



Impianti fotovoltaici di piccola taglia nei sistemi edilizi

Prof. Filippo Spertino

Docente di Generazione fotovoltaica ed eolica

Politecnico di Torino, Dip. Energia,

email: filippo.spertino@polito.it

Componente Commissione Impianti elettrici e speciali

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino

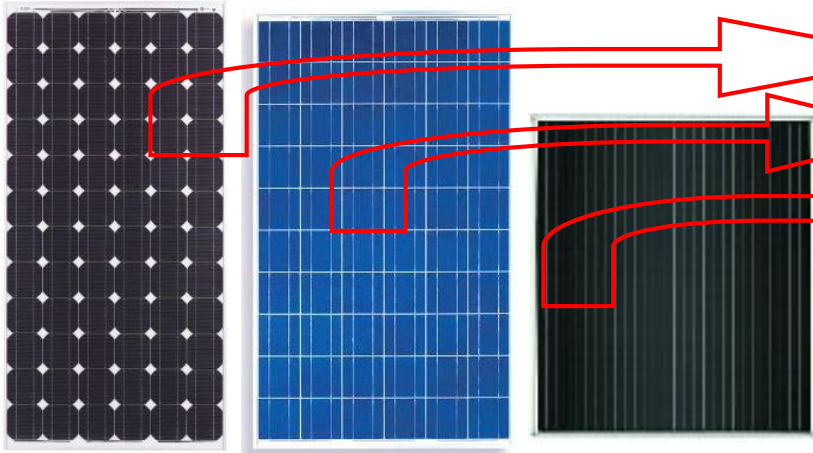
Introduzione: Energia Solare

A livello del terreno l'energia solare è:

- alcuni ordini di grandezza superiore al consumo energetico legato alle attività umane;
- fortemente distribuita nel mondo con variazioni giornaliere e stagionali;
- caratterizzata da una densità di potenza abbastanza bassa rispetto alle altre fonti di energia;
- rinnovabile e quasi costante su base annua.

Introduzione: pro e contro del FV

Gli impianti *fotovoltaici* convertono la luce (visibile e non) direttamente in energia elettrica con efficienze del 5-22 %, *non* trasformano il calore in energia elettrica (temperature di solo 40-70 °C) contribuendo al “global warming”, *né* richiedono acqua per il raffreddamento come le centrali termiche convenzionali (a olio, carbone e gas) e nucleari.



Tecnologia	Rendimento
m-Si ; m-Si/a-Si	15-22 %
p-Si	14-16 %
a-Si ; a-Si/ μ c	6-10 %
CIS/CIGS	11-13 %
CdTe/CdS	13-15 %

Introduzione: pro e contro del FV

Altri *pregi* dei moduli (o pannelli) fotovoltaici sono:

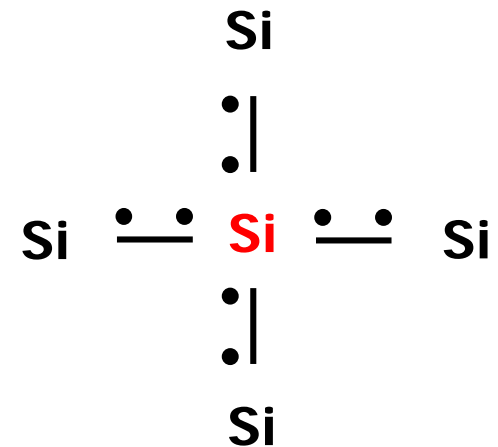
- elevata affidabilità e lunga vita (>25 anni con EPBT < 3 anni);
- ridotto costo di manutenzione (pulizia del vetro);
- assenza di rumore e di inquinamento atmosferico;
- produzione vicino al consumo (rispetto a una centrale convenzionale);
- smaltimento privo di scorie a fine vita.

I *difetti* consistono in:

- fluttuazione della produzione energetica (giornaliera e stagionale);
- necessità di componenti aggiuntivi (accumulo e convertitori elettronici);
- costo di installazione non trascurabile (800-2000 €/kW_p).

Richiami sui semiconduttori

- La cella FotoVoltaica (FV) è l'elemento base dei sistemi FV, perché in essa avviene la conversione diretta della radiazione solare in energia elettrica.
- La conversione energetica si ottiene sfruttando le proprietà dei semiconduttori. Nel silicio (Si), il cristallo è tetravalente ossia ciascun atomo dispone di 4 elettroni di valenza, disponibili per il legame chimico con gli atomi circostanti.

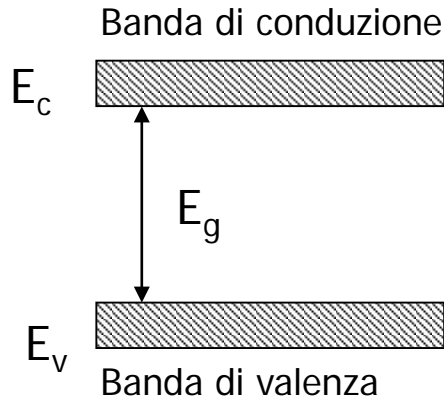


Richiami sui semiconduttori

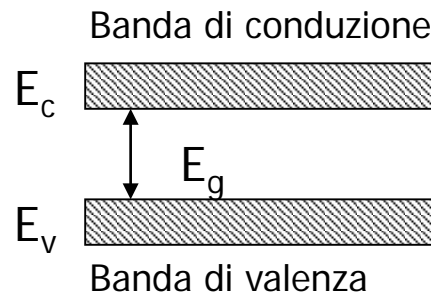
- Per comprendere il processo di conversione, è opportuno richiamare alcune nozioni di fisica: struttura a bande di energia dell'atomo, generazione di coppie elettrone – lacuna.
- La banda di energia è l'insieme dei livelli energetici posseduti dagli elettroni ed è composta da:
 - **banda di valenza**, costituita dall'insieme degli elettroni coinvolti nel legame chimico;
 - **banda di conduzione**, costituita dagli elettroni aventi un livello energetico (superiore al precedente) tale da permettere la loro circolazione nel reticolo cristallino.
 - **banda proibita** ("energy gap"), che rappresenta il salto energetico necessario all'elettrone per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

Richiami sui semiconduttori

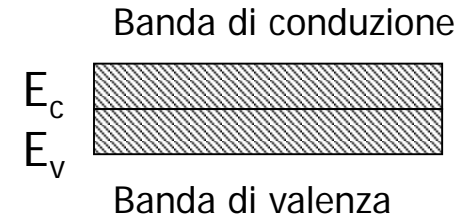
Isolanti



Semiconduttori



Conduttori

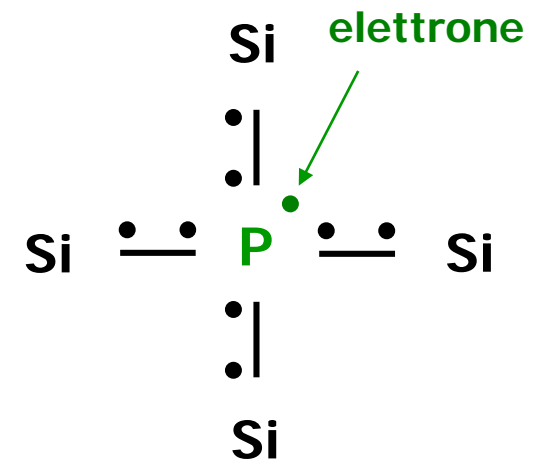
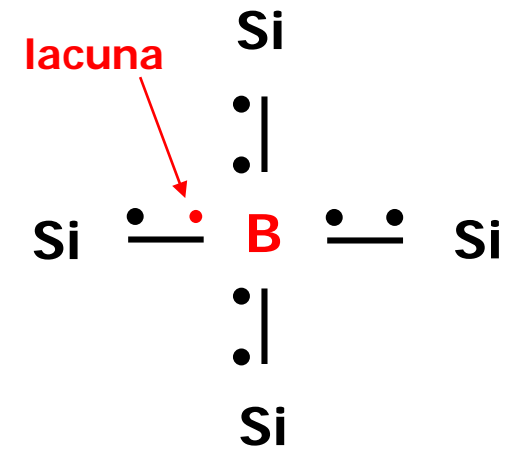


Energy gap in (eV) dei principali semiconduttori

Silicio cristallino (c-Si)	1,12
Silicio amorfo (a-Si)	1,75
Germanio (Ge)	0,67
Arseniuro di Gallio (GaAs)	1,42
Fosfuro di Indio (InP)	1,34
Diseleniuro Indio Rame (CuInSe)	1,05
Telluriuro di Cadmio (CdTe)	1,45
Solfuro di Cadmio (CdS)	2,4

Richiami sui semiconduttori

- In un semiconduttore per ottenere il funzionamento da diodo (interruttore unidirezionale), bisogna realizzare la giunzione P-N ponendo a contatto due cristalli: uno è "drogato" con atomi trivalenti (ad es. boro), mentre l'altro con atomi pentavalenti (fosforo).
- Il cristallo di tipo P, contenente gli atomi trivalenti presenta nel reticolo delle lacune, mentre quello di tipo N presenta elettroni liberi dal legame.
- A temperatura ambiente, lacune ed elettroni sono liberi di muoversi nel reticolo per *diffusione*.

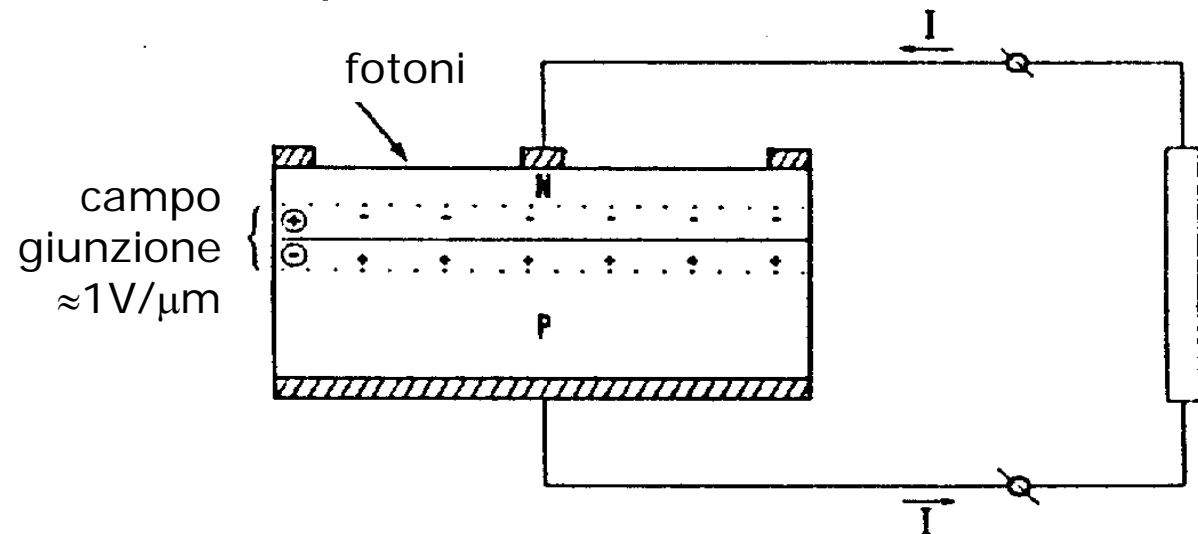


Richiami sui semiconduttori

- In una cella a singola giunzione lo strato drogato N è posto sopra lo strato P in uno spessore variabile da 200 a 300 μm).
- Una cella *non esposta alla luce* si comporta da raddrizzatore. All'interfaccia gli elettroni del cristallo N si diffondono verso il cristallo P (e viceversa per le lacune) producendo la corrente I_0 .
- Si forma, perciò, una regione di carica spaziale (con distribuzione di cariche "+" sul tipo N e "-" sul tipo P), in cui mancano i portatori mobili di carica.
- Il processo si ferma quando il campo elettrico genera una corrente $-I_0$ che controbilancia il moto di diffusione.

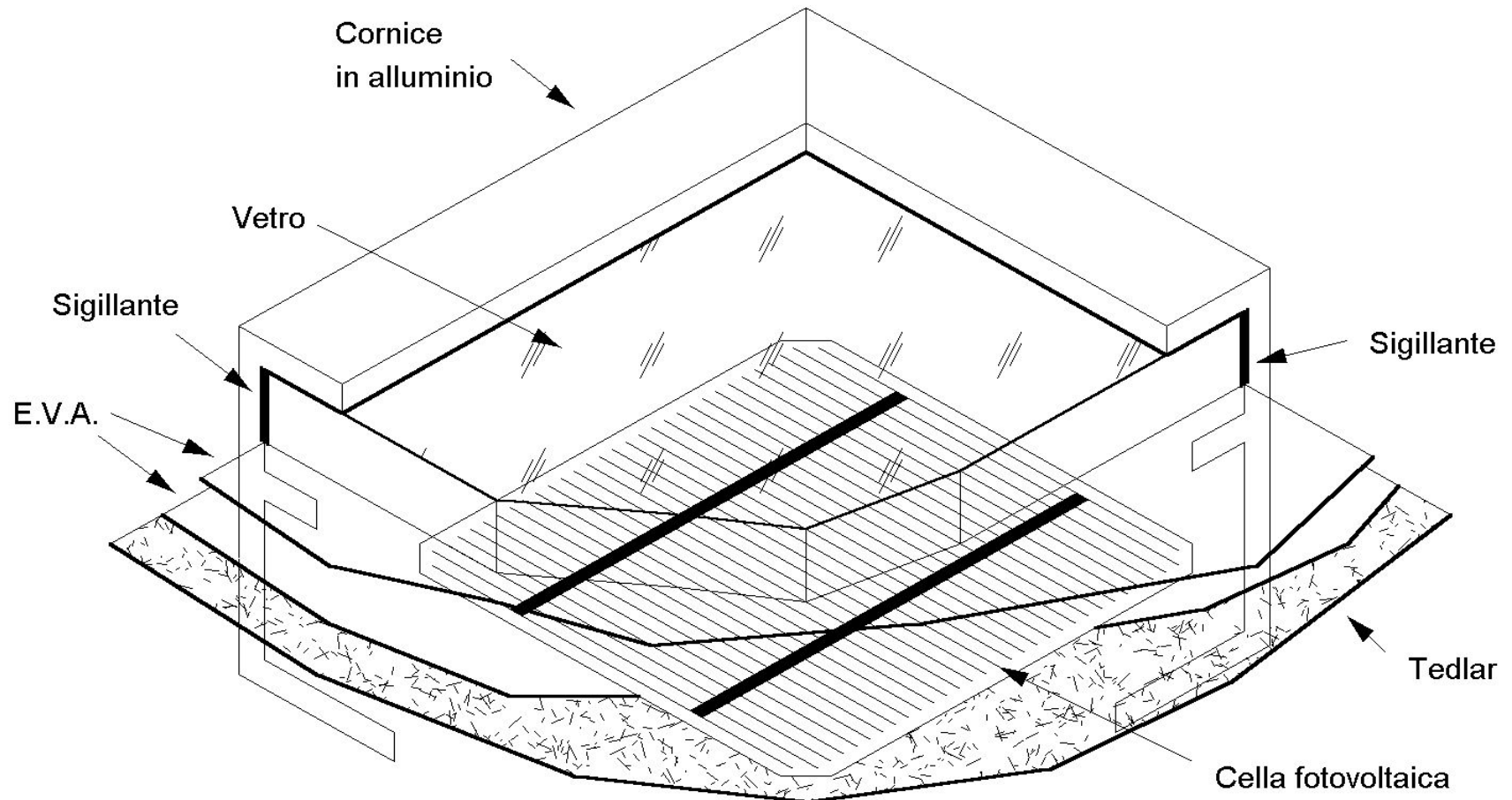
L'effetto fotovoltaico

- Lo strato N è così sottile ($\approx 1\mu\text{m}$) che la radiazione può raggiungere la giunzione (regione di svuotamento).
- La radiazione, purché di energia sufficiente ($E_{\text{ph}} = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda \geq E_g$), crea coppie elettrone/lacuna.
- Col **campo elettrico di giunzione**, gli elettroni sono attirati verso la zona N (carica +) e le lacune verso la zona P (carica -).
- Tale moto di cariche è all'origine della corrente fotovoltaica, del tutto analoga alla corrente di campo.



Moduli FV: costruzione, esempi

Struttura tipica di un modulo fotovoltaico: processo di laminazione per l'incapsulamento (sotto vuoto a 140-150 °C)



Moduli FV: costruzione, esempi

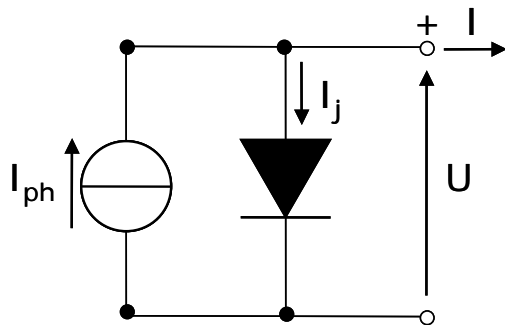
In generale, un modulo fotovoltaico è costituito da:

- vetro anteriore con spessore di 3÷4 mm
- celle solari incapsulate in E.V.A.
- copertura posteriore in vetro o materiale plastico (tedlar)
- cornice in alluminio
- scatola di giunzione



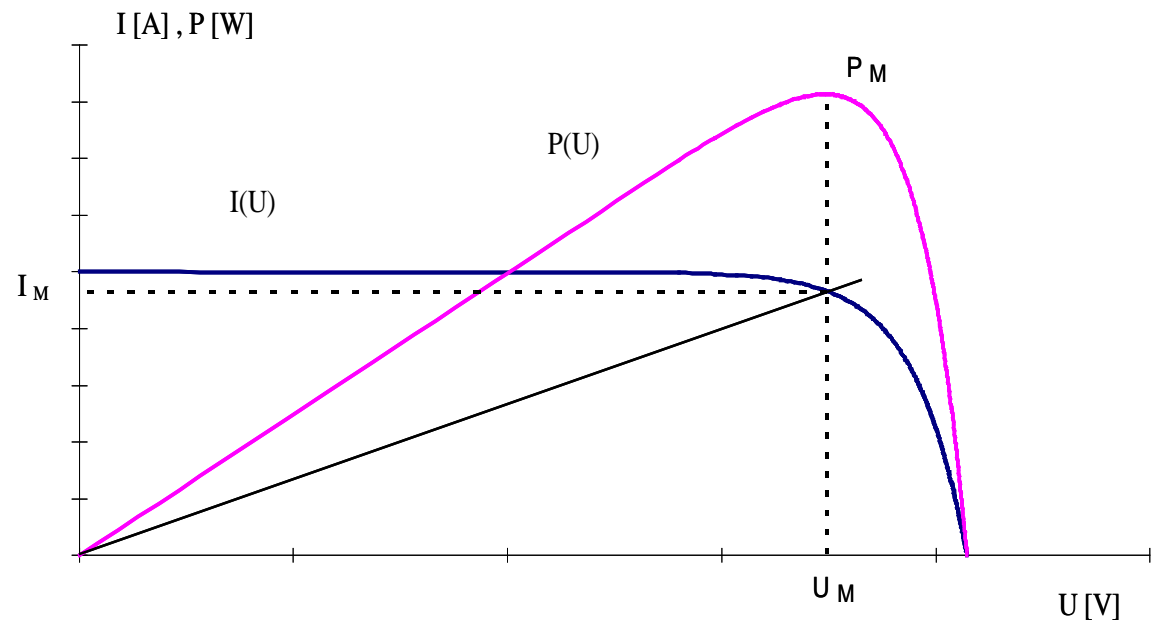
Curva caratteristica corrente- tensione

N.B.: nella cella solare illuminata si produce una corrente di campo $I_{ph} \propto G$ a cui si sottrae la corrente di polarizzazione diretta del diodo (diffusione, che cresce all'aumentare della tensione fino al valore di equilibrio U_{oc})



Condizioni STC

$G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



Curva caratteristica corrente- tensione

La curva corrente-tensione di una cella irraggiata *non è lineare* ed è definita da:

$I_{pm}, U_{pm} \rightarrow$ corrente e tensione nel punto di massima potenza

$I_{sc} \rightarrow$ corrente di corto circuito

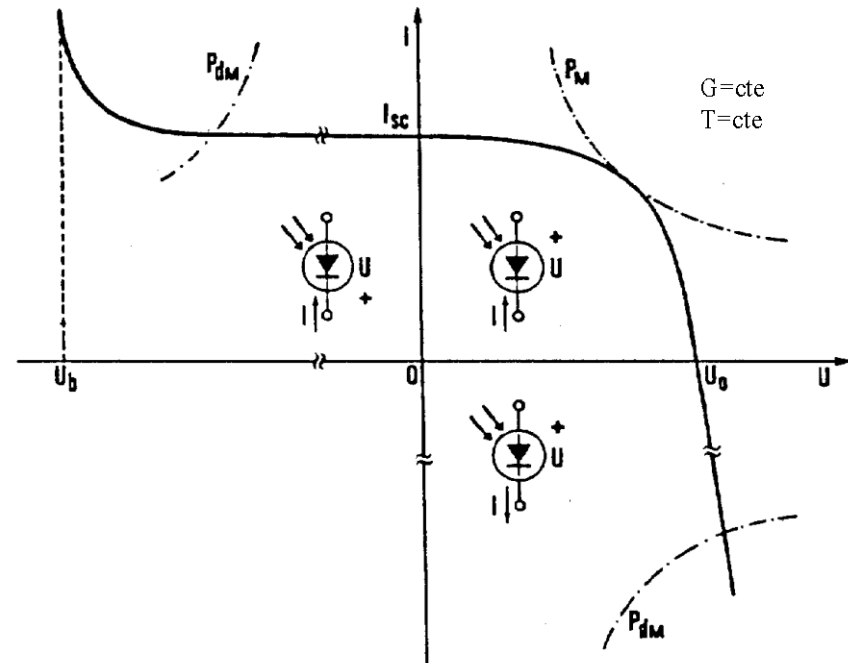
$U_{oc} \rightarrow$ tensione a circuito aperto

Nel punto P_{max} vale la condizione

$$-\frac{dI}{dU} = \frac{I}{U}$$

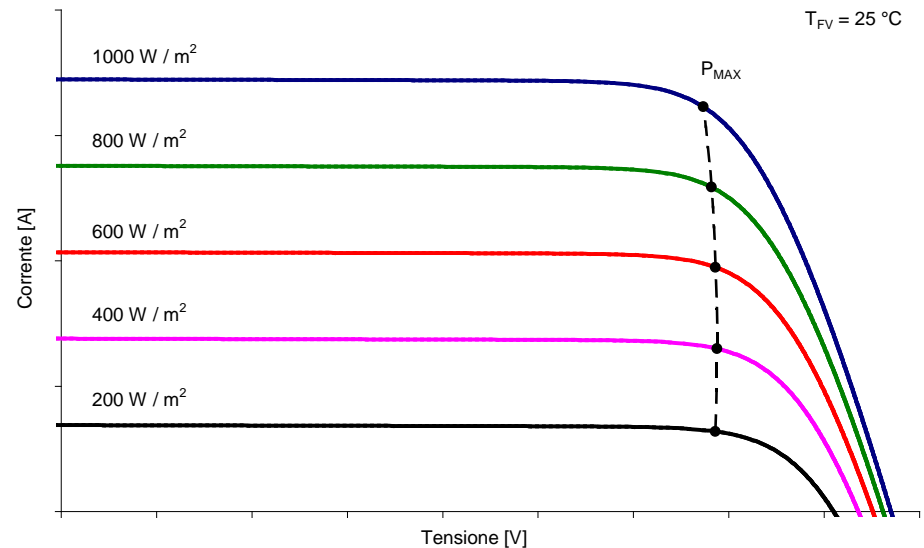
conduttanza
incrementale
(generat. FV)

conduttanza
del carico



La dipendenza dall'irradianza

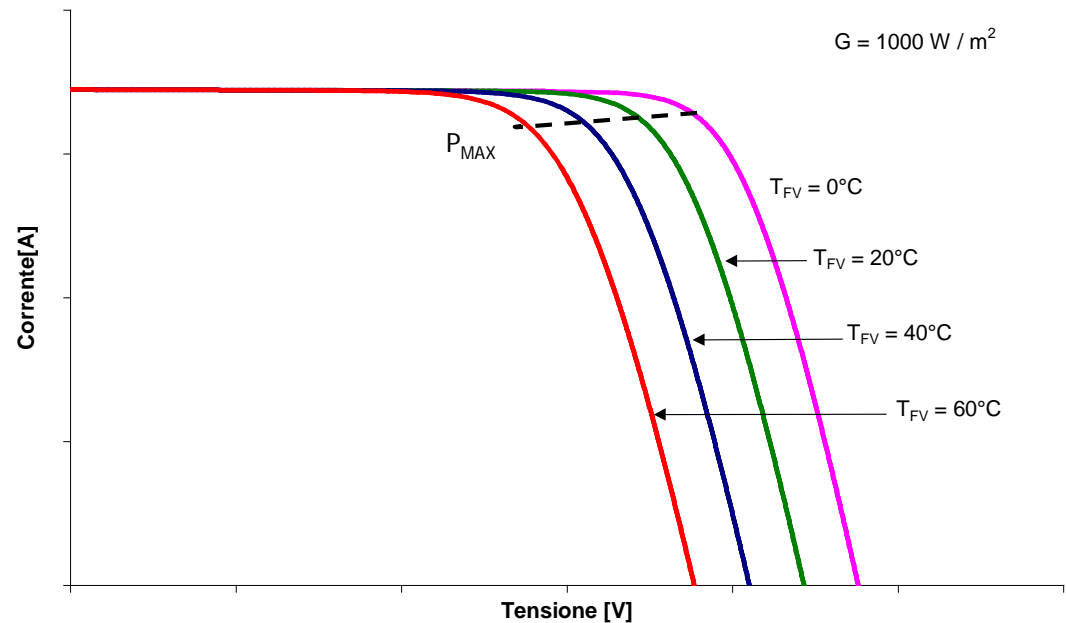
- Al variare dell'irradianza la curva I-U della cella si modifica.
- I_{SC} e I_{Pmax} variano all'incirca proporzionalmente con la radiazione incidente.
- U_{Pmax} e U_{OC} subiscono variazioni minori (legge logaritmica).



$$U_{oc} \approx \frac{m \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right)$$

La dipendenza dalla temperatura

- All'aumentare della temperatura, la corrente di corto circuito I_{sc} aumenta, mentre I_{pm} diminuisce (poco nel c-Si, di più nell'a-Si).
- Le tensioni U_{oc} e U_{pm} diminuiscono sensibilmente (nel c-Si variazione relativa di $-0,37 \text{ %/}^\circ\text{C}$ per la U_{oc} e di $-0,5\text{%/}^\circ\text{C}$ per la U_{pm}).



Gradienti termici	
dU_{oc}/dT	$-2,2\text{mV/}^\circ\text{C}$
$dP_M/P_M/dT$	$-0,45\text{%/}^\circ\text{C}$

Approccio analitico sui parametri elettrici

Si scrivono formule semplici per la dipendenza dei principali parametri da irradianza e temperatura ($U_{Pm} \rightarrow U_{oc}$ e $I_{Pm} \rightarrow I_{sc}$)

$$I_{sc}(G, T_C) = I_{sc}(STC) \cdot \frac{G(W/m^2)}{1000} \cdot (1 + \alpha_{Isc} \cdot \Delta T_C)$$

$$U_{oc}(T_C) = U_{oc}(STC) \cdot (1 + \beta_{Uoc} \cdot \Delta T_C)$$

$$P_M(G, T_C) = P_M(STC) \cdot \frac{G(W/m^2)}{1000} \cdot (1 + \gamma_{Pm} \cdot \Delta T_C)$$

$$\eta(T_C) = \frac{P_M}{G \cdot A} = \frac{P_M(STC) \cdot (1 + \gamma_{Pm} \cdot \Delta T_C)}{1000 \cdot A}$$

dove $\Delta T_C = T_C - 25^\circ C$

Caratteristiche tecniche e dati di targa

La temperatura di cella di lavoro normale, NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), è la temperatura di equilibrio delle celle di un modulo, posto al sole, in condizioni normalizzate (CEI EN 60904-3):

- irradianza di 800 W/m^2 ($AM=1,5$);
- temperatura ambiente di $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- velocità del vento di 1 m/s .

NOCT si riferisce all'installazione su cavalletto, valori tipici $42\text{-}50 \text{ }^\circ\text{C}$; valori superiori di parecchi $^\circ\text{C}$ con installazione integrata su edifici. Utile per la stima di T_c con la formula

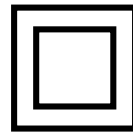


$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20^\circ\text{C}}{800 \text{ W/m}^2} \cdot G (\text{W/m}^2)$$



Requisiti di qualità

Tranne casi particolari, i moduli FV, utilizzati in impianti per connessione alla rete, devono avere le parti attive isolate in classe II (**doppio isolamento**: protezione combinata contro i contatti diretti e indiretti).



il parametro che dà la bontà dell'isolamento è:

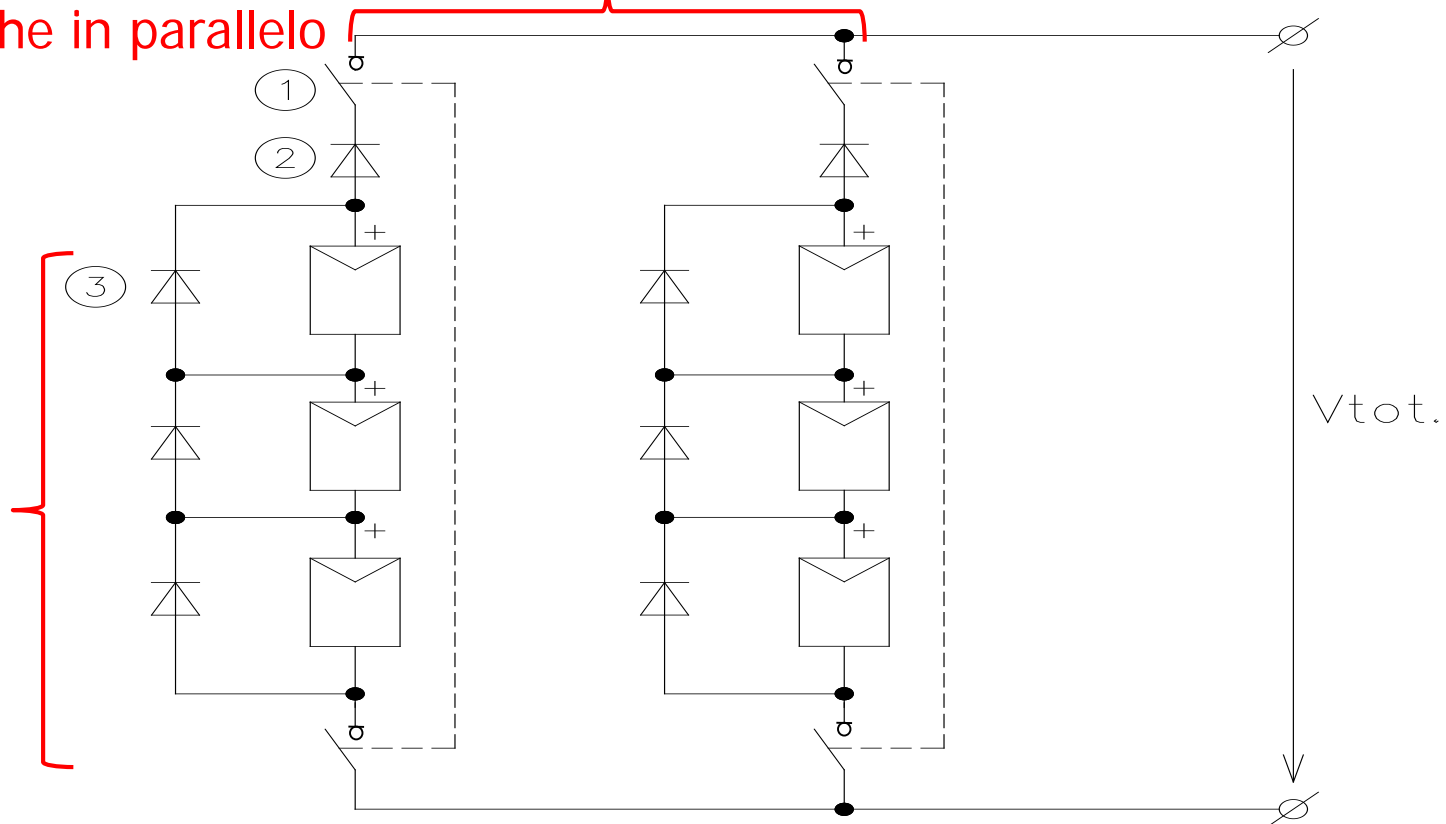
→ la **resistenza di isolamento**
(valori >> megaohm)

Il generatore fotovoltaico completo

Terminologia fotovoltaica: modulo (o pannello); stringa; interruttore di manovra - sezionatore (1); diodo di blocco (2); diodo di bypass (3); array; campo.

N_p stringhe in parallelo

N_s
moduli
in serie



Il generatore fotovoltaico completo

La curva I-V di un generatore FV è una "replica", in scala ampliata, di quella della cella con efficienza di conversione indipendente dalla potenza in uscita.

La struttura del generatore è modulare con possibilità di fare esperienza su potenze limitate, incrementabili nel futuro.

Il generatore FV lavora con potenza di ingresso indipendente dal carico, perciò presenta:

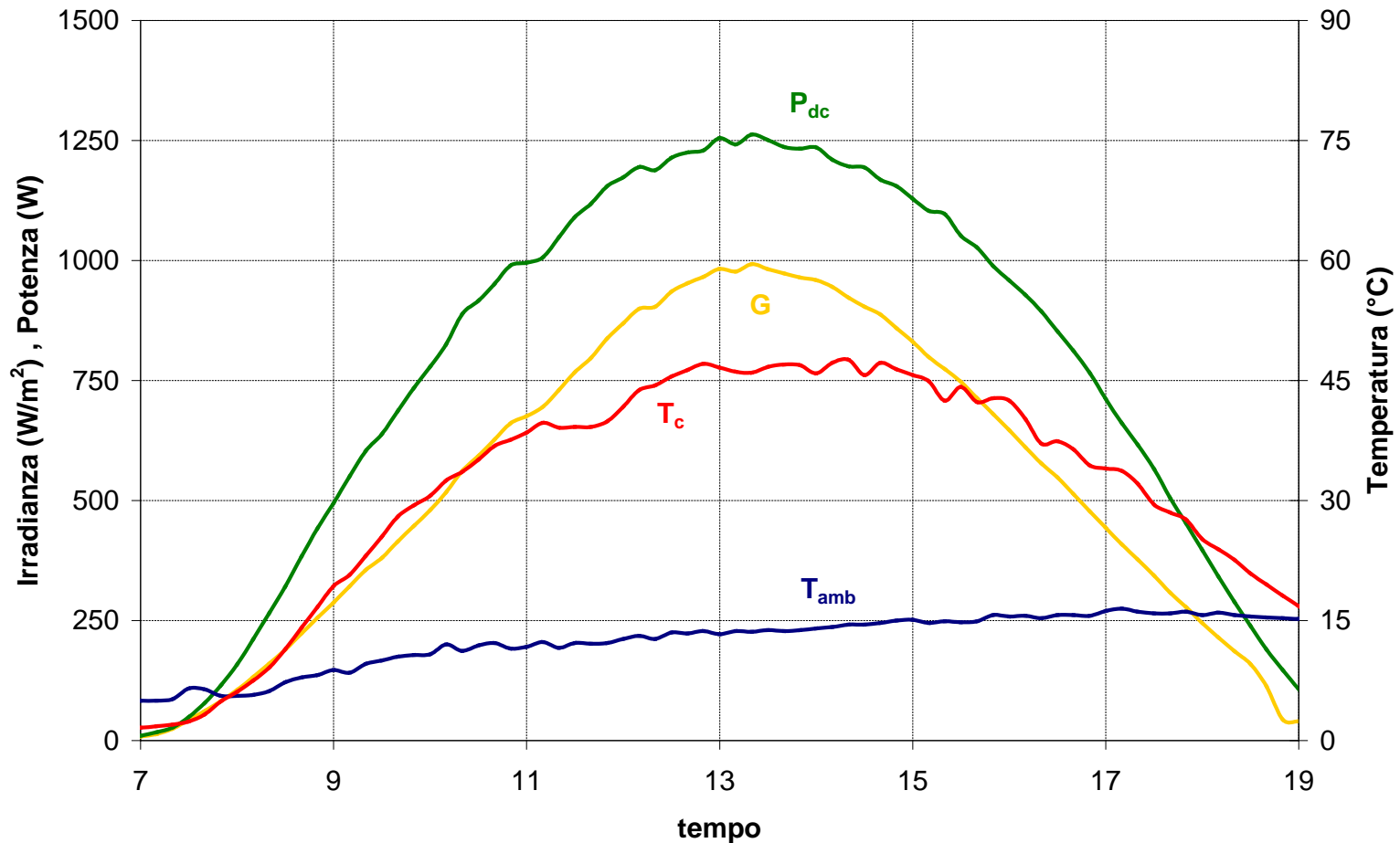
1. efficienza massima quando la potenza utilizzata è massima (condizione di adattamento del carico al generatore);
2. sovra-temperatura massima a circuito aperto e temperatura operativa minima quando la potenza consegnata al carico è massima.

Il generatore fotovoltaico completo

- I generatori FV lavorano meglio a bassa temperatura. A pari irradianza globale, se la temperatura è bassa (inverno), i rendimenti di conversione sono più alti (rispetto all'estate). Tuttavia, il parametro di maggior interesse è l'energia prodotta: questa è maggiore in estate.
- Il corto circuito in un generatore FV non è critico, perché la I_{sc} è dello stesso ordine di quella nominale. Un interruttore di manovra/sezionatore (IM/S) gestisce l'arco elettrico durante le manovre. Inoltre, il mismatch delle curve I-U dei moduli richiede diodi di bypass ed eventualmente diodi in serie a stringhe di moduli (di blocco).

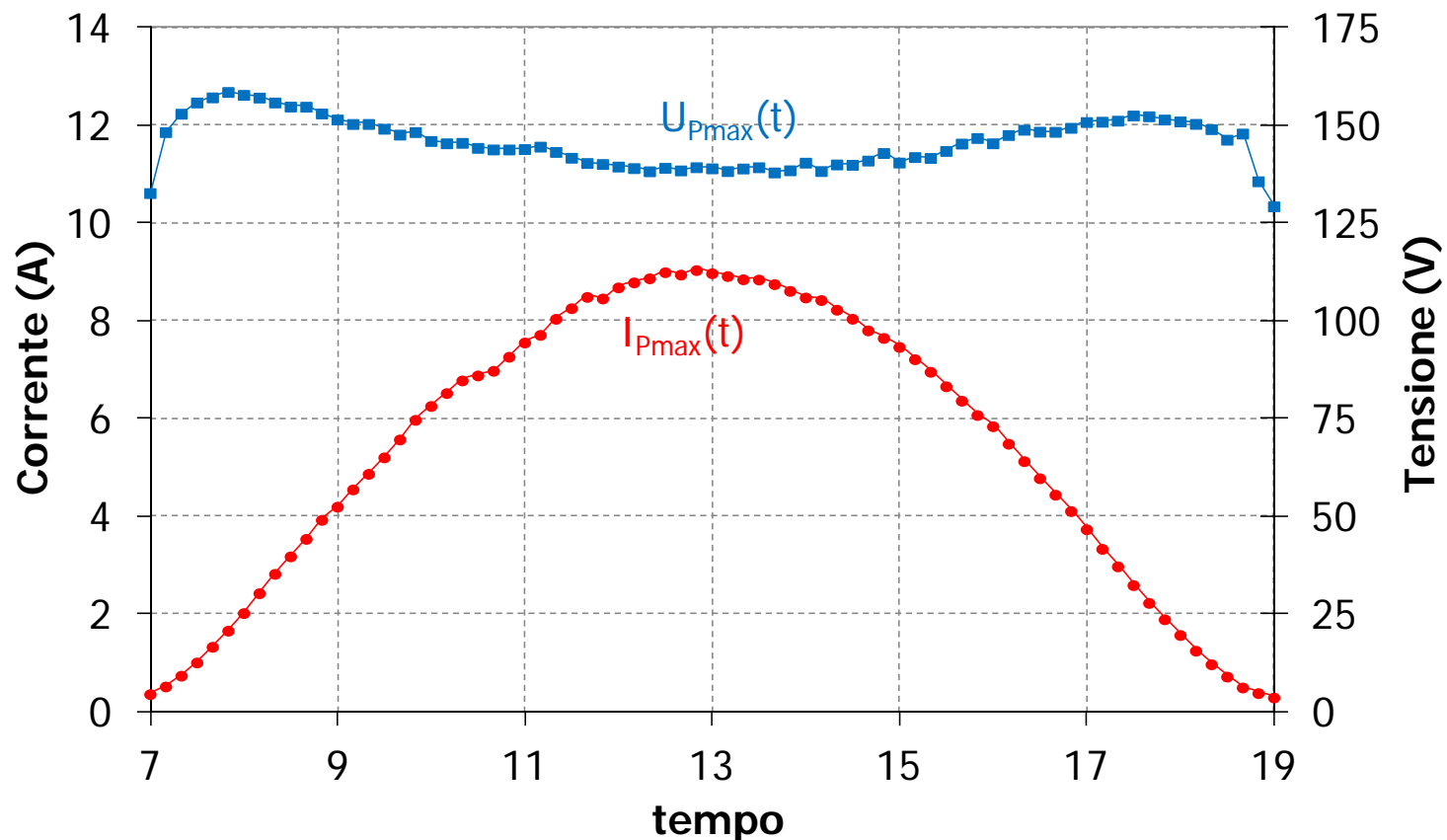
Variazione contemporanea di G e T in un giorno

Nella realtà, in un giorno, si ha una variazione simultanea di irradianza e temperatura (interdipendenza): la temperatura di cella dipende da temperatura ambiente e irradianza



Variazione contemporanea di G e T in un giorno

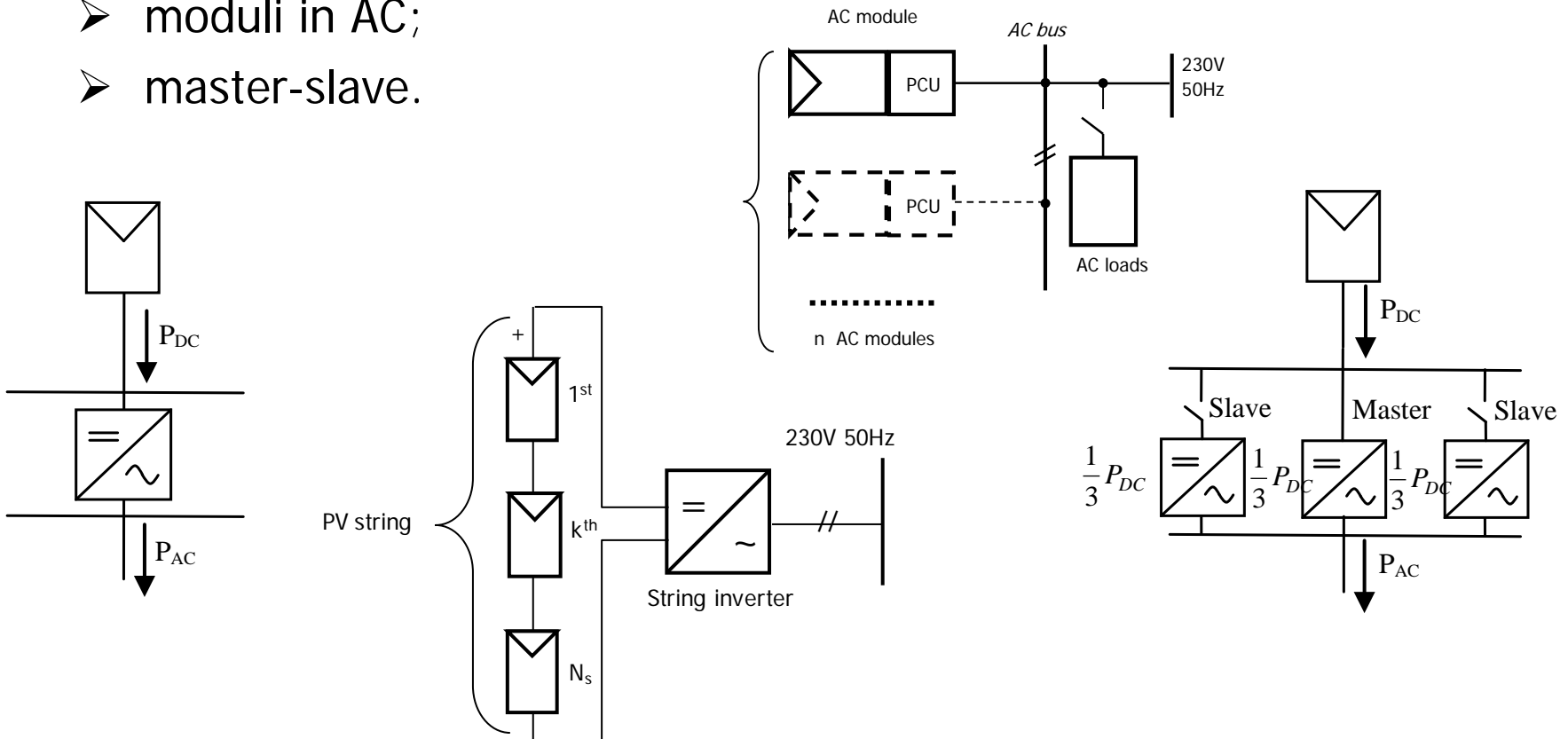
L'andamento della corrente (e potenza) è simile a quello dell'irradianza, la tensione risente dell'aumento di temperatura nelle ore centrali



Le tecnologie degli inverter

Configurazione dell'unità di condizionamento della potenza (PCU):

- centralizzata (inverter trifase o anche monofase);
- string inverter;
- moduli in AC;
- master-slave.



Le tecnologie degli inverter

Funzionalità richieste all'inverter per connessione alla rete:

- ❖ finestra di inseguimento della massima potenza (MPPT);
- ❖ regolazione di potenza attiva e reattiva (fattore di potenza unitario);
- ❖ protezione all'interfaccia con la rete.

L'accoppiamento con la rete avviene con trasformatore:

- con o senza trasformatore
- con trasformatore in bassa o in alta frequenza
- trifase o monofase

Calcolo convenzionale della producibilità

Nel progetto di un impianto FV connesso a rete è importante valutare, il più correttamente possibile, la **producibilità annuale** E_{AC} . Le formule usate possono essere queste:

$$E_{AC} = H_g \cdot S_{PV} \cdot \eta_{STC} \cdot PR$$

$$E_{AC} = P_N \cdot h_{eq} \cdot PR$$

dove H_g è l'irradiazione annuale sul piano inclinato (kWh/m^2), S_{PV} la superficie totale del generatore FV, η_{STC} l'efficienza nominale dei moduli, P_N la somma delle potenze di picco (STC); h_{eq} è il numero di ore equivalenti solari per anno; PR il Performance Ratio (parametro di confronto degli impianti FV).

Calcolo convenzionale della producibilità

Un'altra interpretazione della formula implica il concetto di resa (yield) per la stima della **producibilità giornaliera, mensile e annuale** E_{AC}

$$E_{AC} = P_N \cdot Y_R \cdot PR = P_N \cdot Y_F$$

dove:

Y_R resa di riferimento o peak solar hours (H_g/G_{STC} in h/giorno, h/mese e h/anno);

Y_F resa finale (E_{AC}/P_N in h/giorno, h/mese e h/anno);

P_N somma delle potenze nominali dei moduli FV (STC);

PR rapporto di prestazione per confrontare gli impianti FV.

Fonti di perdita nella producibilità

Varie **fonti di perdita** (o raramente **guadagni**) sono comprese nel PR, i principali sono:

1. tolleranza rispetto ai dati STC e mismatch intrinseco delle caratteristiche corrente - tensione I-V dei moduli
2. sporcizia e riflessione del vetro frontale
3. spettro solare diverso da quello di riferimento (AM=1,5)
4. cablaggi, diodi di blocco, fusibili e interruttori
5. sovra-temperature (o sotto) rispetto a 25 °C
6. illuminazione non-uniforme su tutti i moduli (shading effect)
7. MPP tracker e conversione DC-AC dell'inverter

$$PR = \eta_{mis} \cdot \eta_{d-r} \cdot \eta_{spec} \cdot \eta_{wir} \cdot \eta_{temp} \cdot \eta_{shad} \cdot \eta_{PCU}$$

Normativa CEI

Norme tecniche italiane:

- ❖ 82-25 "Guida alla realizzazione di sistemi di generazione fotovoltaica collegati alle reti elettriche di Media e Bassa Tensione";
- ❖ 64-8 "Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in c.a. e a 1500 V in c.c.";
- ❖ 0-16 "Regola tecnica per la connessione di utenti attivi e passivi alle reti AT ed MT delle imprese distributrici di energia elettrica";
- ❖ 0-21 "Regola tecnica per la connessione di utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica".

<https://ceimagazine.ceinorme.it/ceiagora/aggiornate-le-regole-tecniche-di-connessione-alle-reti-elettriche/>

Norme tecniche internazionali :

- ❖ CEI EN 61215 "Moduli fotovoltaici (FV) in silicio cristallino per applicazioni terrestri: qualifica del progetto e omologazione del tipo";

<https://ceimagazine.ceinorme.it/ceiagora/moduli-fotovoltaici/>

Normativa CEI

I punti salienti nella 82-25 sono riassunti nel seguito...

- disposizione dei moduli del generatore FV: distanza minima tra le file per evitare ombra;
- disponibilità della fonte solare (per es. radiazione con la UNI 10349);
- dimensionamento elettrico: la tensione della sezione in c.c.;
- dispositivo di protezione contro sovracorrente sul lato c.c.;
- corrente massima erogata in c.a. dall'inverter: contributo dell'impianto alla corrente di corto circuito;
- configurazione del sistema di conversione: monofase (≤ 6 kW) e trifase (> 6 kW); squilibrio max. di 6 kW;

Normativa CEI

- configurazione del sistema di conversione: se $P \leq 20$ kW, sono accettati i dispositivi di interfaccia interni fino a un max di 3;
- eventuale uso del differenziale di tipo B negli inverter transformerless;
- i cavi: caduta di tensione entro il 2%;
- protezione contro le sovratensioni (fulminazioni) dirette: collegamento o meno delle parti metalliche dell'impianto FV al LPS;
- classe del dispositivo di protezione SPD contro le fulminazioni di tipo indiretto;
- schemi elettrici di connessione alla rete e misura dell'energia.