.

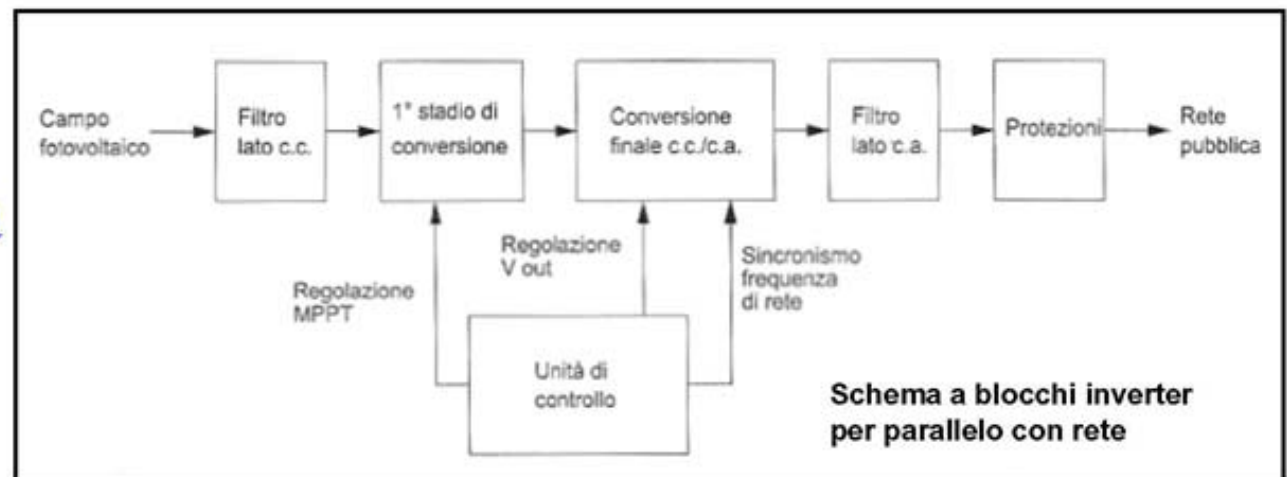
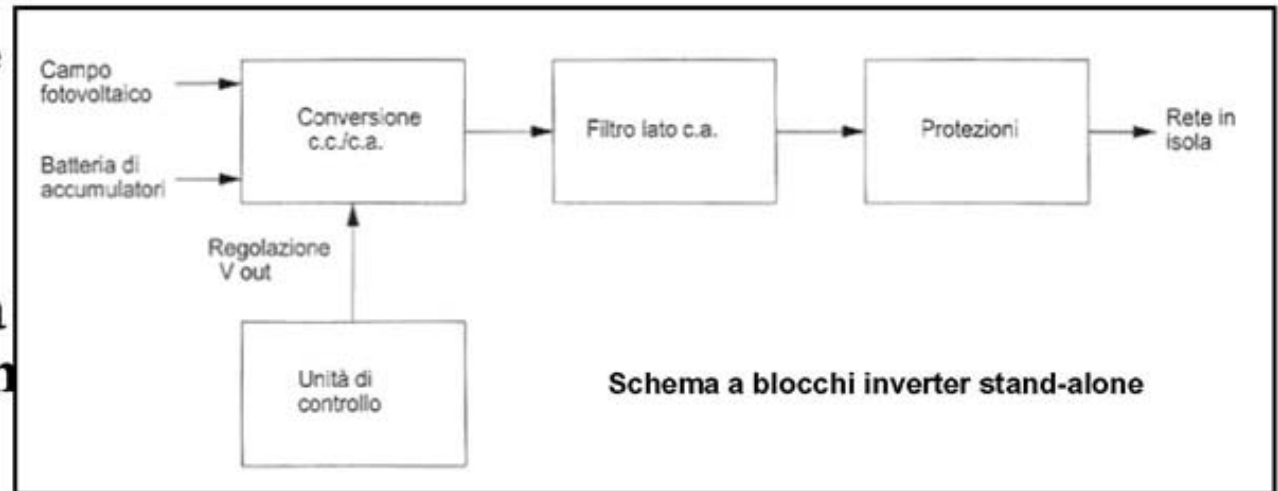


Dispositivo di conversione CC-CA - l'Inverter

Il convertitore corrente continua – corrente alternata, detto **inverter**, ha il compito di trasformare l'energia fotovoltaica, prodotta in C.C. in corrente alternata C.A. della frequenza desiderata.

Inverter più utilizzati:

- inverter a **commutazione forzata** per sistemi isolati
- inverter a **commutazione naturale** per sistemi collegati in rete



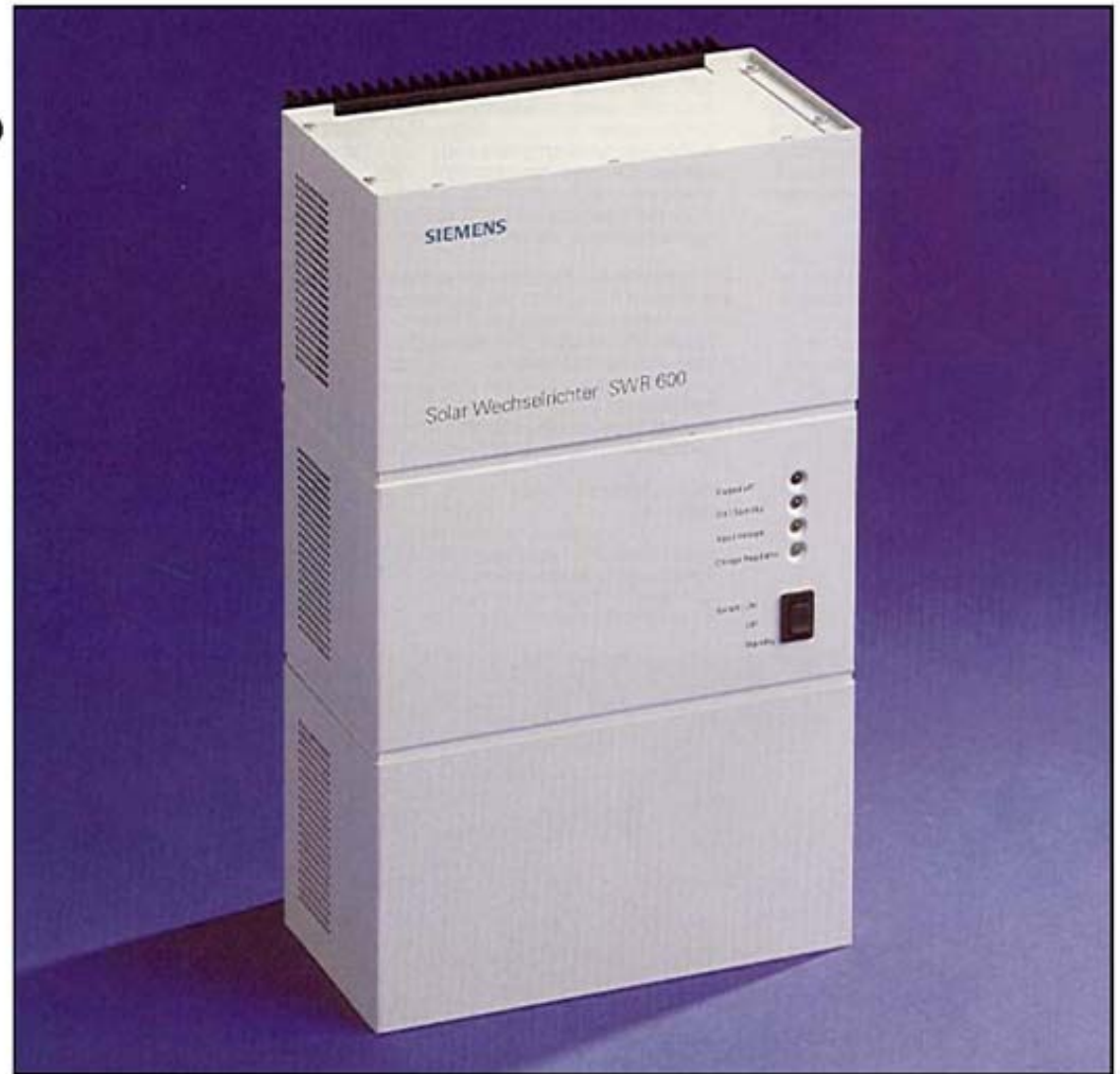
Caratteristiche dell'Inverter

I requisiti richiesti ad un inverter atto ad essere impiegato in un impianto fotovoltaico sono:

- basso consumo in assenza di carico;
- bassa distorsione armonica;
- dimensioni e peso limitati;
- elevata affidabilità;
- elevato rendimento.

-Quest'ultimo si ha solo se la la potenza in ingresso sia superiore al 10% della sua potenza nominale, cioè per

$$P_{cc}/P_n > 0,1$$



Inverter Siemens SWR 600

Stima del rendimento η_g

Il rendimento medio annuale $\bar{\eta}_g$ dell'intero sistema fotovoltaico è calcolabile come il prodotto di due distinti rendimenti:

$$\bar{\eta}_g = \eta_{\text{mod}}^N \cdot \bar{\eta}_{\text{bos}}$$

il rendimento **Nominale** del singolo modulo fotovoltaico, η_{mod}^N

il rendimento medio della restante parte del sistema, $\bar{\eta}_{\text{bos}}$

Stima del rendimento η_g

Una stima di massima del rendimento medio annuale dell'intero sistema fotovoltaico è desumibile dalle seguenti tabelle: $\overline{\eta}_g$

| Rendimento globale sistema isolato | con convertitore cc/ca | senza convertitore cc/ca |
|---|------------------------|--------------------------|
| Sistema con moduli in silicio monocristallino | 8.5% | 9.5% |
| Sistema con moduli in silicio policristallino | 7% | 8% |
| Sistema con moduli in silicio amorfo | 4% | 5% |

| Rendimento globale sistema connesso in rete | con convertitore cc/ca |
|---|------------------------|
| Sistema con moduli in silicio monocristallino | 10% |
| Sistema con moduli in silicio policristallino | 8.5% |
| Sistema con moduli in silicio amorfo | 5% |

Il rendimento **Nominale** η^N_{mod} di un modulo fotovoltaico è un dato che fornisce il costruttore. In assenza di dati specifici si possono assumere i seguenti valori per le diverse tipologie di celle:

| Rendimento moduli fotovoltaici | η_{mod} |
|--------------------------------|--------------|
| Silicio monocristallino | 13% |
| Silicio policristallino | 11% |
| Silicio amorfo | 6.5% |

Stima del rendimento medio $\overline{\eta}_{bos}$

Il rendimento medio della restante parte del sistema, detto anche rendimento di “*balance of system*” (*bos*), tiene conto di:

- le perdite legate ad una ridotta disponibilità di radiazione solare per effetto delle riflessioni, ombreggiamenti e sporcamento della superficie
- le perdite legate ad un funzionamento del modulo in condizioni non standard (temperatura, mismatch ..)
- le perdite elettriche sul circuito ed apparati in corrente continua
- le perdite dell’eventuale accumulatore
- le perdite del convertitore cc/ca
- le perdite di eventuali ausilari

Stima del rendimento medio $\overline{\eta}_{bos}$

Il valore medio stagionale delle singole perdite non è di facile stima, perchè **dipende dalle condizioni di esercizio del sistema oltre che da quelle climatiche.**

| Perdite % relative ai vari sottosistemi valori medi indicativi | stand-alone | | connesso in rete |
|---|------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| | con convertitore cc/ca | senza convertitore cc/ca | |
| Perdite per bassa radiazione e ombreggiamento | 3% | 3% | 3% |
| Perdite per inquinamento sui moduli | 1% | 1% | 1% |
| Perdite per riflessione | 3% | 3% | 3% |
| Perdite per scostamento dalle condizioni di targa (temperatura) | 8% | 8% | 8% |
| Perdite per mismatching tra le stringhe (moduli) | 5% | 5% | 5% |
| Perdite in corrente continua | 1% | 1% | 1% |
| Perdite del sistema di accumulo ⁽¹⁾ | 12% | | |
| Perdite sul sistema di conversione cc/ca ⁽¹⁾ | 12% | 12% | 8% |
| Perdite nei filtri e nei servizi ausiliari | 2% | 2% | 2% |

⁽¹⁾ Valore medio annuo stimato

L'energia producibile $W_{el,prod}$ da un impianto solare fotovoltaico è stimabile come

$$W_{el,prod} = \bar{\eta}_g \cdot A \cdot H_T \Big|_{anno}$$

dove

$\bar{\eta}_g$ è il rendimento globale medio annuale dell'intero impianto fotovoltaico

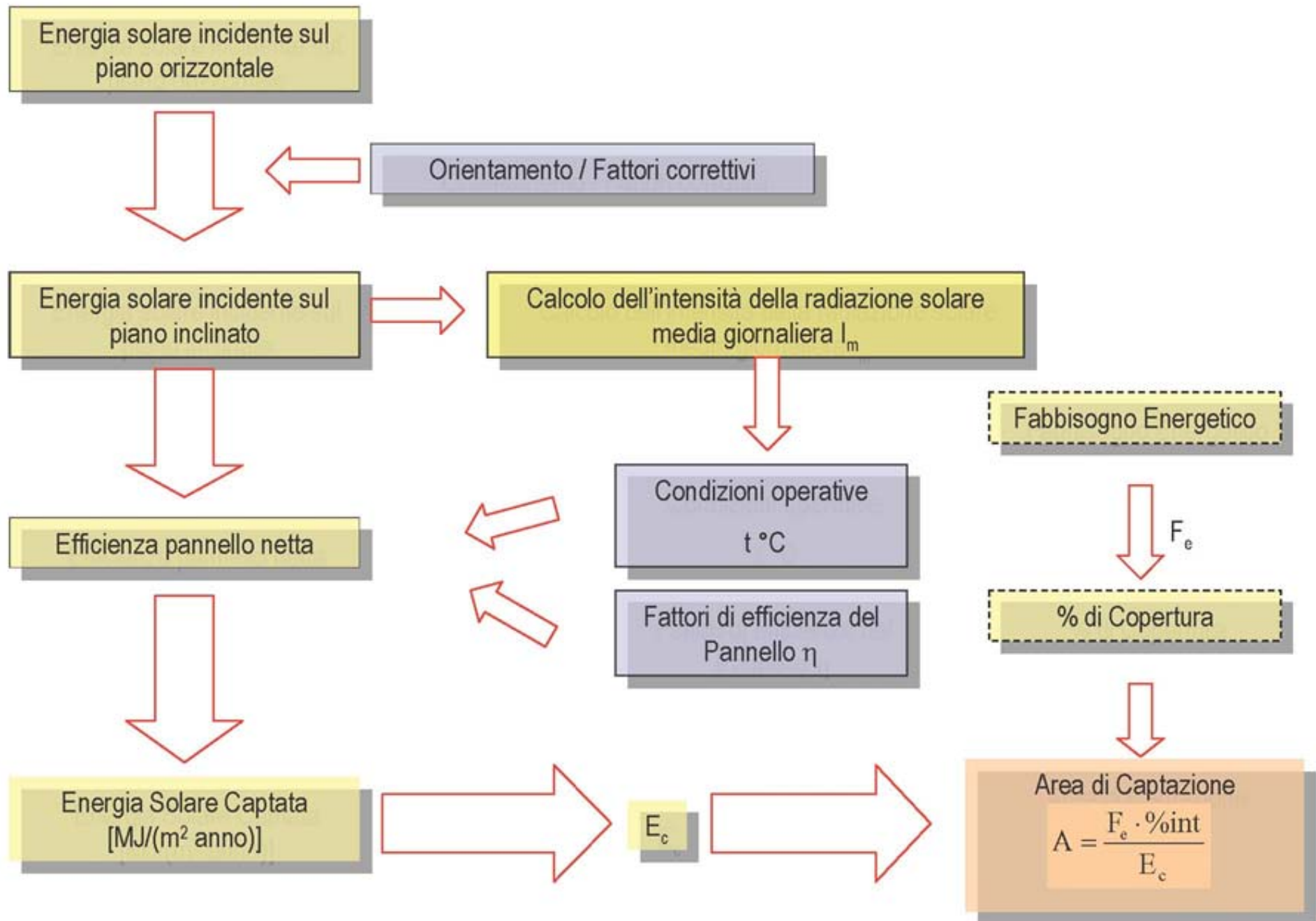
A è l'area lorda della superficie del generatore fotovoltaico

$H_T \Big|_{anno}$ è l'irradiazione solare annuale sul generatore

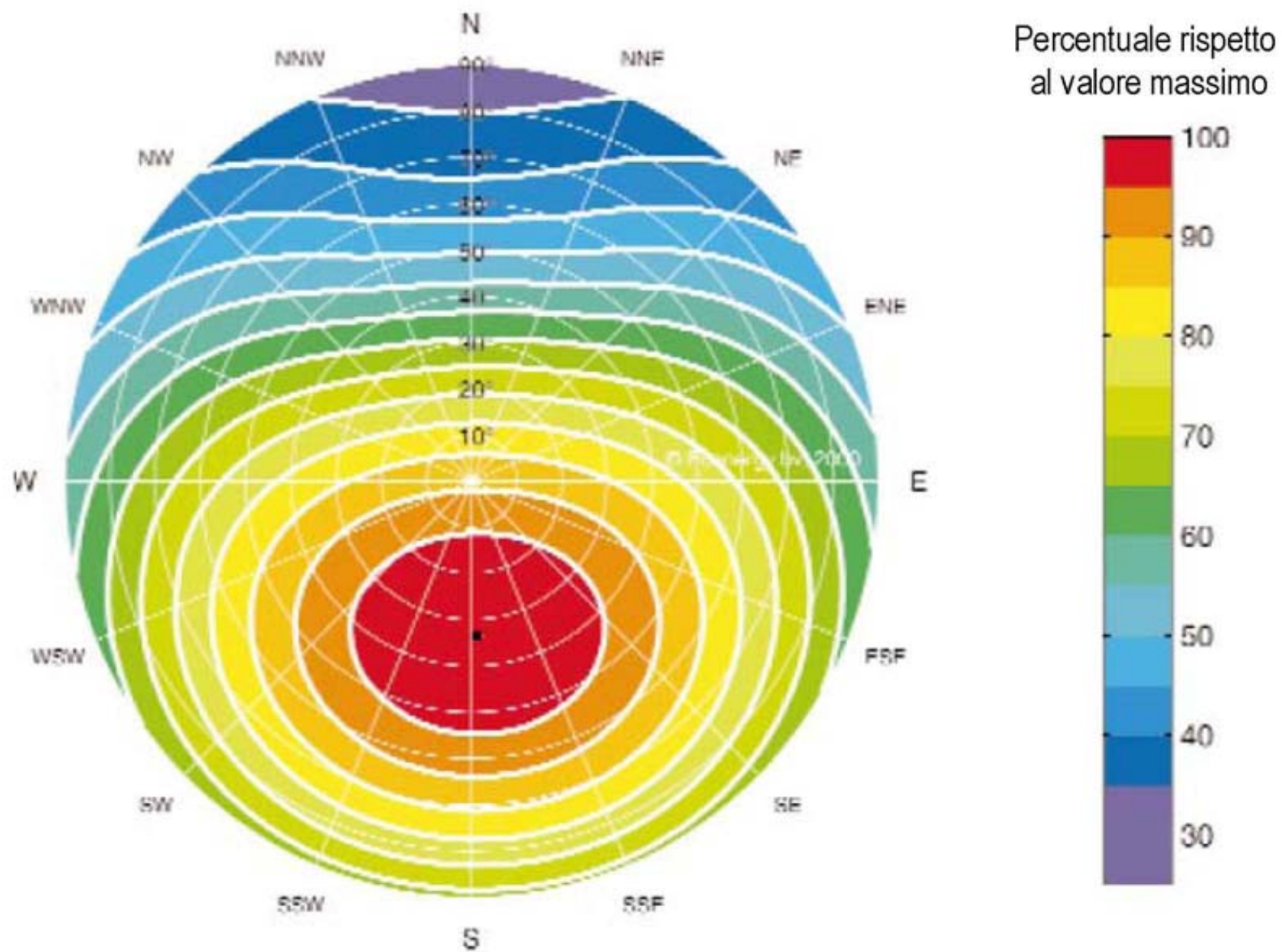
Manutenzione

- L'affidabilità dei sistemi fotovoltaici è in genere elevata e la manutenzione si riduce ad un'azione di controllo preventivo, che può essere effettuato su base annuale.
- L'unico elemento effettivamente soggetto ad un'opera di manutenzione è, se presente, l'accumulatore elettrico
- In particolari situazioni può essere anche necessaria una verifica saltuaria dello stato di sporcamento dei moduli fotovoltaici

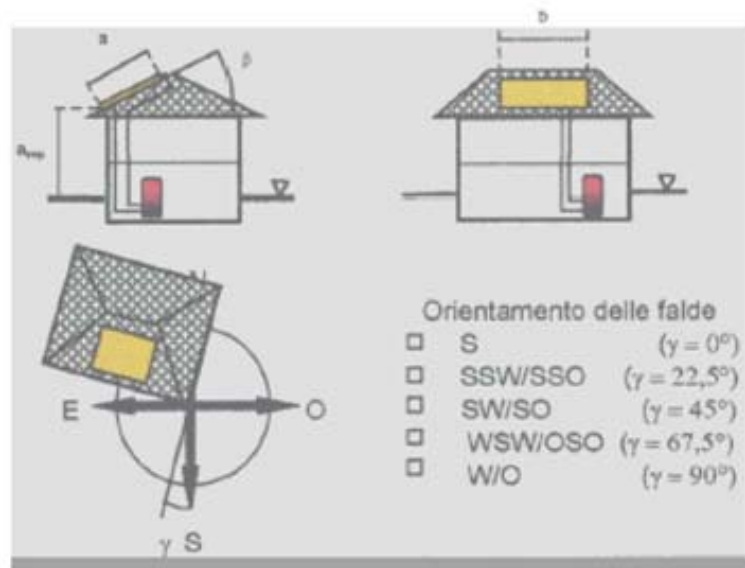
PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO



RADIAZIONE SOLARE GLOBALE ANNUA



INCLINAZIONE E ORIENTAMENTO



| orientamento Sud: 0° Est/Ovest: 90° | angolo di inclinazione | | | | | | |
|--|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° |
| 0 | 0,89 | 0,97 | 1 | 0,99 | 0,93 | 0,83 | 0,69 |
| 15 | 0,89 | 0,96 | 1 | 0,98 | 0,93 | 0,83 | 0,69 |
| 30 | 0,89 | 0,96 | 0,99 | 0,97 | 0,92 | 0,82 | 0,70 |
| 45 | 0,89 | 0,94 | 0,97 | 0,95 | 0,9 | 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 | 0,89 | 0,88 | 0,87 | 0,83 | 0,78 | 0,71 | 0,62 |

Calcolo dell'energia producibile

Dalla UNI 10349 e con la UNI 8477/1, calcolata

l'irradianza solare
annua in

5 070 MJ/m²

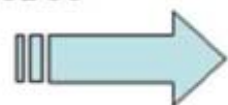
1 411 kWh/m²

l'energia producibile
è data per

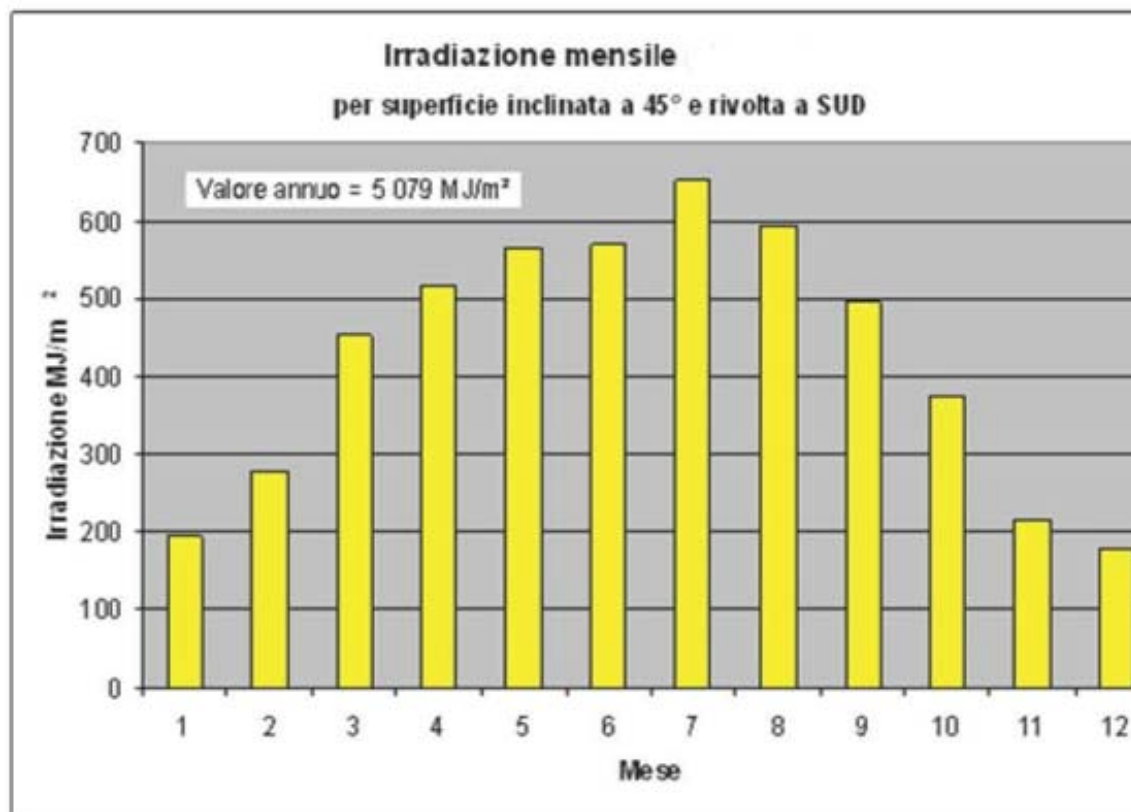
$$\eta_g = 9.6\%$$

$$A = 10 \text{ m}^2$$

da



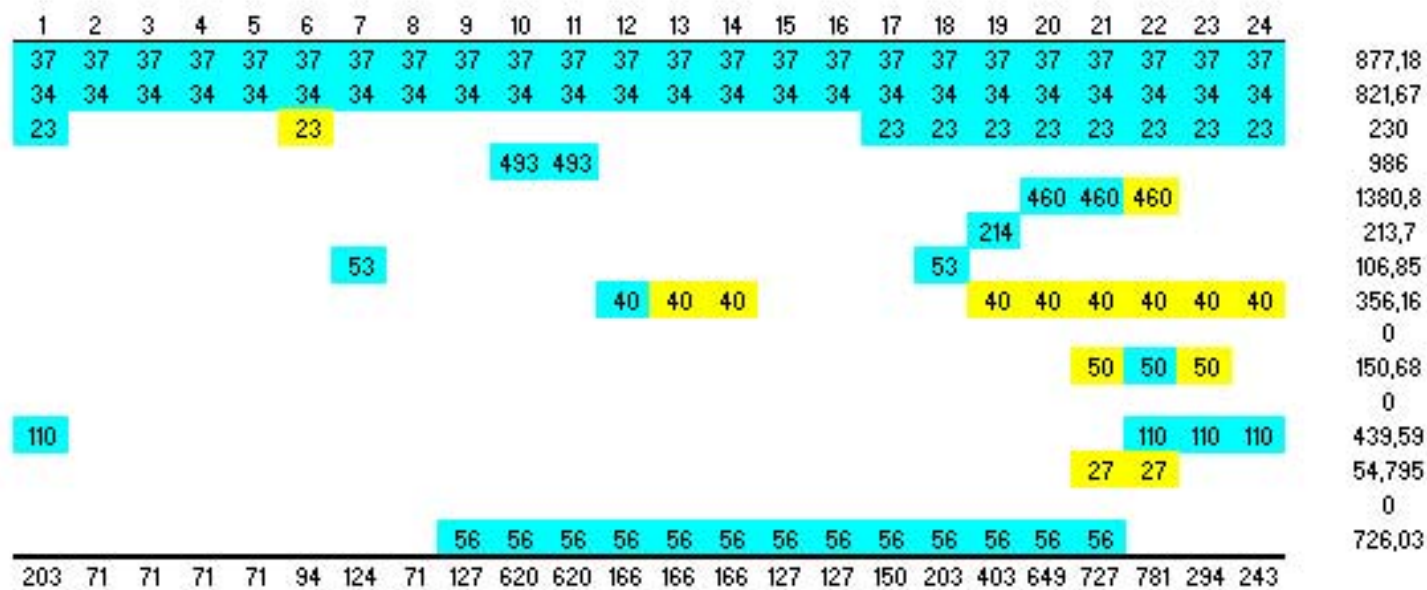
$$W_{prod} = \bar{\eta}_g \cdot A \cdot H_T \Big|_{anno} = 1357 \text{ kWh}$$



PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO

Consumi elettrici famiglia tipo (fonte: elaborazione dati ENEA)

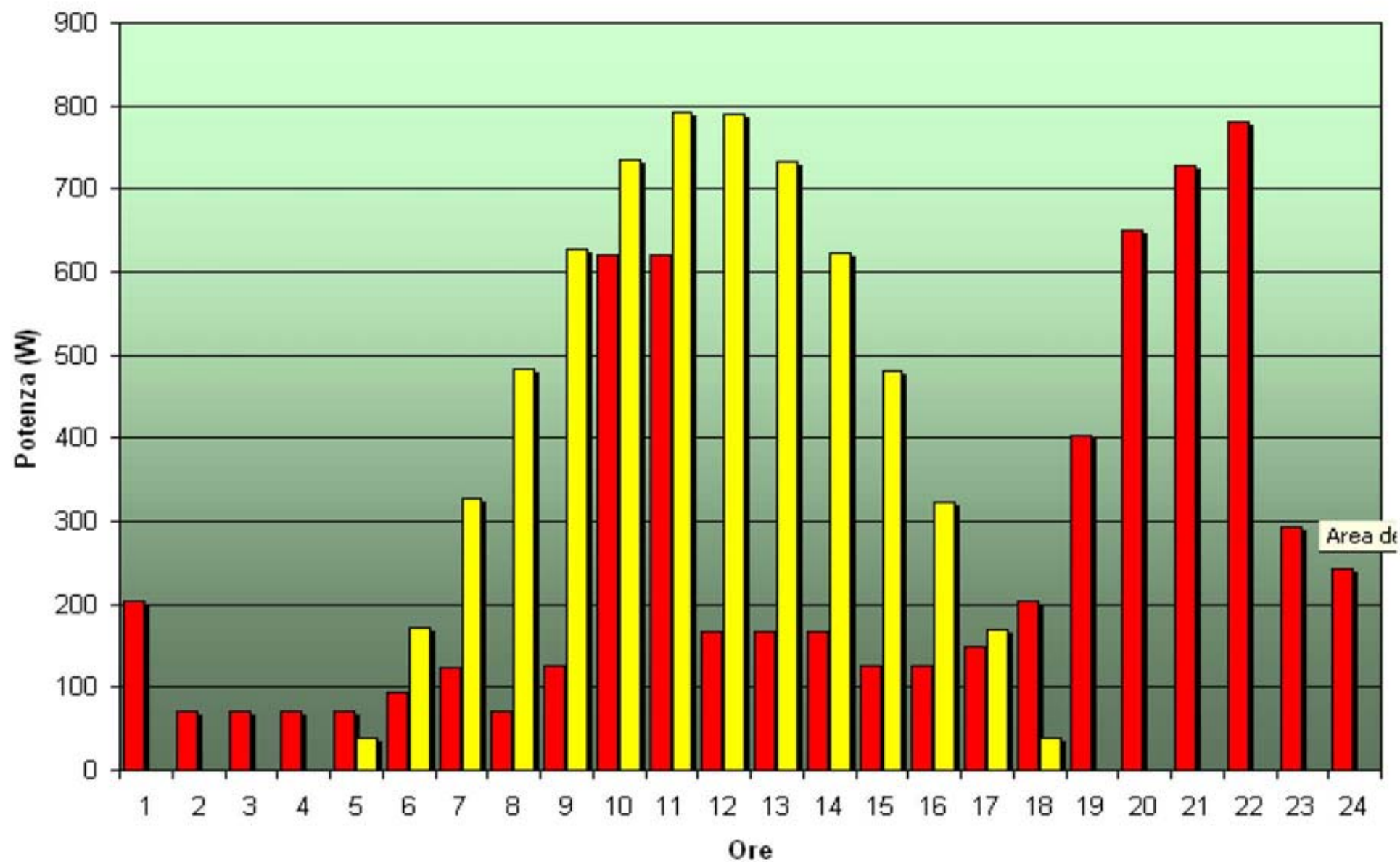
| <i>Elettrodomestico</i> | <i>Consumi minimi (kWh/anno)</i> | <i>Consumi giornalieri minimi (kWh/giorno)</i> |
|---------------------------------|----------------------------------|--|
| Frigorifero (mod. tradizionale) | 320 | 877 |
| Congelatore | 300 | 822 |
| Illuminazione | 84 | 230 |
| Lavatrice | 360 | 986 |
| Lavastoviglie | 504 | 1381 |
| Forno elettrico | 78 | 214 |
| Forno Microonde | 39 | 107 |
| Televisore funzionamento | 130 | 356 |
| Televisore stand-by | 0 | 0 |
| Videoregistratore funzionam | 55 | 151 |
| Videoregistratore stand-by | 0 | 0 |
| Computer | 160 | 438 |
| Hi-Fi funzionamento | 20 | 55 |
| Hi-Fi stand-by | 0 | 0 |
| Altri apparecchi | 265 | 726 |
| | 2315 | 6342 |



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|-------------------------|-----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Consumi | 203 | 71 | 71 | 71 | 71 | 94 | 124 | 71 | 127 | 620 | 620 | 166 | 166 | 166 | 127 | 127 | 150 | 203 | 403 | 649 | 727 | 781 | 294 | 243 |
| En. Solare | | | | | 0 | 39 | 172 | 327 | 484 | 626 | 734 | 792 | 791 | 733 | 624 | 482 | 323 | 169 | 39 | | | | | |
| Da mandare in rete | | | | | | -55 | 48 | 256 | 358 | 6,8 | 115 | 626 | 625 | 566 | 497 | 355 | 173 | 0 | | | | | | |
| Da prelevare dalla rete | 203 | 71 | 71 | 71 | 71 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 364 | 649 | 727 | 781 | 294 | 243 |
| En. Solare | | | | | 0 | 43 | 191 | 363 | 538 | 696 | 816 | 880 | 879 | 814 | 693 | 535 | 359 | 188 | 43 | 0 | | | | |

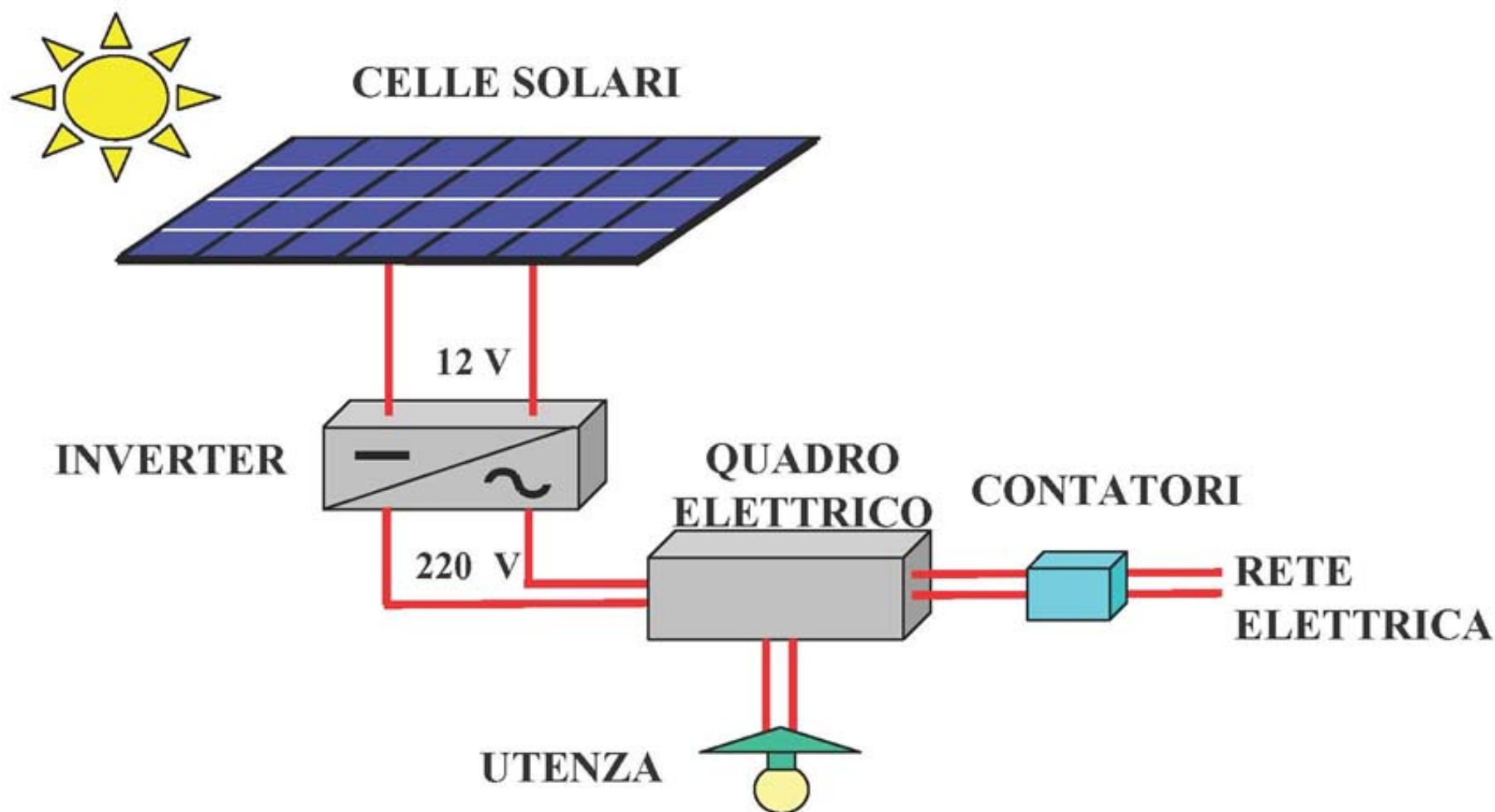
PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO

Consumi elettrici

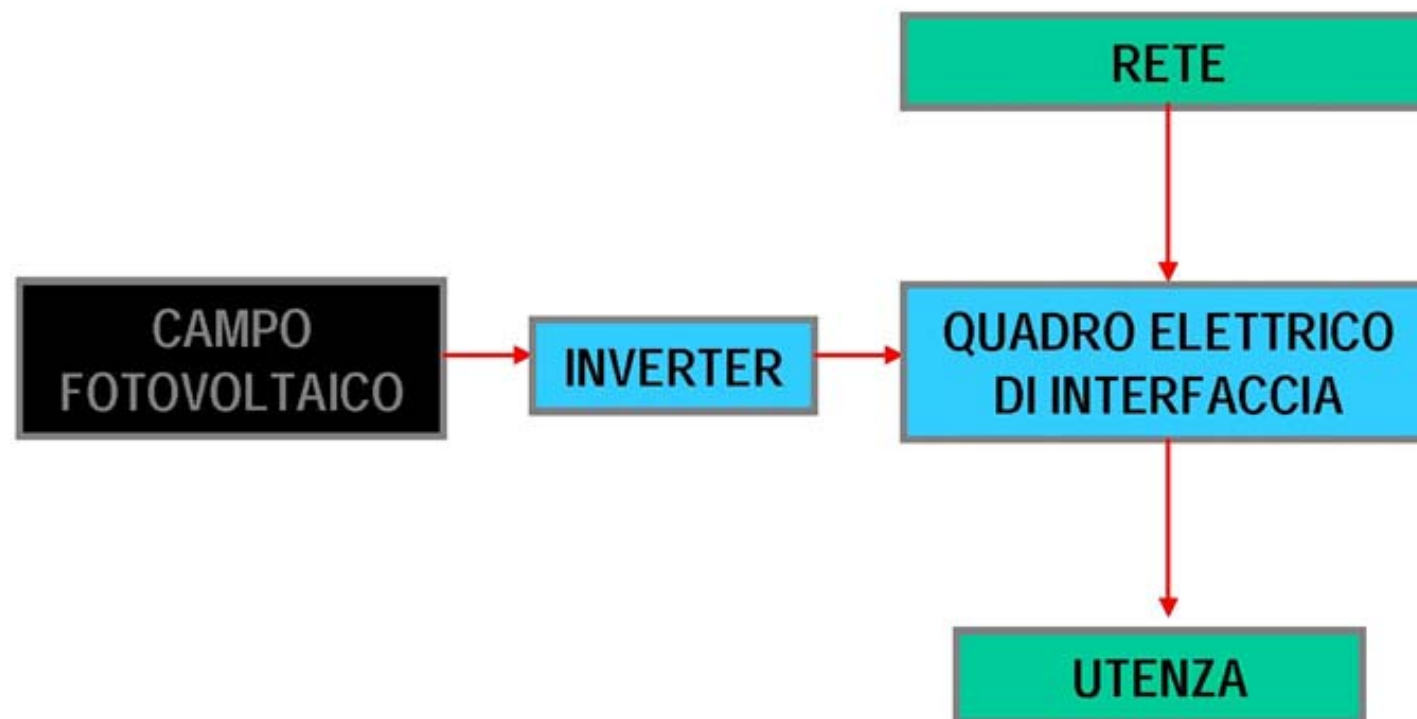


GRID CONNECTED

Schema di un impianto collegato alla rete pubblica (grid connected)

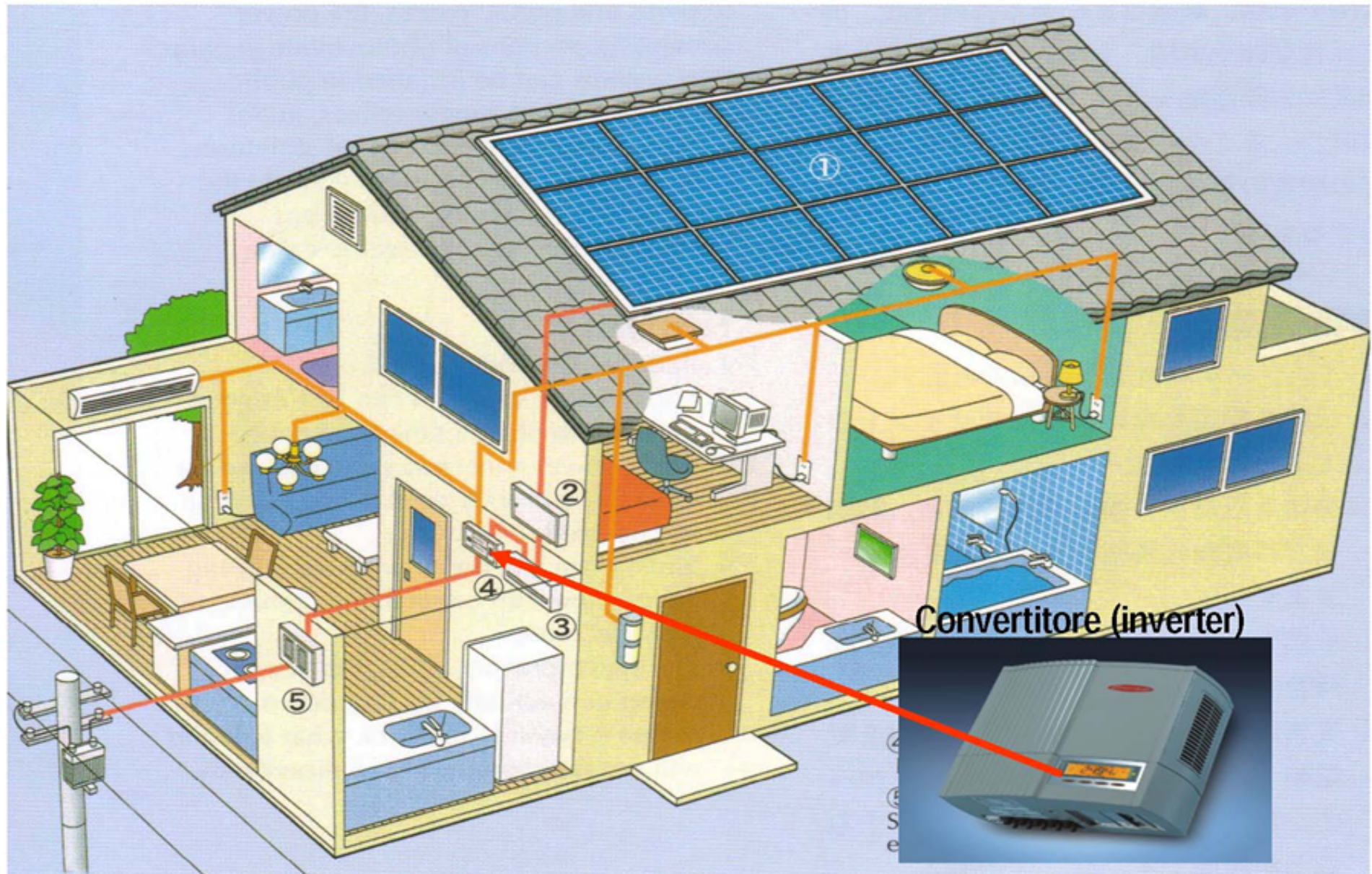


•••• Impianto Collegato alla Rete

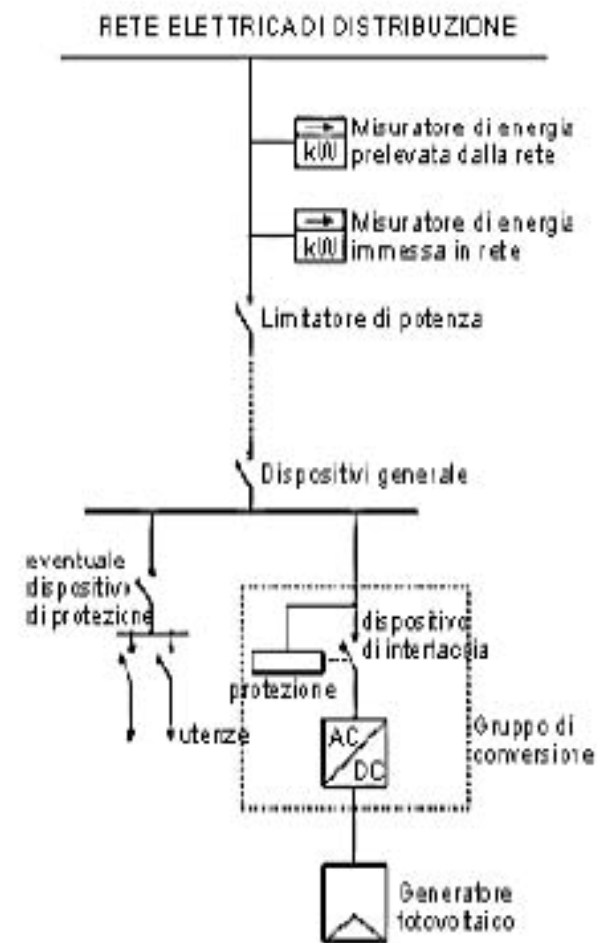
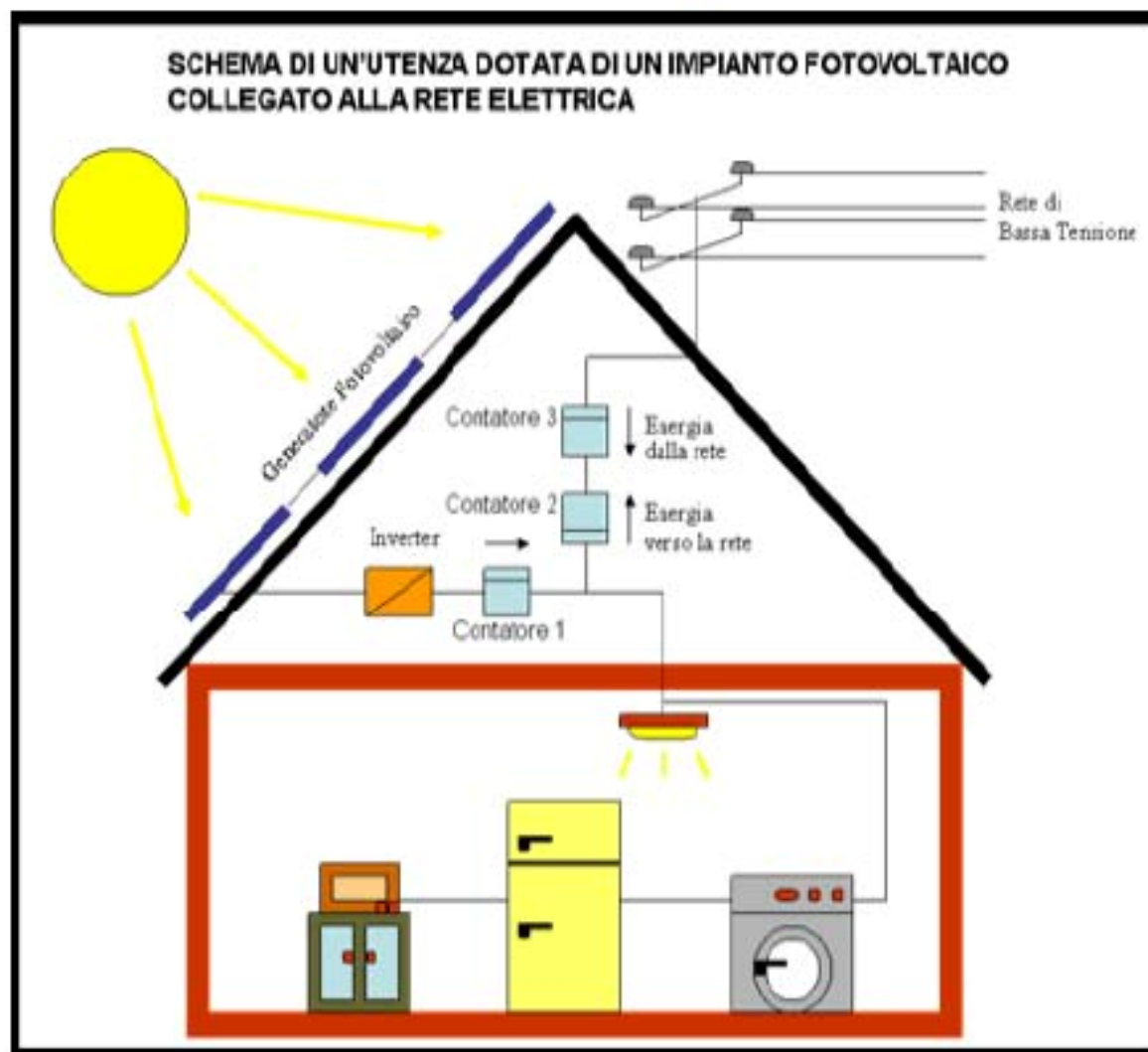


COM'È FATTO UN TETTO FOTOVOLTAICO ?

Impianti solari fotovoltaici grid connected



Schema di impianto connesso a rete



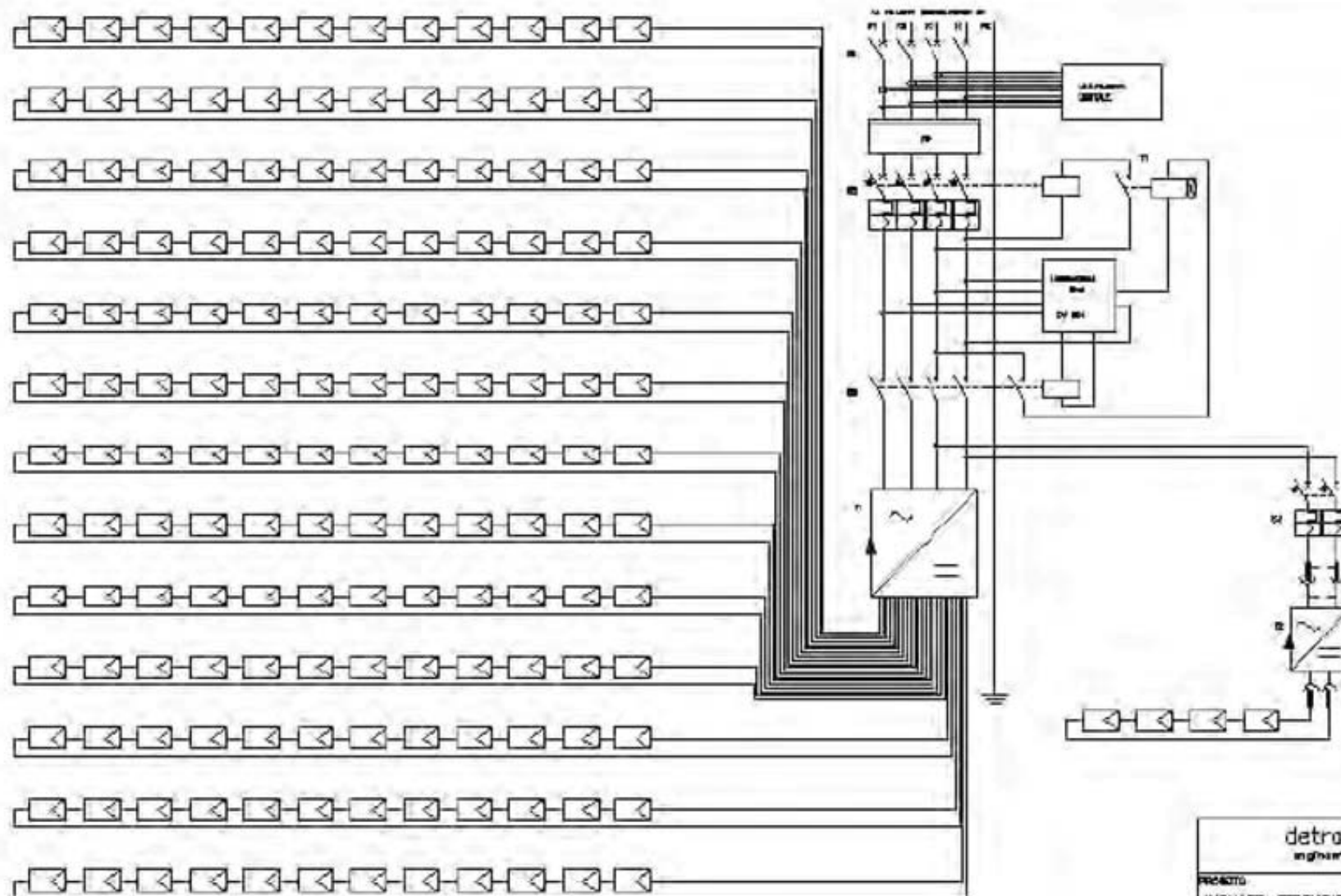
GRID CONNECTED

Schema indicativo - scambio sul posto sotto i 20 kWp

- 1 I moduli fotovoltaici, esposti al sole, producono corrente elettrica in forma continua.
- 2 L'inverter trasforma la corrente "solare" da continua ad alternata.
- 3 Il Conto Energia prevede l'installazione di un **contatore** che misura tutta l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico, che verrà pagata con una tariffa molto interessante.
- 4 La corrente **entra nella rete elettrica dell'utente** e viene assorbita prima di tutto dalle normali apparecchiature elettriche.
- 5 Nel caso in cui l'impianto solare produca più corrente di quella che serve in quel momento, il surplus entra nella rete elettrica del distributore di energia elettrica locale e viene misurato da un **secondo contatore dedicato** proprio a conteggiare la **corrente prodotta dall'impianto solare e non utilizzata**.
- 6 Quando l'impianto solare non produce (di notte) o produce poco (brutto tempo) o la corrente richiesta dall'utenza è maggiore di quella che può essere fornita in quel momento dal sistema solare, si utilizza la corrente del distributore.



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



SCHEMA ELETTRICO MULTIFILARE

| detraeco engineering | | PROGETTO | |
|--|------|------------|-----------|
| INPIANTO FOTOVOLTAICO DA 19,2 KWp Carra Rovech Flat, Dobossani (To) | | DIVIS. 4 | |
| PROGETTAZIONE | | | |
| DETRACO s.r.l. - Via del Varesio 21, 20127 - Milano | | | |
| DESCRIZIONE DELLA | | REDAZIONE | |
| SCHEMA ELETTRICO MULTIFILARE | | DIF-FRONTI | |
| REV. | NOTE | DATA | ACCREDIT. |
| 1 | | 07.08.2011 | 1.000 |

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

APPLICAZIONI RESIDENZIALI



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

APPLICAZIONI INDUSTRIALI



INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA



ISTITUTO IPSIA DI ROVIGO

Applicazione per sovrapposizione: Edificio scolastico di Rovigo



Rispetto del flusso di luce e aria necessaria agli ambienti retrostanti l'impianto



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Applicazione per integrazione: Ospedale Meyer di Firenze



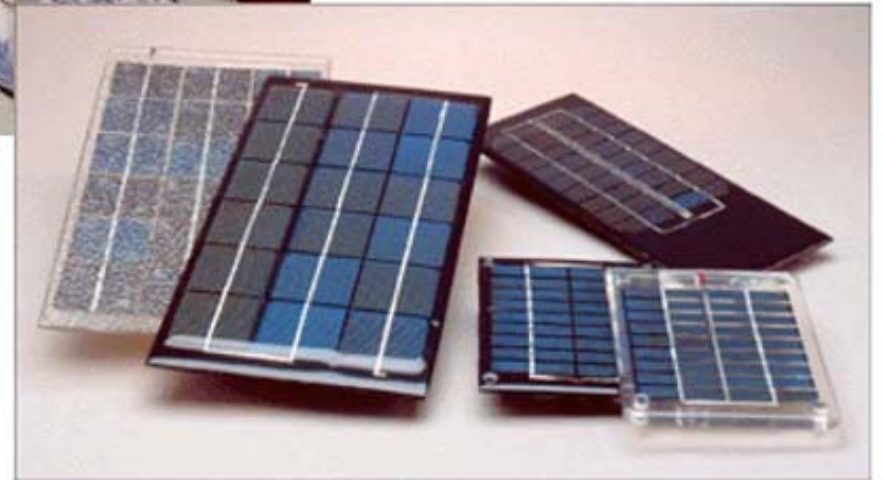
Integrazione di PV negli edifici



Integrazione di PV negli edifici



FOTOVOLTAICO



FOTOVOLTAICO



FOTOVOLTAICO



FOTOVOLTAICO



FOTOVOLTAICO



Performance

Risparmio energetico: 25%

Resa minima garantita: 80%

Ritorno sull'investimento: <10 anni









L'importanza dei dettagli



Il generatore fotovoltaico

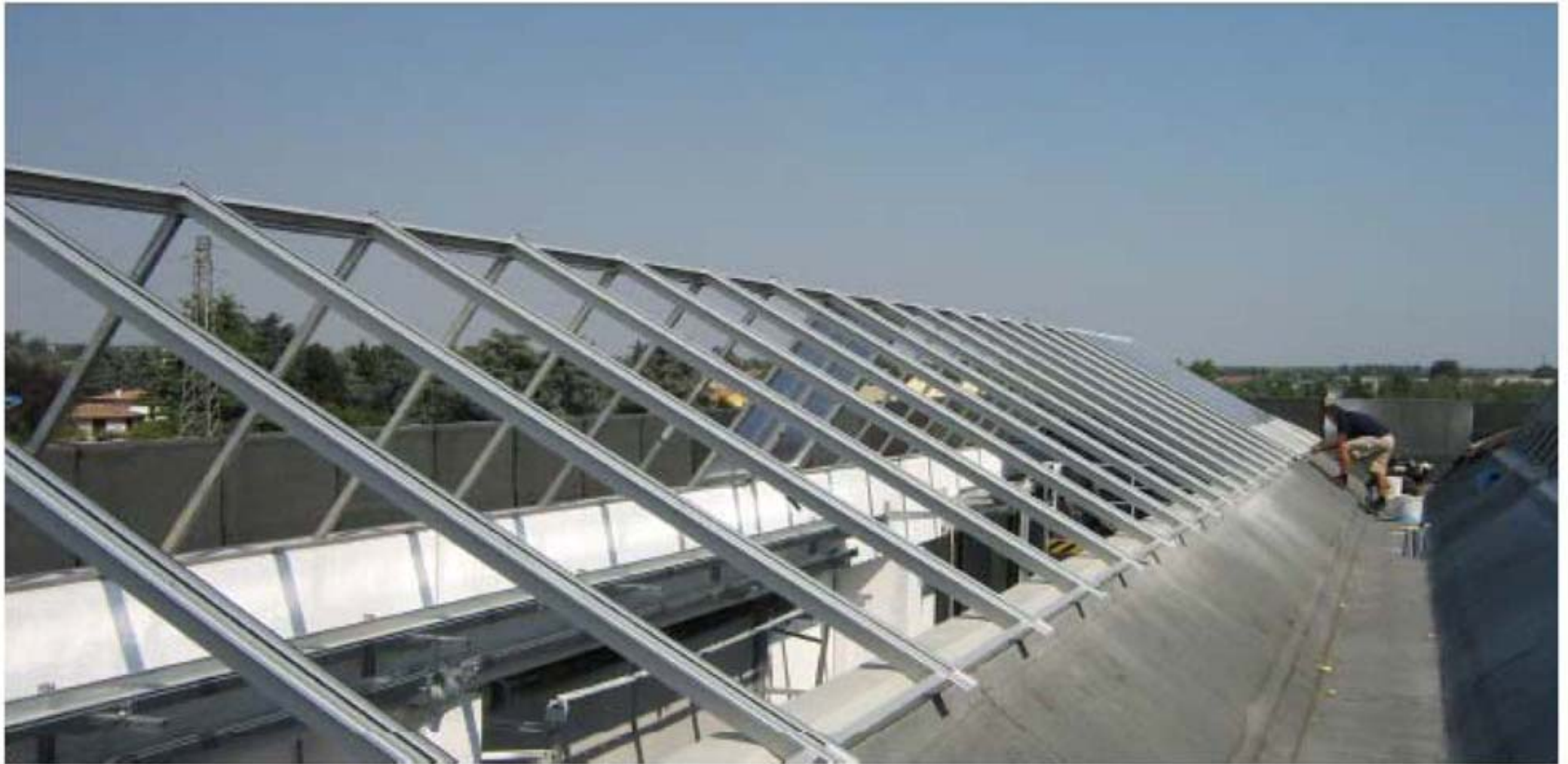


Panoramica



Impianto fotovoltaico installato su tetto, **837,48 kW_p**

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI













Sistemi Fotovoltaici

Sassari 20 Marzo 2009



Dott . Ing. Stefano Floris