



Energia Solare Fotovoltaica

Sezione 2 – Il generatore fotovoltaico

Corso di ENERGETICA A.A. 2013/2014

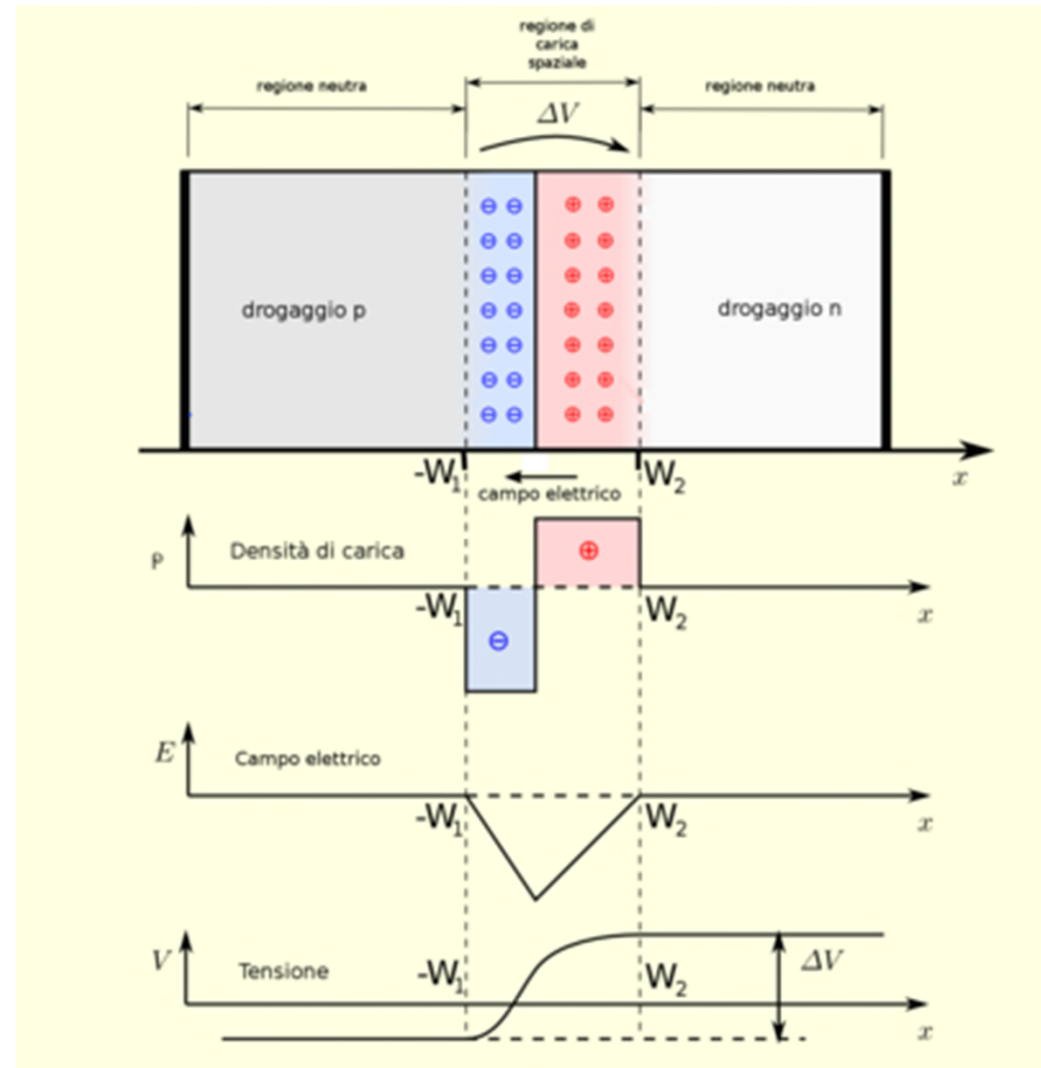
Docente: Prof. Renato Ricci
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Giunzione P-N

La giunzione p-n si verifica all'interfaccia di due semiconduttori posti a contatto qualora gli stessi siano drogati con componenti aventi Valenza diversa. La giunzione p-n è composta da due zone: una con un eccesso di [elettroni](#) (strato n) e una ad eccedenza di [lacune](#) (strato p). Le eccedenze di elettroni e lacune si ottengono mediante drogaggio, con varie tecniche; generalmente il Boro viene usato per realizzare la regione di tipo-p e il Fosforo per quella di tipo-n. Il Boro presenta infatti 3 elettroni nella Banda di Conduzione, Il Fosforo 5 elettroni mentre il Silicio, materiale di base che viene drogato, 4 elettroni.

Il Silicio drogato con il Boro (p) quando è posto a contatto con quello drogato con il Fosforo (n) inizia ad assorbire gli elettroni di quest'ultimo e trasferisce le sue Lacune verso lo stesso. In tal modo, dopo brevissimo tempo, il lato-p sarà polarizzato NEGATIVAMENTE e il lato-n POSITIVAMENTE; quando la differenza di potenziale che si instaura sull'interfaccia arriva ad un valore critico, che per il Silicio è circa 0.6-0.7 [V] il meccanismo di diffusione si ferma.

La polarizzazione della giunzione può essere DIRETTA o INVERSA. Si ha **polarizzazione diretta** quando la parte di *tipo P* è connessa al terminale *positivo* del generatore di tensione, mentre la parte di *tipo N* è connessa al terminale *negativo*.



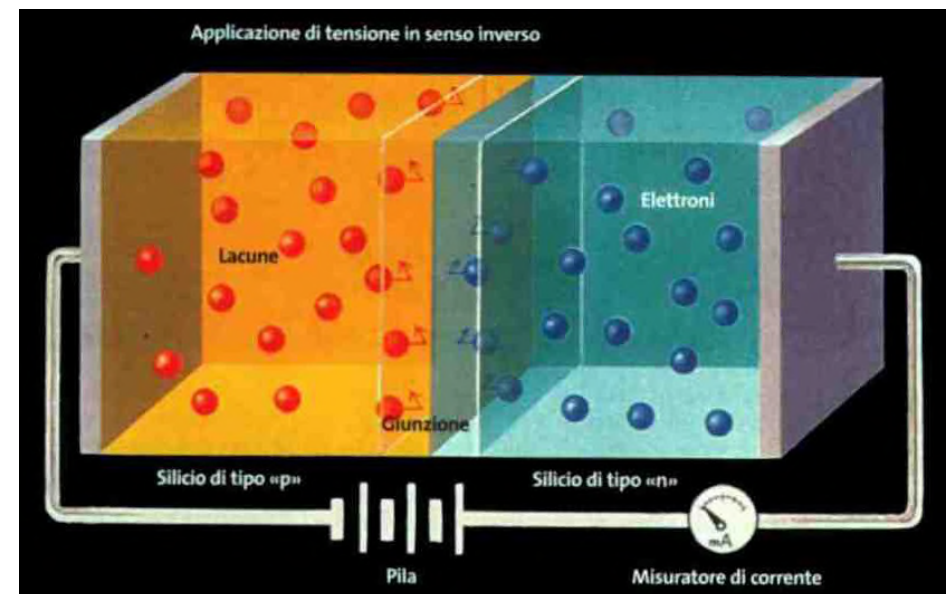
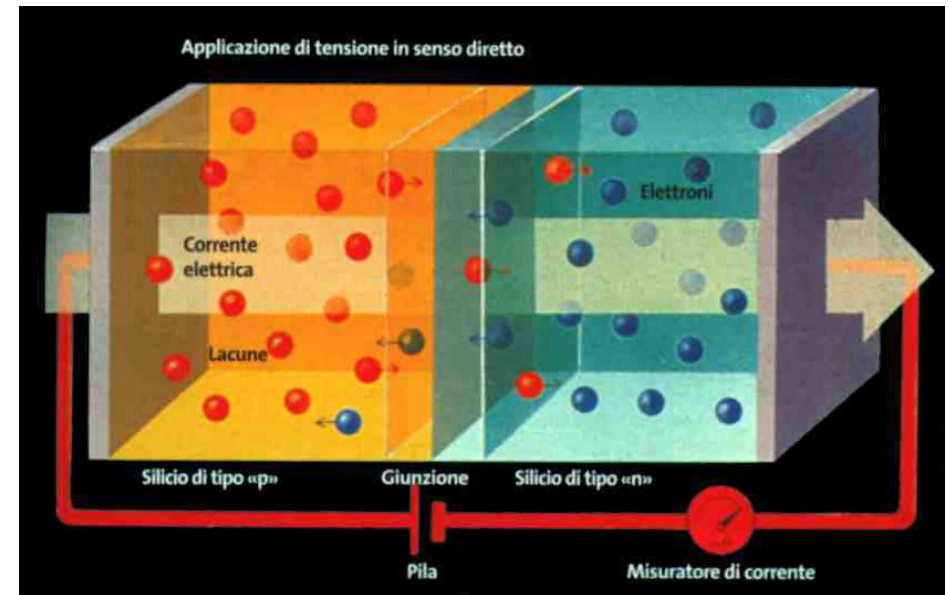
Polarizzazione Diretta ed Inversa

In questa configurazione, le lacune nella regione di tipo P e gli elettroni nella regione di tipo N sono spinti verso la giunzione, la zona di giunzione si assottiglia mano a mano fino ad abbassare la differenza di potenziale ed a consentire il passaggio degli elettroni e delle lacune. In questa situazione la Resistenza Elettrica della giunzione risulta trascurabile e la stessa entra in CONDUZIONE rendendo possibile il passaggio di una corrente elettrica.

Polarizzazione inversa

La polarizzazione INVERSA si ottiene collegando la regione di *tipo P* al terminale *negativo* dell'alimentazione e la regione di *tipo N* al terminale *positivo*. In tal modo la lacune vengono spinte lontano dalla giunzione, così come gli elettroni e, tutto ciò aumenta la barriera di potenziale IMPEDENDO, di fatto il passaggio della corrente (Effetto DIODO)

In tutti gli esempi fatti finora la giunzione risultava alimentata elettricamente, nel caso di una cella fotovoltaica è invece la radiazione solare a provvedere la fornitura di pacchetti energetici (FOTONI) che inducono sul semiconduttore il rilascio di una coppia elettrone-lacuna, grazie all'effetto fotoelettrico che si instaura nello strato irradiato. Il Silicio risulta sensibile a tale effetto per le radiazioni di lunghezza d'onda compresa fra 0.4 e 1.1 micron. Lunghezze d'onda maggiori non vengono assorbite, così come fotoni a lunghezze d'onda inferiori di 0.4 micron vengono utilizzati solo in parte per l'effetto fotoelettrico, il rimanente viene trasformato in CALORE.



Cella Fotovoltaica (1)

Come detto in precedenza il passaggio di un elettrone dalla Banda di Valenza alla Banda di Conduzione è causato dalla fornitura di una quantità di energia che dipende dalla struttura del materiale; a tale energia viene dato il nome di Energia di GAP ed il suo valore viene misurato in [eV]. Nel caso di una cella fotovoltaica l'energia viene fornita mediante una radiazione elettromagnetica, il cui contenuto energetico è rappresentato dal FOTONE, o quanto di energia, avente valore deducibile dalla Legge di Planck, secondo la quale:

$$E_{\text{fotone}} = \frac{h \cdot c_0}{n \cdot \lambda} \quad [J]$$

h = costante di Planck = $6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$

c_0 = velocità della luce nel vuoto = $2,998 \cdot 10^8 \text{ [m/s]}$

n = indice di rifrazione del mezzo

λ = lunghezza d'onda del Fotone [m]

$1[\text{eV}] = 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{J}]$

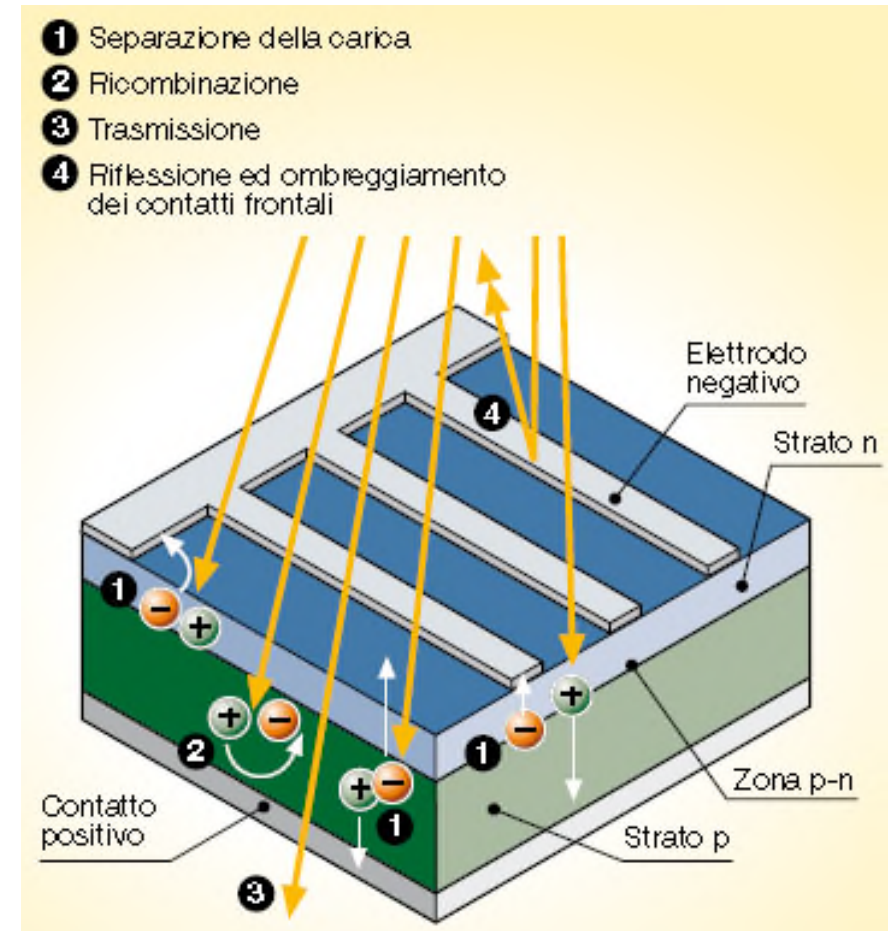
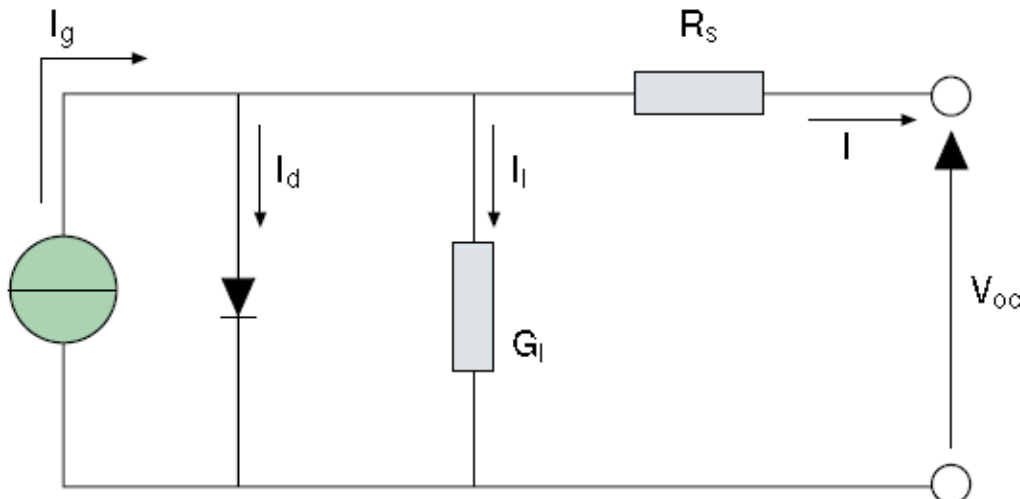
Il Silicio, ad esempio, presenta un'energia di Gap, E_g , pari a 1,12 [eV] pertanto per conoscere quale sia la lunghezza d'onda del fotone avente tale energia basta applicare l'equazione di Planck per ottenere:

$$\lambda = \frac{h \cdot c_0}{n \cdot E_g} = \frac{6,6256 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{1 \cdot 1,12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \quad 1,1 \cdot 10^{-6} [\text{m}] = 1,1 [\mu\text{m}]$$

ossia la lunghezza d'onda del FOTONE ricade nel Vicino Infrarosso. Fotoni di lunghezza d'onda minore hanno energia maggiore e, pertanto, solo una porzione della loro energia verrà utilizzata per eccitare l'elettrone, la rimanente verrà dissipata in calore. Fotoni di lunghezza d'onda superiore non riusciranno a provocare il passaggio dell'elettrone alla Banda di Conduzione (Effetto Fotovoltaico) e si limiterà ad eccitare solo a livello vibrazionale la struttura del materiale, inducendo un aumento di temperatura nello stesso.

Cella Fotovoltaica (2)

La tipica cella fotovoltaica prodotta industrialmente è costituita da una sottile fetta di silicio mono o policristallino, di spessore variabile fra 0.08 e 0.3 [mm], di forma circolare (ormai obsoleta), quadrata o rettangolare e con un'area di circa 100 - 200 cm². Nello spessore della cella si distinguono due strati semiconduttori: quello superiore esposto alla radiazione solare, molto sottile, di tipo N, ed un secondo strato, di tipo P, in cui avviene l'assorbimento della luce incidente. La luce genera all'interno della cella le coppie elettrone-lacuna, che migrano verso gli elettrodi sotto l'azione del campo elettrico presente alla giunzione p-n: gli elettroni vengono raccolti dall'elettrodo superiore, le lacune da quello inferiore, creando un generatore di corrente. Il comportamento elettrico di una cella può essere rappresentato con un **circuito elettrico equivalente** come in figura, anche se esistono diversi modelli con cui si rappresenta una cella fotovoltaica.



G_i =	Conduttanza di dispersione (3 - 5 mS)
R_s =	Resistenza interna associata al tipo di giunzione ed alle impurità dei materiali (0.05 - 0.1 Ω)
R_{carico} =	Resistenza del carico collegato alla cella
I_g	Corrente fotovoltaica
I_d	Corrente di Diodo
I_i	Corrente di dispersione
I	Corrente erogata al carico

Cella Fotovoltaica (3)

La conduttanza G_i tiene conto delle dispersioni verso terra durante il normale funzionamento mentre R_s rappresenta le perdite interne della cella e dipende dallo spessore della giunzione P-N, dalle impurità presenti e dalla resistenza di contatto. L'efficienza di conversione della cella è fortemente influenzata dal valore di R_s piuttosto che da G_i . La tensione a vuoto della cella (V_{oc}) si presenta quando il carico non assorbe corrente ($I=0$); conoscendo la conduttanza della cella si arriva alla determinazione di V_{oc} . La corrente che potrà essere erogata al carico sarà così pari alla corrente del generatore (I_g) diminuita di quella di diodo (I_d) e di quella persa internamente (I_i). Per conoscere la corrente di diodo bisogna prima conoscere la I_D , valutabile alimentando una cella oscurata con una tensione V_{oc} e misurando la corrente che circola all'interno della cella.

I_D : corrente di saturazione del diodo;

T : temperatura assoluta [K];

Q : carica dell'elettrone = $1.6 \cdot 10^{-19}$ [C];

K : costante di Boltzmann dei gas = $1.3805 \cdot 10^{-23}$ [J/K];

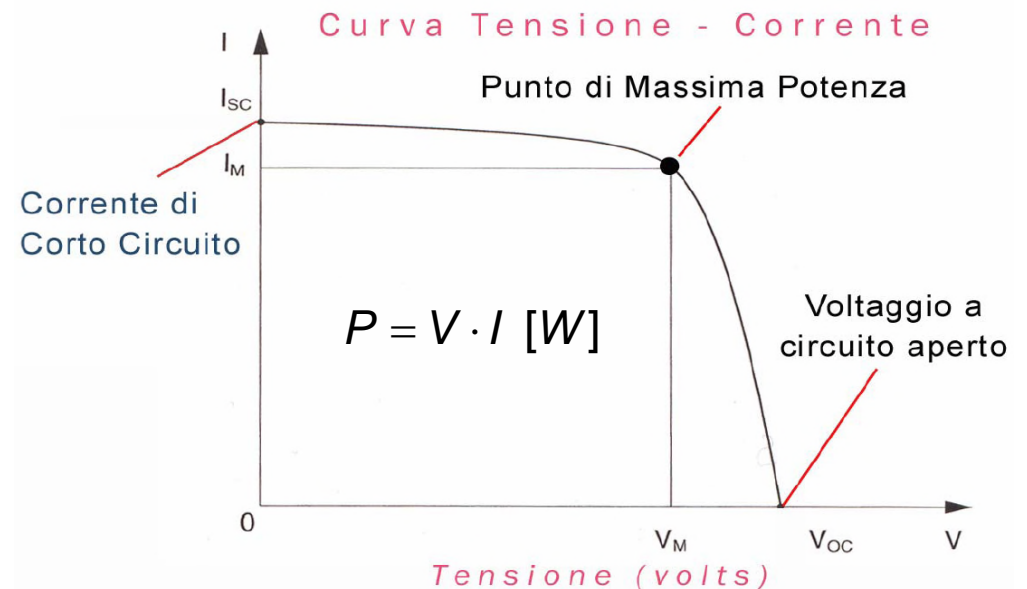
A : fattore di identità del diodo, per il silicio monocristallino è pari a 2

I : corrente [A] o in [mA].

$$V_{OC} = \frac{I_i}{G_i} [V] \quad I_d = I_D \cdot \left[e^{\left(\frac{Q \cdot V_{oc}}{A \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right] [A]$$

$$I = I_g - I_d - I_i = I_g - I_D \cdot \left[e^{\frac{Q \cdot V_{oc}}{k \cdot A \cdot T}} - 1 \right] - G_i \cdot V_{oc}$$

Tipo di cella	Area [cm ²]	V _{oc} [V]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	Efficienza [%]
Si cristallino	4.0	0.706	42.2	82.8	24.7
Ga As cristallino	3.9	1.022	28.2	87.1	25.1
Poli-Si	1.1	0.654	38.1	79.5	19.8
Si amorfo	1.0	0.887	19.4	74.1	12.7
Cu In Ga Se ₂ (CIGS)	1.0	0.669	35.7	77.0	18.4
Cd Te	1.1	0.848	25.9	74.5	16.4



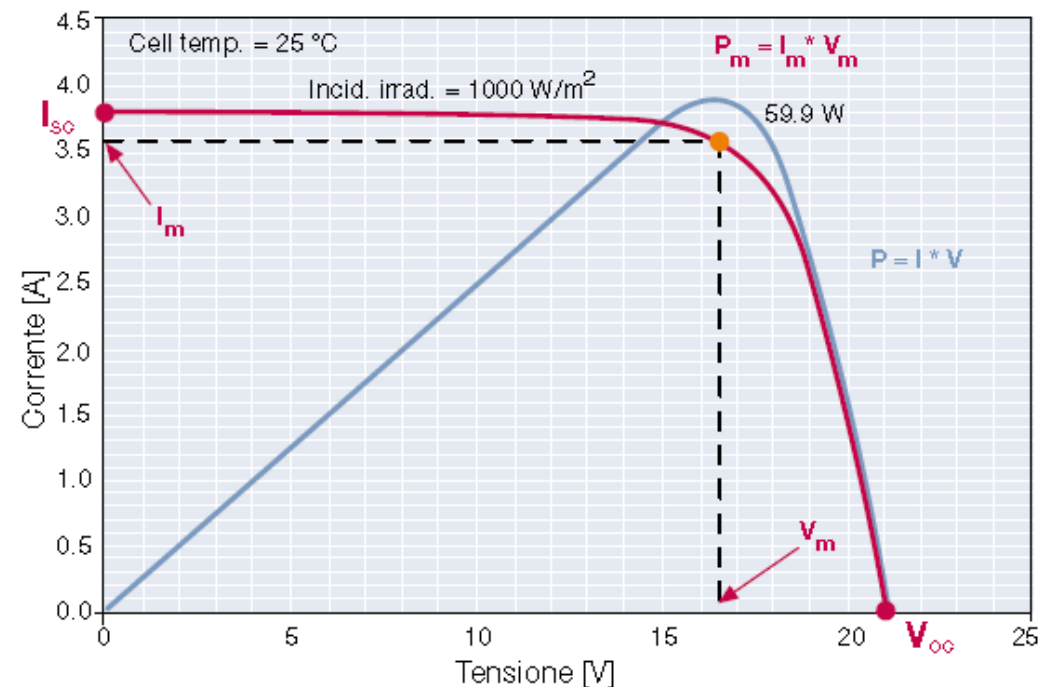
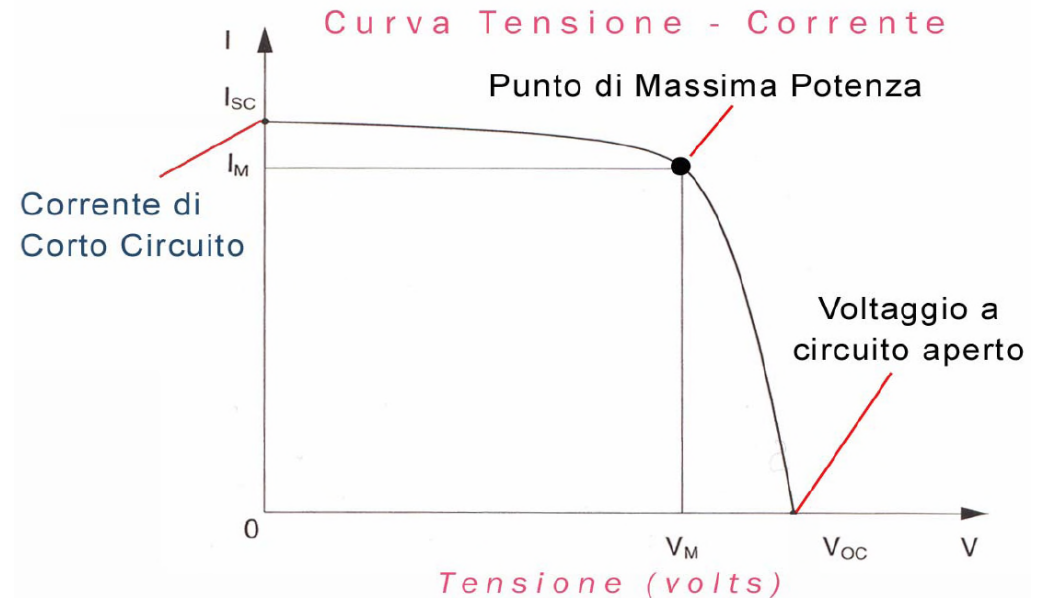
Cella Fotovoltaica (4)

Le celle fotovoltaiche sono caratterizzate da una curva V-I, dalla quale è possibile determinare le prestazioni elettriche, e definita Curva Caratteristica.

Corrente di corto circuito (I_{SC}) : in questa situazione si ha $V=0$ e $I=I_{SC}$, dove I_{SC} è la corrente erogata dalla cella quando a questa viene applicato un carico con resistenza nulla (I massima). Per celle al silicio monocristallino (10 x 10 cm) è di ~ 3 [A].

Circuito aperto (V_{OC}) : in questa situazione si ha $V=V_{OC}$ e $I=0$, dove V_{OC} è la tensione ai morsetti della cella quando a questa viene applicato un carico a resistenza infinita (V massima). Per celle monocristalline V_{OC} varia tra 0.5 e 0.6 [V], per celle al silicio amorfo varia tra 0.6 e 0.9 [V].

Potenza Massima (PM) : situazione di massima potenza ossia il punto in cui il prodotto tensione corrente della cella è massimo, in questa situazione si ha $PM=I_M \cdot V_M$. La potenza erogabile da una cella è massima in corrispondenza del ginocchio della curva, essa è caratterizzata dal rettangolo che ha l'area massima tra tutti i rettangoli inscrivibili all'interno della caratteristica.



Cella Fotovoltaica (5)

Quando ad una cella FV viene applicata una tensione dall'esterno IN SENSO INVERSO alla sua normale polarizzazione la potenza viene assorbita dalla cella e la corrente prodotta rimane costante ma se si aumenta ancora la tensione INVERSA oltre un certo valore, detto di BREAKDOWN, la giunzione P-N viene perforata. Quando si è in assenza di luce la corrente generata dalla cella (I_g) è NULLA fino ad una tensione inversa pari a quella di breakdown, superata la quale si inizia ad avere una corrente di scarica. Se colleghiamo il nostro generatore FV alla rete di distribuzione esterna avremo che un eventuale utilizzatore potrà ricevere corrente da ambedue le fonti. In generale avremo che:

$$I_u = I_g + I_r \quad \text{con} \quad I_u = \frac{U}{R_u}$$

ne segue che:

$$I_r = \frac{U}{R_u} - I_g$$

Durante la notte

$$\rightarrow I_r = \frac{U}{R_u} \quad \text{per} \quad I_g = 0$$

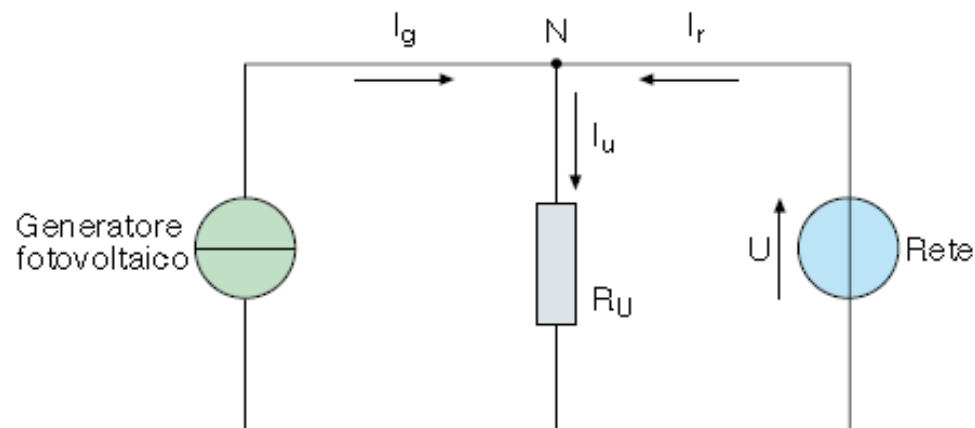
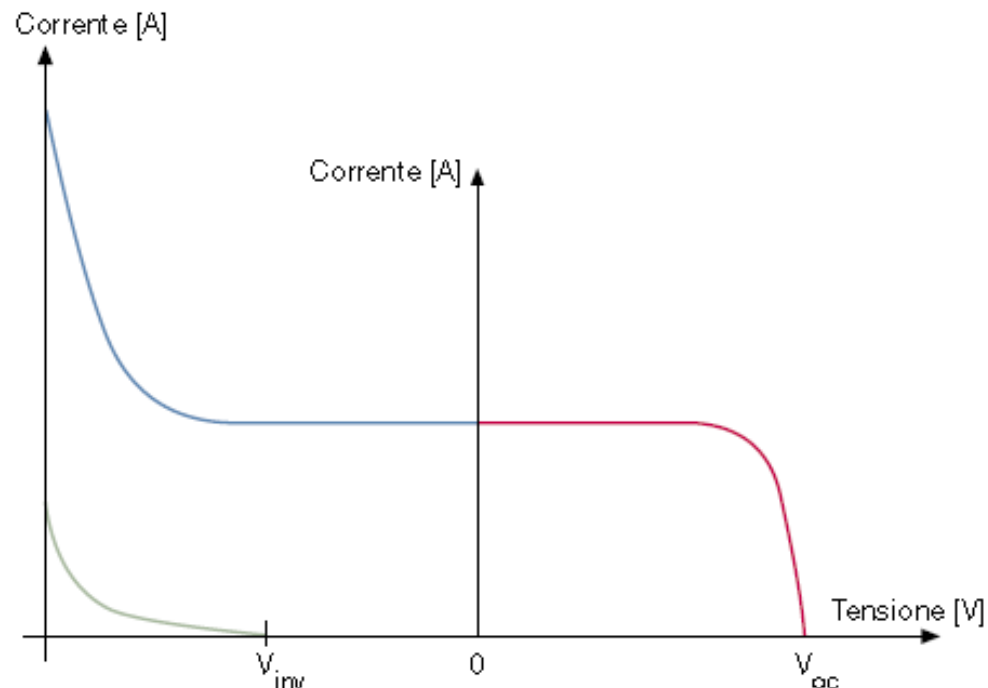
Durante il giorno a piena potenza FV

$$\rightarrow I_g = \frac{U}{R_u} \quad \text{per} \quad I_r = 0$$

$$P_u = U \cdot I_u = \frac{U^2}{R_u} = \text{Potenza assorbita dall'utilizzatore}$$

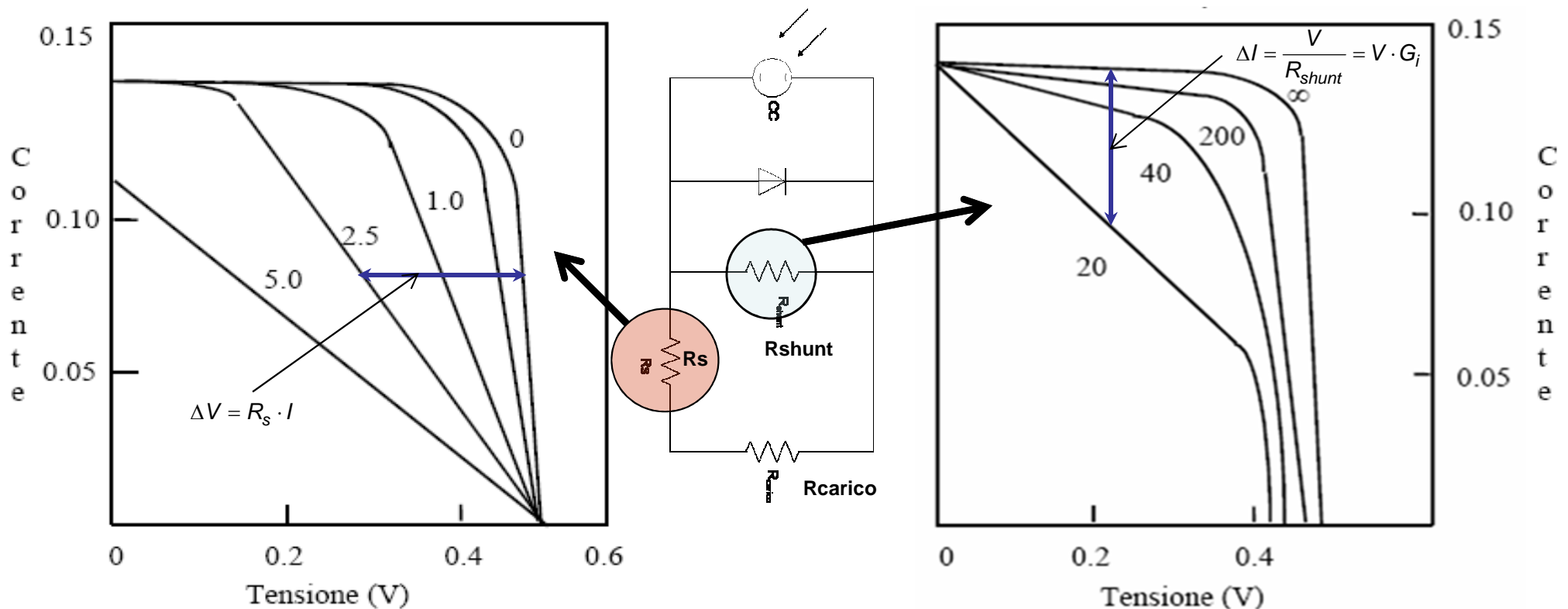
$$P_g = U \cdot I_g = \text{Potenza generata dall'impianto FV}$$

$$P_r = U \cdot I_r = \text{Potenza fornita dalla rete}$$



Cella Fotovoltaica (6)

A parità di condizioni di Irraggiamento le prestazioni di una cella possono variare sensibilmente al modificarsi delle sue proprietà intrinseche. E' evidente che da un punto di vista energetico sarebbe auspicabile che tutte le coppie elettrone-lacuna generate dall'effetto Fotoelettrico fluiscano verso il carico esterno, senza ricombinarsi all'interno della stessa giunzione. Per far ciò è importante che la Resistenza di Shunt della cella sia la più alta possibile e ciò dipende dalla qualità e dal grado di purezza della cella stessa. In basso a DX è visibile l'effetto associato ad una diminuzione della resistenza di Shunt, che va ad influenzare il valore della Potenza massima riducendo sensibilmente la tensione disponibile in uscita. Ad un risultato simile si giunge qualora venga ad aumentare la Resistenza Interna, associata al cablaggio elettrico della cella ed al sistema di fissaggio dello stesso; in questo caso la riduzione di voltaggio risulta ancora più marcata a causa della caduta sull'interfaccia che separa la cella dai contatti.

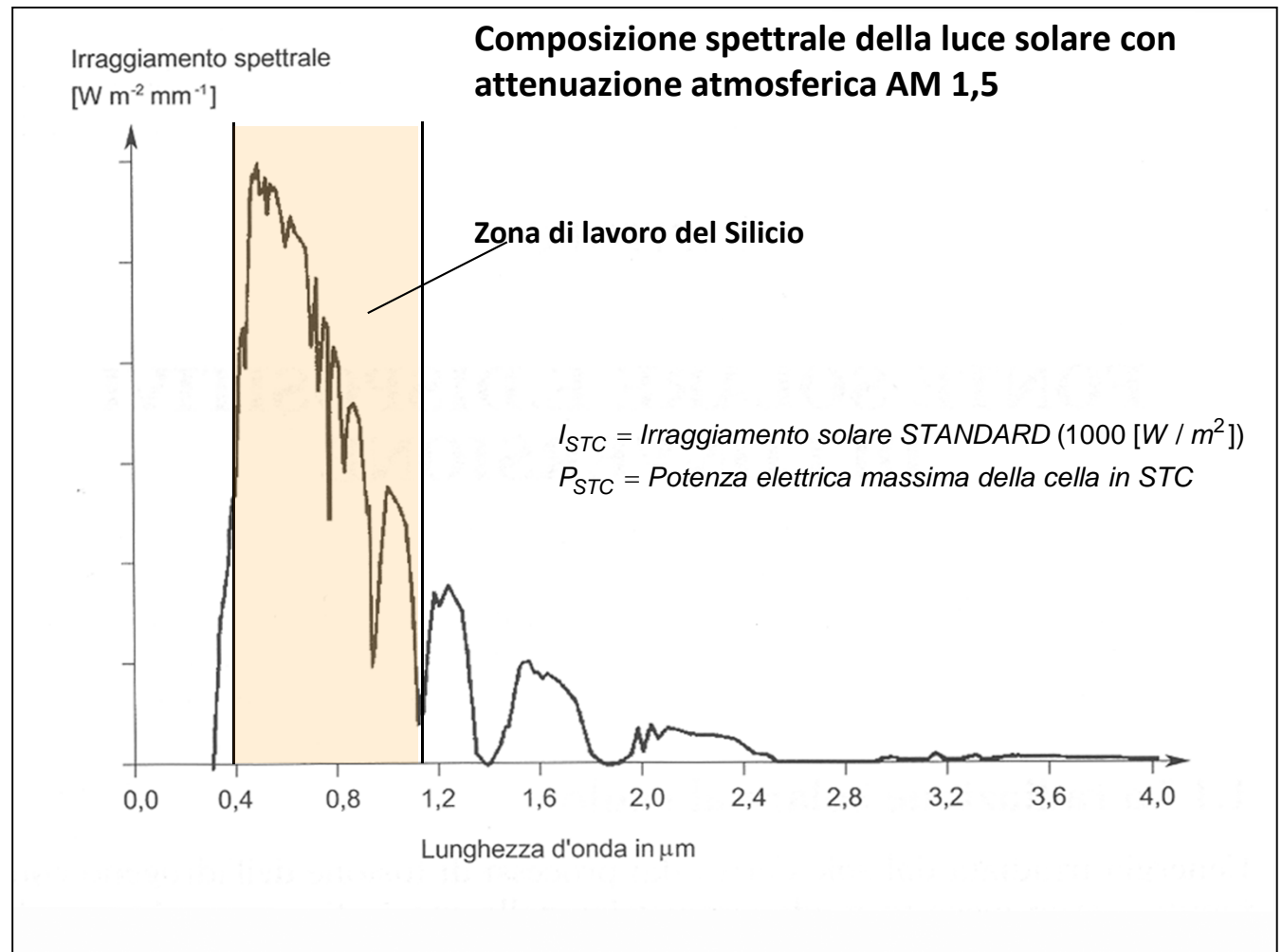


Cella Fotovoltaica (7)

Per valutare le prestazioni di una cella o di un modulo fotovoltaico è necessario che si faccia riferimento ad una distribuzione spettrale, della radiazione solare incidente, che sia di riferimento; il problema che emerge immediatamente è che l'assorbimento atmosferico dipende dallo spessore e dalle caratteristiche della fascia atmosferica interposta fra la radiazione incidente ed il modulo oggetto di prova.

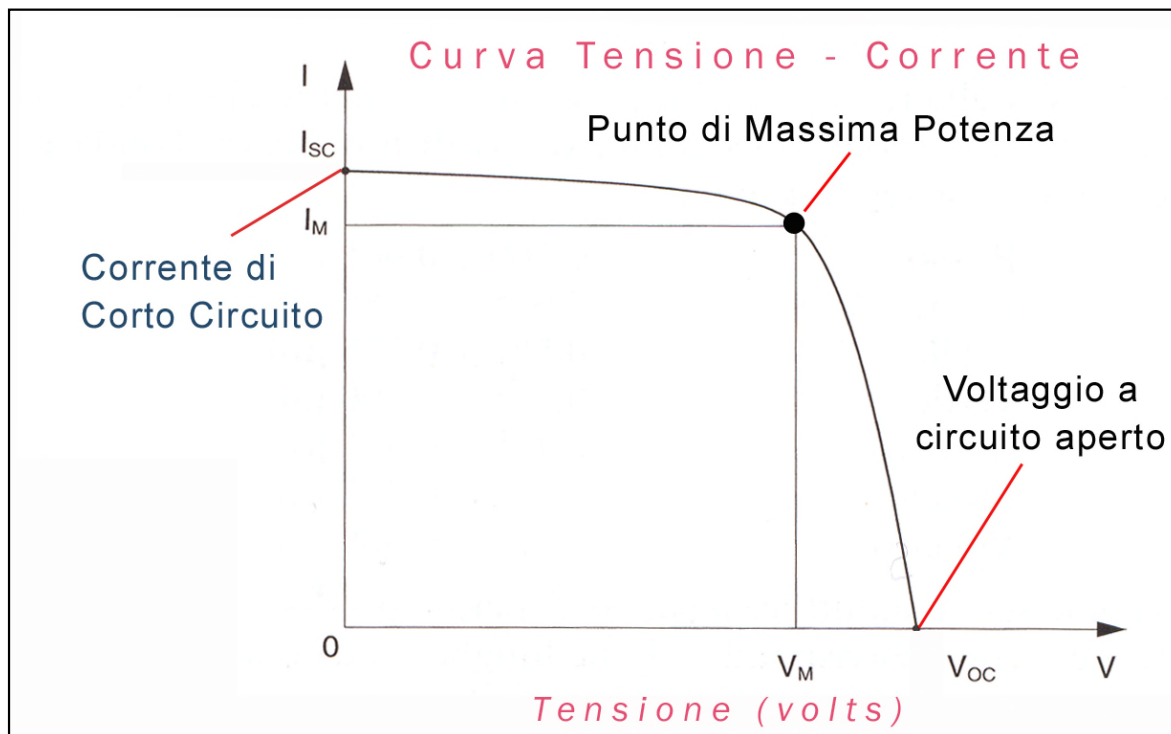
Come detto in precedenza la norma CEI 82-3 definisce un valore standard di distribuzione spettrale al suolo chiamato **AM1.5**; tale dato esprime il rapporto fra: il percorso effettivo fatto dai raggi solari nell'attraversare l'atmosfera ed il percorso che gli stessi raggi fanno qualora il sole si trovi allo Zenith. Con questa distribuzione spettrale viene assunto un valore di Irraggiamento per unità di superficie di **1000 [W/m²]** ed una temperatura della cella di **25 [° C]**; l'insieme delle 3 condizioni di prova danno origine a quelle che vengono chiamate **STC** (Standard Test Conditions). Il rendimento energetico nominale della cella, anche chiamata *Efficienza Nominale*, viene così definito come:

$$\eta_{cella} = \frac{P_{STC}}{I_{STC} \cdot A_{cella}}$$



Cella Fotovoltaica (8)

Le prestazioni elettriche di una cella fotovoltaica, così come di un pannello, sono descrivibili mediante il grafico Corrente-Voltaggio; emerge chiaramente come a Circuito Aperto, punto V_{OC} , ossia quando il pannello non è collegato al carico, si ha il massimo voltaggio, la corrente massima si ha invece in condizioni di Corto Circuito, I_{SC} . La potenza elettrica generata è pari al prodotto della corrente per il voltaggio, tale potenza assume il valore massimo laddove la curva caratteristica del pannello mostra il “ginocchio”, la cui forma è intimamente legata alla tipologia di cella selezionata. E' evidente che la cella migliore è quella che riesce ad erogare una corrente costante al variare del voltaggio ma in pratica ciò non è possibile e l'allontanamento dalla situazione “ideale” viene quantificato mediante un parametro denominato FILL-FACTOR. Nel Silicio Amorfo FF assume valori bassi, fino a 0.5, sale a circa 0.65 nei moduli a Film Sottile per arrivare a 0.7-0.8 nei moduli in Silicio Policristallino e Silicio Monocristallino.



Potenza Elettrica

$$P = V \cdot I$$

Potenza Massima

$$P_M = V_M \cdot I_M$$

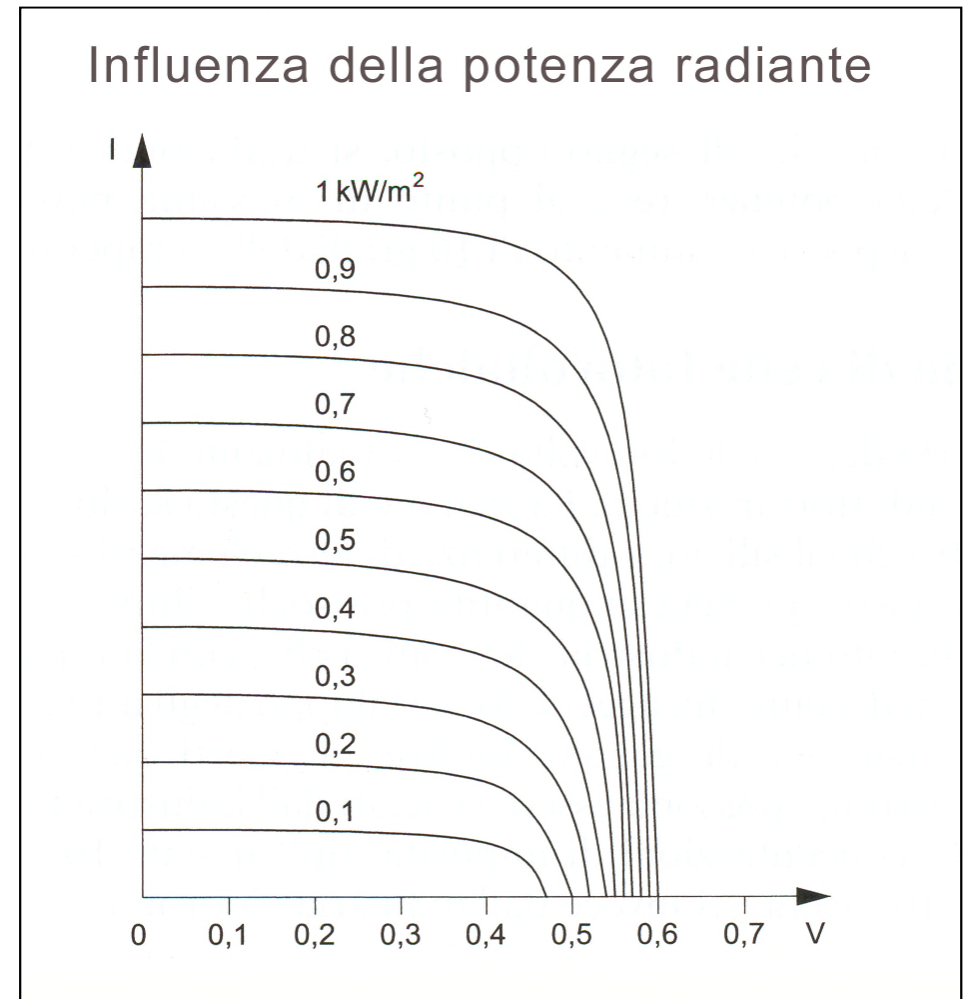
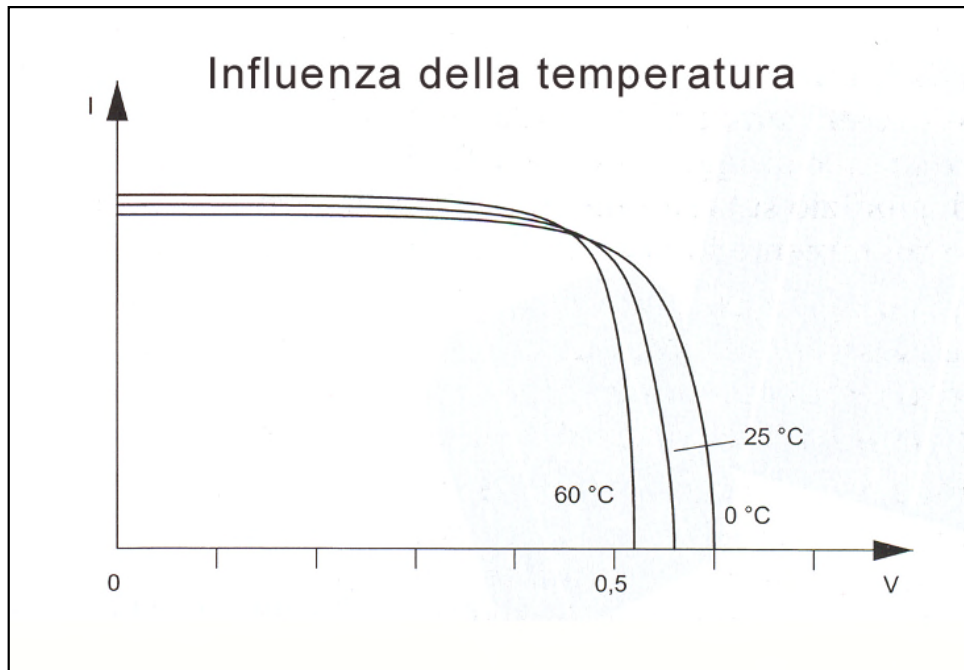
Fill - Factor

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \cong 0,75 \div 0,80$$

Cella Fotovoltaica (9)

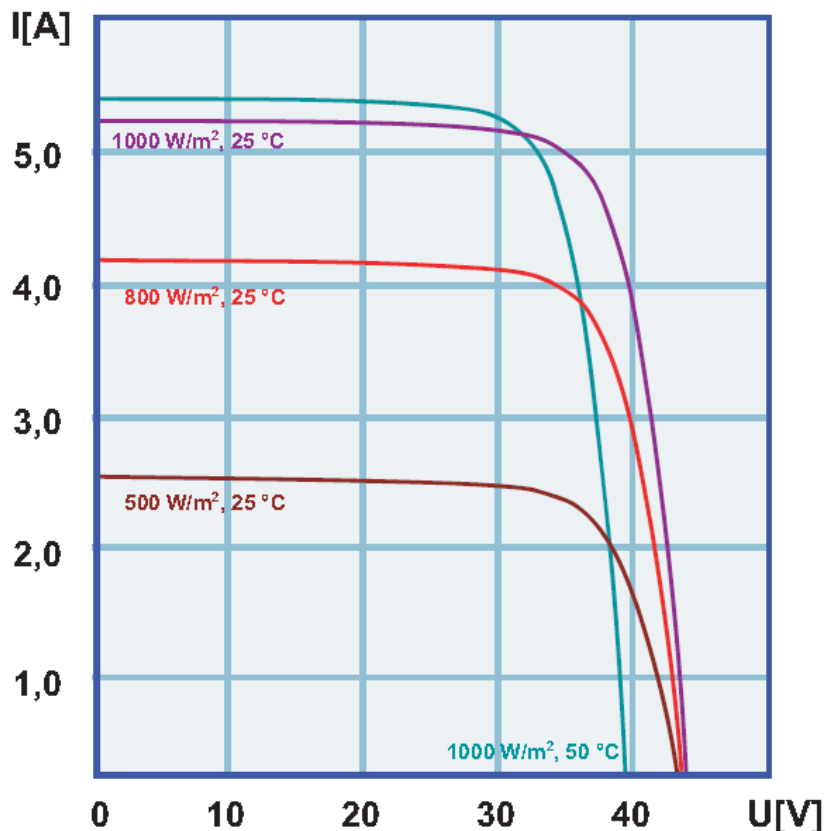
L'analisi fatta in precedenza vale per una cella che operi in condizioni STC, operativamente ciò non si verifica mai, per cui è importante conoscere come le caratteristiche elettriche della cella vengano a modificarsi al variare della temperatura ambiente e della **Irradiazione solare** incidente. Al diminuire della potenza radiante si ha una decisa riduzione della corrente di corto circuito, di contro il voltaggio a circuito aperto non varia in modo marcato; il risultato sarà una forte diminuzione della potenza massima erogabile dal pannello

La temperatura gioca un ruolo differente modificando invece il voltaggio a circuito aperto e operando una moderata influenza sulla corrente di corto circuito; l'influenza sul valore di potenza massima risulta meno marcata. Il Silicio Amorfo risulta meno influenzato dalla variazione della temperatura dalle condizioni STC.



Cella Fotovoltaica (10)

La temperatura di lavoro della cella gioca un ruolo fondamentale; il costruttore del modulo FV fornisce un valore nominale (Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)), in genere compreso fra 41 e 50 [° C], che rappresenta la temperatura raggiunta dalla cella quando sottoposta ad un irraggiamento di 800 [W/m²], con una temperatura dell'aria di 20 [° C], una velocità del vento di 1 [m/s] ed uno spettro di radiazione AM1.5 . Tanto più piccolo è il NOCT tanto migliore è la qualità della cella, poiché indica una buona capacità di conversione energetica ed un buon smaltimento del calore. Se però la temperatura ambiente è inferiore a 20 [° C] la temperatura della cella diminuisce di conseguenza ed **aumenta la sua tensione a vuoto** (V_{OC}); ciò modifica la tensione massima di uscita del modulo ma anche il voltaggio al punto di Massima Potenza.



$$T_{cell} = T_a + G_p \cdot \frac{NOCT - 20}{800}$$

$$V_{OC}(T) = V_{OC, stc} - N_s \cdot \beta \cdot (25 - T_{cel})$$

Norma CEI 82-25 Iled.

Temperatura cella al variare delle condizioni di funzionamento

Voc del modulo al variare delle condizioni di funzionamento

Variazione percentuale di potenza associata ad una temperatura della cella diversa da 25 [° C]

$$\Delta P_m(\%) = C_T \cdot (T_{cell} - 25)$$

Tipologia Modulo	CT (%/°C)	NOCT (°C)	η (%)
Silicio Monocristallino	da -0.3 a -0.5	da 41 a 50	da 16 a 19
Silicio Policristallino	da -0.3 a -0.5	da 41 a 50	da 13 a 17
Silicio Amorfo	da -0.2 a -0.5	da 41 a 50	da 5 a 8
CdTe	da -0.22 a -0.46	da 41 a 50	da 9 a 10
CIS	da -0.26 a -0.5	da 41 a 50	da 10 a 12
Multigiunzione (HIT)	-0.3	da 41 a 50	> 19

G_p =Radiazione incidente sul piano dei moduli; N_s =numero di celle in serie nel modulo; β =coefficiente termico di V_{OC}

Cella Fotovoltaica (10bis)

La POTENZA nominale della cella fotovoltaica viene modificata al variare della temperatura di funzionamento della stessa, T_{cell} , e di quella dell'ambiente di lavoro, T_a . Generalmente le due temperature sono legate fra esse in quanto un aumento di T_{cell} è dipendente da una marcata variazione del clima operativo.

La norma CEI 82-25 I ed. Fornisce indicazioni per la stima della variazione della potenza nominale del pannello qualora si conosca la temperatura ambiente o la temperatura a cui sta operando la cella FV.

A tal proposito, e richiamando simboli utilizzati già in precedenza, possiamo definire un "rendimento termico" di lavoro del pannello (η_T) e calcolare la Potenza nominale Effettiva di lavoro:

$$\Delta P_n = \frac{CT}{100} \cdot (T_a - 25 + G_p \cdot \frac{NOCT - 20}{800}) \quad \text{Qualora si conosca la } T_a$$

$$\Delta P_n = \frac{CT}{100} \cdot (T_{cell} - 25) \quad \text{Qualora si conosca la } T_{cell}$$

In tal caso la Potenza Nominale Effettiva del Modulo sarà data da: $P_{n,eff} = (1 + \Delta P - 0.08) \cdot P_n$

dove "0.08" viene inserito per tenere conto delle perdite eventuali di collegamento e di lavoro del pannello.

Il calcolo dell'Energia elettrica prodotta dal pannello nel corso dell'anno sarà così valutabile come:

$$E_{el}(\Delta t) = P_{n,eff} \cdot \frac{E_{sol}(\Delta t)}{1000} \cdot K$$

dove K è un coefficiente che tiene conto dell'ombreggiamento (compreso fra 0.9 e 0.98) e Δt è il periodo di tempo per il quale si valuta la produzione.

CELLE IN SILICIO CRISTALLINO

Il Diossido di Silicio è il costituente principale delle Celle in Silicio Cristallino; la sabbia viene fusa insieme a Polverino di Carbone e si ottiene un Silicio al 98% di purezza che, trattato in forno con acido idrocloridrico diventa liquido e distillato a 1000 [° C] assume, nel raffreddamento, le caratteristiche di Silicio Monocristallino o di Policristallino.

SILICIO MONOCRISTALLINO

Si ottiene mediante la fusione dei cristalli di Silicio ad una temperatura di 1420 [° C]; il raffreddamento è a temperatura controllata così da produrre un unico cristallo di forma circolare ed avente diametro di 30 centimetri, la lunghezza della barra è di alcuni metri ed il tutto viene fatto a fette di spessore pari a 80-300 micron. Il processo testé descritto prende il nome di metodo Czochralski. Solo a questo punto si passa al drogaggio dei Wafer ottenuti dal taglio diffondendo dapprima atomi di Boro (strato -p) e, successivamente, gli atomi di fosforo (strato-n); il tutto avviene ad una temperatura di 800-1000 [° C].

I contatti elettrici posteriori vengono quindi apposti, seguiti da quelli frontali; solo a questo punto la cella viene trattata con uno strato di materiale anti-riflesso (ARC). Le Celle in Monocristallino presentano una efficienza compresa fra 15 e 18% e la forma può essere circolare (10, 12.5 o 15 cm di diametro), quadrata (10x10 o 12.5x12.5 cm) e pseudoquadrata. Il colore della cella è in genere BLU scuro o nero, se trattata con trattamento AR, è invece GRIGIO se non viene trattata.

SILICIO POLICRISTALLINO

Si ottiene mediante riscaldamento a 1500 [° C] di Silicio a bassa purezza, il tutto viene quindi raffreddato a 800 [° C] creando dei blocchi di 40x40x30 centimetri. Tali blocchi, una volta divisi in lingotti, vengono tagliati a fette da 80-300 micron ed arredati di contatti elettrici posteriori e superiori, completando il tutto con trattamento antiriflesso (ARC). Le Celle in Policristallino presentano una efficienza compresa fra 13 e 15% e la forma è quadrata (10x10 o 12.5x12.5 cm). Il colore della cella è in genere BLU, se trattata con trattamento AR, è invece GRIGIO –ARGENTO se non viene trattata.

CELLE POWER (*POLycrystalline Wafer Engineering Result*)

Analoghe a quelle in Silicio Policristallino, queste Celle presentano i contatti SERIGRAFATI su ambedue le facce prestando attenzione a disporre perpendicolarmente i contatti di una faccia con quelli dell'altra. La cella viene forata con fori microscopici così che presenti una apparente trasparenza. Le Celle POWER presentano una efficienza di circa il 10% e la forma è quadrata (10x10 cm), lo spessore è di 300 micron come le altre celle al Silicio mentre il colore è analogo a quello delle Policristalline.

CELLE RIBBON

Nasce dall'idea di contenere il Silicio perso per il taglio (circa il 50% del totale) creando sottili fogli di silicio di spessore inferiore a 100 micron che, successivamente, vengono tagliati al laser.

CELLE EFG (*Edge defined Film-fed Growth*)

Della famiglia della Ribbon troviamo le EFG che vengono ottenute lasciando depositare del Silicio su una barra di Grafite Ottagonale. Mano a mano che la barra viene estratta dal bagno il silicio si solidifica creando alla fine un ottagono di circa 6 metri di lunghezza. A questo punto ognuno dei lati rivestiti, larghi 10 centimetri, viene tagliato in lunghezza e sezionato al laser. Vengono inseriti i contatti ed il rivestimento ARC; il Silicio delle celle è Policristallino anche se apparentemente può essere confuso con il Monocristallino. L'efficienza è del 14% e la cella è quadrata da 10x10 o rettangolare da 10x15 centimetri. Lo spessore è di 280 micron ed il colore è Blu.

CELLE RIBBON POLICRISTALLINE

Il processo può essere ancora più spinto se all'interno del bagno di silicio fuso vengono fatti passare DUE nastri in carbonio o di quarzo verticalmente. Il silicio rimane intrappolato fra i due nastri formando uno spessore continuo di 8 centimetri; andando avanti il silicio viene avvolto su di una bobina per essere tagliato a fette. L'efficienza è del 12% mentre le dimensioni della cella sono 8x15 centimetri. Lo spessore è di 300 micron ed il colore è Blu.

Cella fotovoltaica (13)

CELLE APEX

Sono celle in silicio policristallino a film sottile costituite da un substrato ceramico sul quale viene depositata una sottile pellicola di Silicio di spessore variabile fra 30 e 100 micron. L'efficienza è del 9.5% e la dimensione è di 20.8x20.8 cm., di colore Blu.

CELLE A FILM SOTTILE

Sono analoghe alle celle Apex ma non sono di Silicio cristallino. Vengono utilizzati sia il Silicio Amorfo che il Tellururo di Cadmio (CdTe), ultimamente sono utilizzati anche il Diseleniuro di Rame ed Indio (CIS-Copper Indium di Selenide) ed il CIGS (Diseleniuro di Rame Indio Gallio e Zolfo). La deposizione del materiale è per spruzzamento catodico o per deposizione elettrolitica e si raggiungono spessore di appena 1 micron, con processi termici di soli 200-500 ° C. I contatti elettrici posteriori sono in genere formati da una copertura metallica continua diversamente, quelli superiori, sono ottenuti dal rivestimento di ossidi metallici trasparenti, come l'ossido di Zinco o di stagno o, ancor meglio, l'Ossido di Titanio ed Indio (ITO).

CELLE IN SILICIO AMORFO (a-Si)

Fra le celle a film sottile quelle in Silicio Amorfo sono le più diffuse; purtroppo esse soffrono di bassa efficienza che, fra l'altro, diminuisce ulteriormente nei primi 6-12 mesi di funzionamento (effetto Staebler-Wronski). Tale effetto viene mitigato qualora si utilizzino celle sovrapposte (giunzione multipla). L'efficienza della cella è di 5-8% a regime mentre la forma può essere variabile. In genere i moduli sono da 77x244 cm oppure da 200x300 cm. Lo spessore del substrato su cui viene deposto il silicio amorfo è di circa 1 mm e lo strato di silicio è di 1 micron.

CELLE CIS (CuInSe₂) – Diseleniuro di Rame e Indio

La superficie posteriore è di vetro, su cui viene deposto un sottile strato di Molibdeno che funge da contatto elettrico. Lo strato P viene ottenuto mediante vaporizzazione sottovuoto di rame, indio e selenio a 500 gradi mentre, i contatti frontali sono realizzati con ossido di zinco drogato con alluminio, che è trasparente alla radiazione solare. L'efficienza delle celle è di 7.5-9.5% e le dimensioni del pannello sono 120x60 cm, con uno spessore di 3 millimetri complessivi, di cui solo 3 micron sono di materiale fotosensibile.

Cella fotovoltaica (14)

CELLE CIGS E CIGSS (Cu(In, Ga) Se₂) – Diseleniuro di Rame, Indio e Gallio

Anche queste celle sono realizzate a film sottile e, come le CIS, hanno la capacità di operare in diverse bande di frequenza della radiazione elettromagnetica incidente. Ciò è reso possibile dall'uso combinato di Indio, Gallio ed Alluminio, a livello cationico, e di Selenio e Zolfo come componenti anionici. L'efficienza di queste celle è molto alta, fino al 19 [%], e scende al 11-13 [%] una volta assemblate sottoforma di modulo. Diversamente dalle celle in Silicio Amorfo le CIGS migliorano le proprie prestazioni al passare del tempo grazie ad un processo di rigenerazione del reticolo cristallino ad opera del rame presente nella cella. I primi moduli sono stati messi in commercio dalla NanoSolar nel 2007 e per realizzarli si è utilizzato un inchiostro al CIGS che ha consentito la stampa del film sottile su supporto pieghevole. L'inchiostro viene depositato su di un foglio di Alluminio sul quale, in precedenza, è stato deposto uno strato di Molibdeno come contatto elettrico. Una volta depositato l'inchiostro sopra lo stesso viene rilasciato uno strato di CdS che realizza la Eterogiunzione, ed in cascata, un film di ossido di zinco trasparente (controlettrodo).

CELLE CDTE Tellururo di Cadmio

Il CdTe presenta un bandgap di 1.45 [eV] e si adatta bene allo spettro solare, grazie a ciò riesce a convertire una quantità maggiore del Silicio il cui bandgap è di 1.2 [eV]. Anche queste celle sono depositate su un substrato di 3 mm di vetro ed i contatti frontali sono realizzati mediante uno strato trasparente in ossido di indio e titanio. La deposizione avviene per via galvanica, oppure per stampaggio o spruzzamento. La deposizione dei due strati di CdS e CdTe (Eterogiunzione) avviene a circa 700 gradi ed attivato in atmosfera contenente cloro. Il problema di queste celle è la tossicità del Cadmio allo stato gassoso. L'efficienza è compresa fra il 6 ed il 9% e lo spessore del substrato fotosensibile è di 8 micron. Nella tecnologia messa in campo dalla società italiana ARENDI, sviluppata dall'Università di Parma, l'efficienza sembra superiore ed è prevedibile il raggiungimento di un 15% in poco tempo.

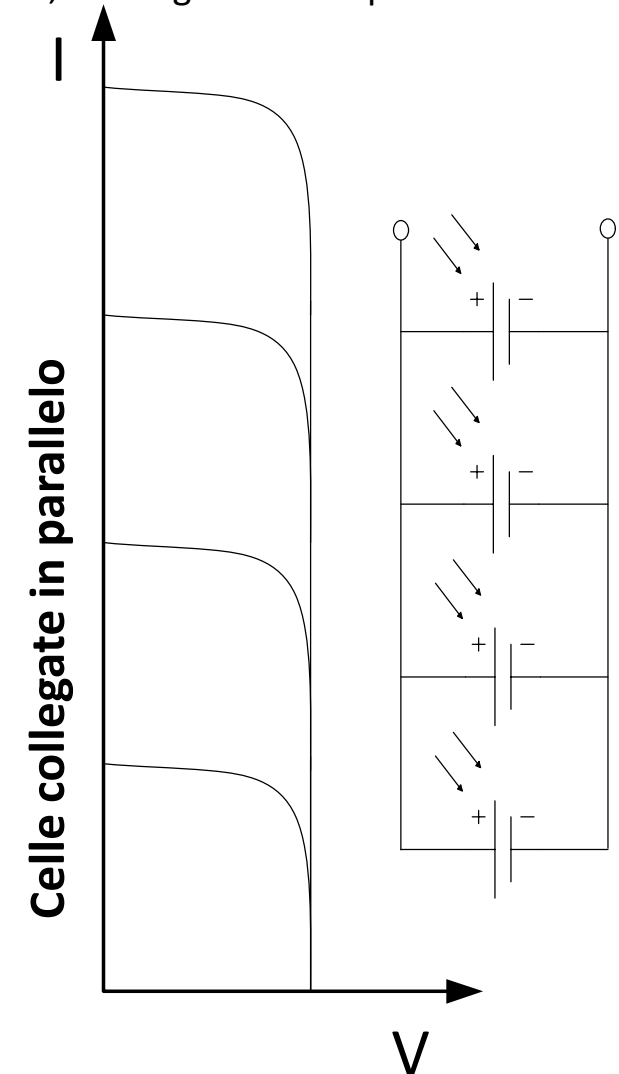
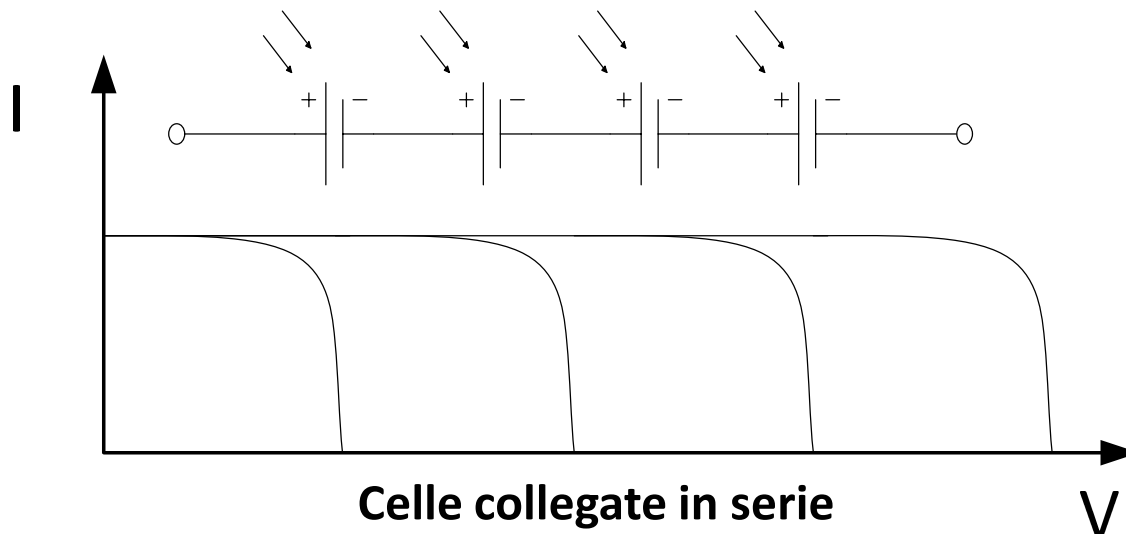
CELLE IBRIDE HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer)

Sono una combinazione di celle in silicio cristallino e film sottile, nel senso che un wafer di silicio monocristallino viene rivestito su ambedue le facce di un sottile strato di silicio amorfo e fra le superfici di contatto viene interposto un ulteriore strato di silicio amorfo non drogato, creando così quella che viene chiamata ETEROGIUNZIONE. Presentano un'efficienza molto elevata, circa il 20% di cella ed oltre il 17% di modulo, e le celle sono a forma di nido d'ape, quindi quasi tonde.

Il Modulo Fotovoltaico (1)

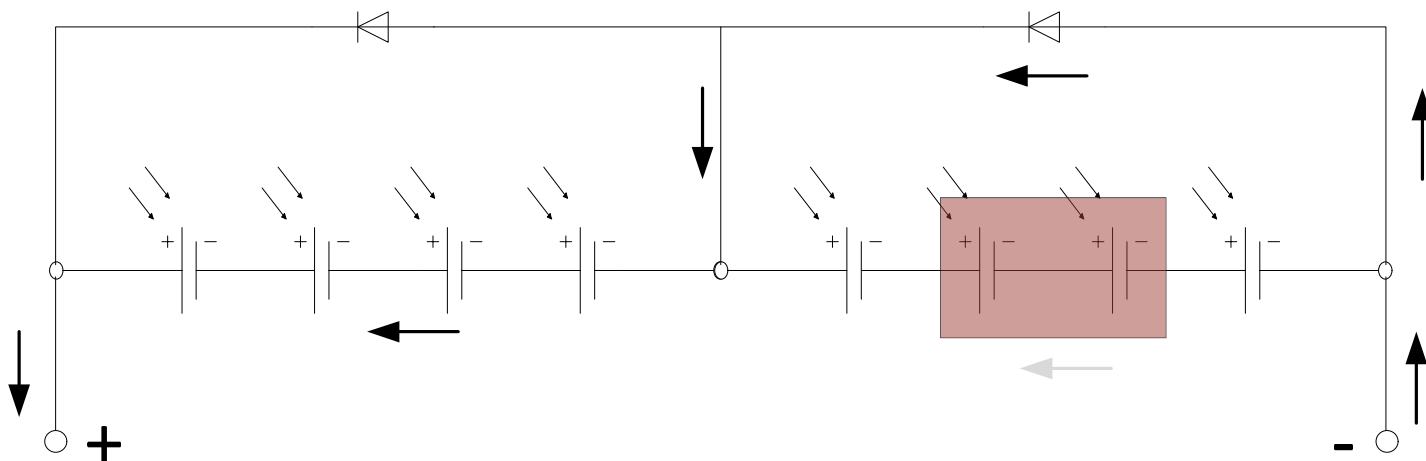
La sola cella fotovoltaica non presenta tensioni e correnti idonee ad essere utilizzata per fini energetici (0.5-0.7 V ed circa 1-5 A), è così indispensabile unire elettricamente più celle per dare luogo ad un MODULO, all'interno del quale le celle sono combinate in SERIE, in PARALLELO o in SERIE/PARALLELO. Il collegamento di serie consente di incrementare il voltaggio complessivo del modulo, senza incrementarne la corrente diversamente, il collegamento in parallelo incrementa la corrente di uscita senza modificare il voltaggio complessivo.

I primi moduli fotovoltaici vennero utilizzati per la ricarica di batterie al piombo, operanti ad un voltaggio di 12-14 [V], di conseguenza la tensione di uscita del modulo era di circa 18 V e lo stesso era costruito con celle da circa 0.5 V di tensione. Tutto ciò ha fatto sì che i primi moduli venissero prodotti con 36 celle, ognuna posta in serie all'altra. Per innalzare ulteriormente la potenza elettrica del modulo si arriva a comporlo con 72 celle, suddivise in DUE blocchi da 36. All'interno di ogni blocco le celle sono collegate in serie (STRINGA DI CELLE) e le due STRINGHE vengono collegate in PARALLELO; tutto ciò ha lo scopo di aumentare la potenza senza innalzare eccessivamente il voltaggio di uscita del modulo.



Il Modulo Fotovoltaico (2)

Da quanto detto in precedenza risulta chiaro che la tensione di uscita di un MODULO è generata dalla messa in serie di un numero elevato di CELLE pertanto, qualora una delle celle della STRINGA venisse ombreggiata erogherebbe una minore quantità di corrente. Poiché però le celle sono serie la corrente che circola all'interno delle stesse è uguale per tutte, di conseguenza tutte le celle della stringa si trovano attraversate da una corrente uguale a quella della cella ombreggiata, con evidente calo della potenza totale del modulo. Nello stesso tempo però le celle soleggiate creano coppie elettrone-lacuna, che vengono assorbite dalla cella ombreggiata, che è diventata un vero e proprio CARICO; tutto ciò porta un graduale aumento della temperatura di quest'ultima (HOT-SPOT) con conseguente riduzione anche del voltaggio di uscita ma, soprattutto, con la possibilità che la cella si rompa per sovrariscaldamento. Per contenere tale problema è pratica consolidata quella di porre in parallelo ad un certo numero di celle dei DIODI di BY-PASS così che la zona ombreggiata venga by-passata e, seppur minore, venga garantita una potenza di uscita accettabile. Ovviamente i diodi sono dimensionati a sopportare la corrente massima erogabile dal modulo, pertanto sono di dimensioni apprezzabili, oltre a ciò una loro rottura metterebbe a repentaglio il buon funzionamento del modulo stesso, di conseguenza vengono posizionati all'interno di una scatola (SCATOLA DI GIUNZIONE) posta sul retro del modulo e dalla quale si dipartono i collegamenti elettrici dello stesso.



Il Modulo Fotovoltaico (3)

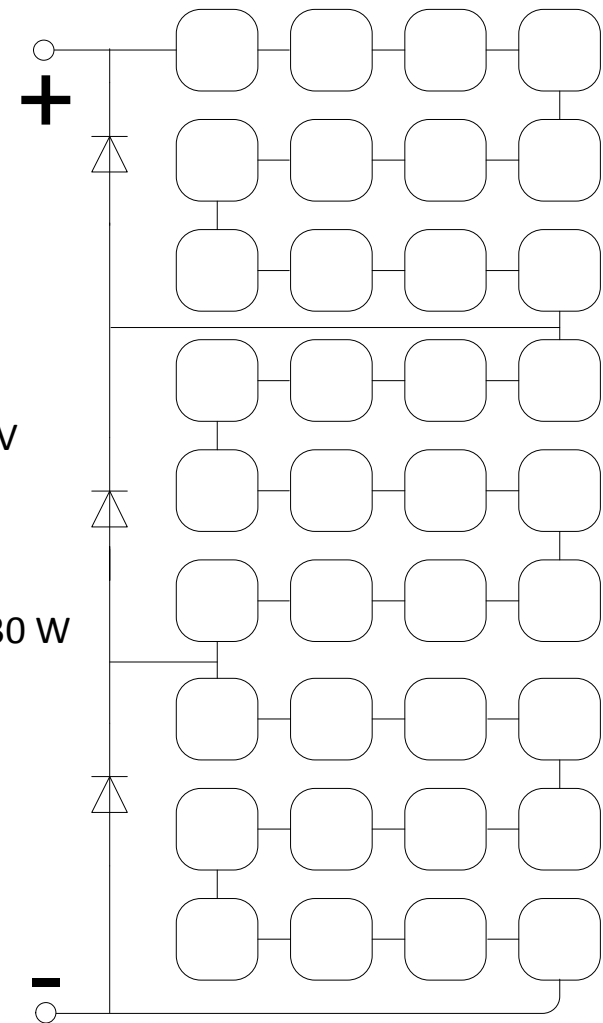
La SCATOLA DI GIUNZIONE contiene in genere da 2 a 6 diodi di by-pass e presenta le connessioni elettriche del pannello. Queste ultime possono essere di TRE tipi:

1. Con connessione su morsetto a vite
2. Con fissaggio mediante occhiello crimpato
3. Con connettori MultiContact (MC3 o MC4 o TYCO) già fuoriuscenti dalla scatola.



Modulo 9x4

3 diodi di by-pass
Tensione $V_{OC}= 21.6 \text{ V}$
Corrente $I_{SC}=7.9 \text{ A}$
Tensione $V_M=17.8$
Corrente $I_M=7.3 \text{ A}$
Potenza Modulo: 130 W
NOCT=46
Efficienza 12.78 %



Specifiche Tecniche di un Pannello Fotovoltaico

1. Dimensioni della cella
2. Numero di celle (36, 48, 50, 54, 60, 72, 80, 96)
3. Forma e colore della cella (Pseudoquadrata, Quadrata, Ottagonale, .
4. Potenza di Picco (Wp)
5. Tolleranza (%)
6. Efficienza del modulo (%)
7. Corrente nel punto di Max. Potenza (A)
8. Tensione nel punto di Max. Potenza (V)
9. Corrente di Corto circuito – I_{SC} (A)
10. Tensione a vuoto – V_{OC} (V)
11. Temperatura nominale della cella – NOCT ($^{\circ}$ C)
12. Tensione Massima di sistema (V)
13. Coefficiente di tensione (%/ $^{\circ}$ C)
14. Tensione a vuoto a -10 ($^{\circ}$ C)
15. Tensione al punto di Max. Potenza a 70 ($^{\circ}$ C)
16. Configurazione elettrica
17. Diodi di Bypass
18. Sistema di connessione
19. Lunghezza pannello
20. Larghezza Pannello
21. Spessore Pannello
22. Spessore con J-Box
23. Peso (kg)
24. Garanzia di prestazione (% in anni)
25. Garanzia del prodotto (2, 3 5, 6 , 10 anni)
26. Certificazioni (IEC61215, IEC61730-2, IEC61215-2d, UL1703 Classe-C, ISO9001:2000, ISO14001:2005; CE; PV-Cycle)



Il Generatore Fotovoltaico (1)

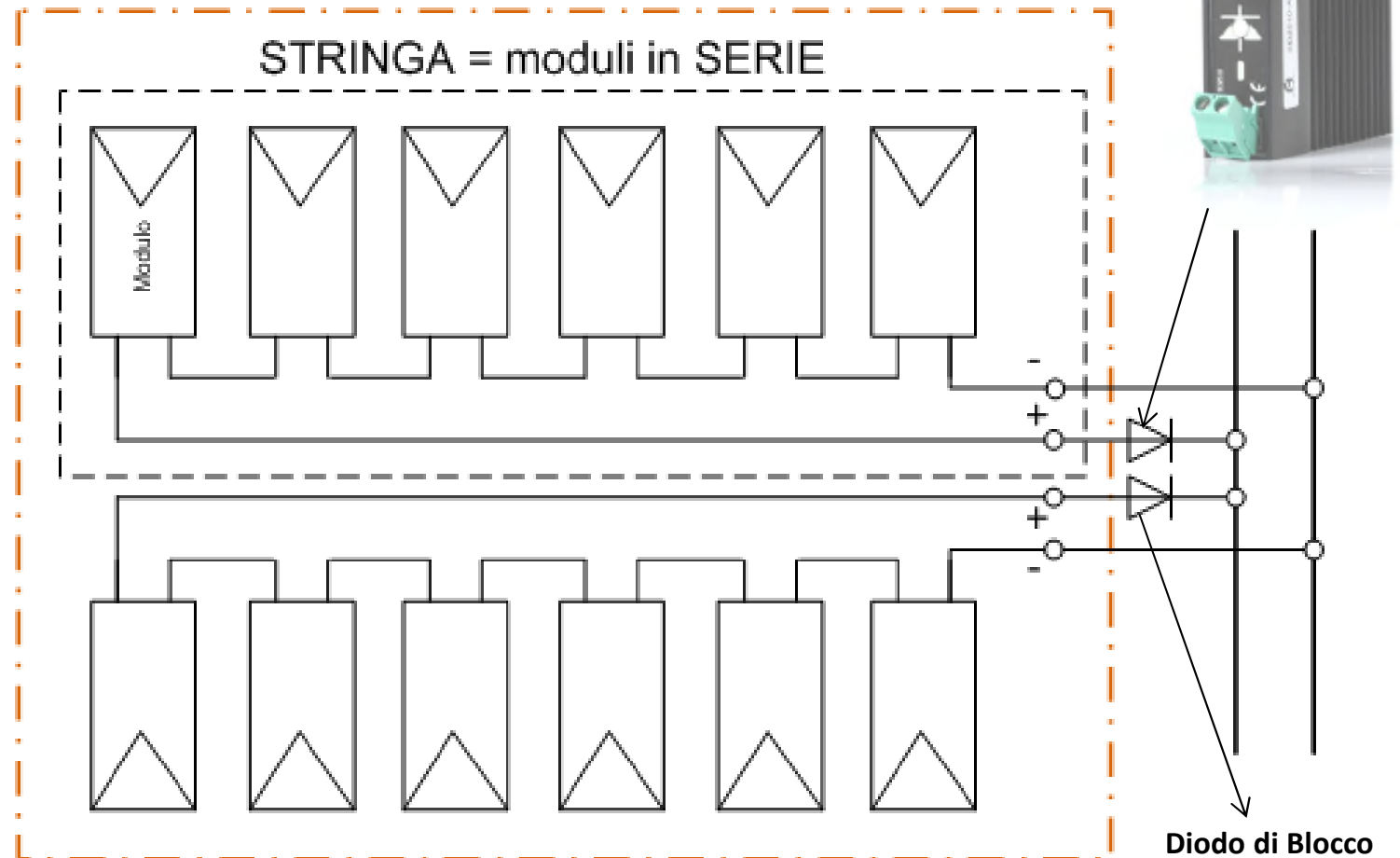
La potenza complessiva generata da un impianto fotovoltaico è in Corrente Continua e, come tale, è ottenuta come prodotto fra il voltaggio e la corrente. E' così evidente che allo stesso valore si può giungere per diversi valori delle 2 variabili che la determinano (V ed I). Per innalzare il voltaggio di uscita del nostro modulo è sufficiente collegare più moduli in SERIE, viene così realizzata una STRINGA di moduli nella quale il voltaggio di stringa è la somma del voltaggio dei moduli che la compongono mentre la Corrente di Stringa coincide con quella del singolo modulo.

In linea teorica potremmo realizzare un impianto fotovoltaico con una sola stringa; ciò però è poco consigliabile perché il voltaggio di uscita della stringa diventa troppo alto, rappresentando un vero e proprio pericolo per gli operatori.

Al contrario si potrebbe realizzare un sistema FV mettendo tanti moduli in PARALLELO, in questo modo la tensione di uscita è quella di un solo modulo ma la corrente è la somma di quella di tutti i moduli. Il sistema non risulta pericoloso, perché la tensione di lavoro è bassa, ma le perdite di potenza associate al trasporto elettrico diventano enormi.

CAMPO = STRINGHE in PARALLELO

STRINGA = moduli in SERIE



Il Generatore Fotovoltaico (2)

Il giusto compromesso è dato dal realizzare il sistema fotovoltaico mediante la messa in parallelo di più stringhe di dimensione adeguate; si genera così un CAMPO fotovoltaico. L'insieme di tutti i campi viene chiamato GENERATORE fotovoltaico che, nel caso di un solo campo, viene a coincidere con quest'ultimo.

Il voltaggio di stringa dipende in genere dalla potenza complessiva del generatore e del sistema di conversione CC/AC (INVERTER) ; il limite massimo del voltaggio è 1000 [V_{cc}] che è pari al voltaggio di isolamento del modulo FV.

Ovviamente tale valore non viene utilizzato ed in genere la stringa si dimensiona dopo aver scelto l'Inverter in modo da adattarsi a quest'ultimo; affronteremo questo argomento successivamente.

Qualora una stringa andasse in OMBRA ci sarebbe una riduzione marcata della corrente da essa erogata, in tal caso la stessa diventerebbe un CARICO ed assorbirebbe parte della corrente erogata dalle altre stringhe connesse allo stesso campo. Per evitare ciò è opportuno che ogni stringa sia dotata di un **DIODO DI BLOCCO** che impedisca alla corrente di circolare in verso opposto, tale diodo è dimensionato per operare con correnti molto elevate ed è di dimensioni ragguardevoli, **la tensione di blocco del diodo deve essere pari almeno al DOPPIO della tensione a circuito aperto della stringa e deve sopportare una corrente pari a 1.25 I_{sc}**. La presenza del diodo comporta una caduta di tensione di 0.5-1.0 [V] sulla linea ed una perdita di corrente di circa 0.5-2[%]. A fronte di tali perdite però vi è una maggiore protezione dell'investimento anche se alcuni moduli fotovoltaici possono sopportare correnti inverse grandi fino a 7 volte la corrente nominale senza per questo essere danneggiati. In virtù di ciò esiste una scuola di pensiero per la quale è preferibile non adottare i diodi di stringa ma scegliere moduli di Classe-II e tutti dello stesso modello , oltre a ciò è importante che la differenza di tensione fra le stringhe non superi il 5[%] del valore nominale. A proteggere il sistema da eccessive correnti in circolo sui cavi di stringa vengono inseriti i **FUSIBILI DI STRINGA**.

Sia i DIODI di STRINGA che i FUSIBILI di STRINGA sono contenuti all'interno del **QUADRO DI CAMPO**, insieme agli interruttori di manovra ed agli Scaricatori di Tensione (SPD), quest'ultimi necessari in caso di sovratensione dovuta a fulminazione.

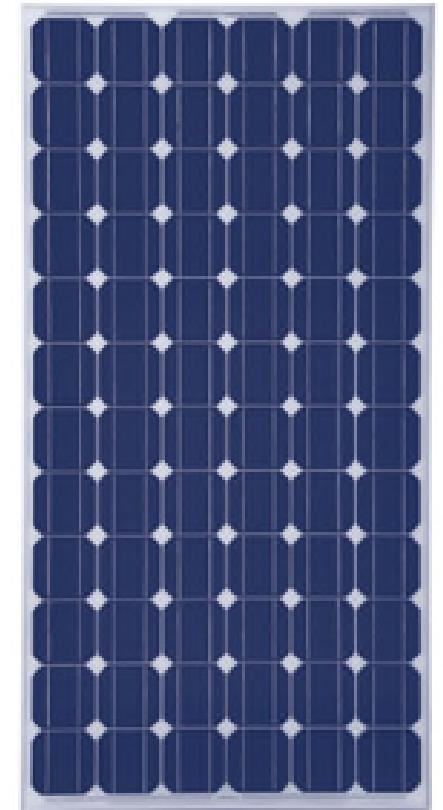
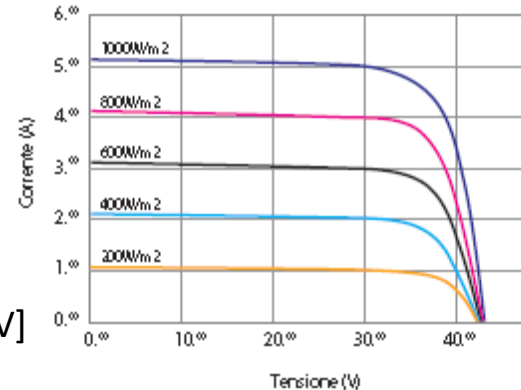
Ogni pannello della stringa è collegato in serie al successivo, il collegamento elettrico è garantito da cavi speciali che devono essere in grado di portare la corrente della stringa anche quando la temperatura dell'ambiente circostante è pari a 70-80[° C], oltre a ciò devono essere poco sensibili alla luce Ultravioletta e dotati di connettori con grado di protezione IP65. Le particolari qualità richieste al cavo fanno sì che sia nata una vera e propria classe di **CAVI SOLARI**.

Il Generatore Fotovoltaico (3)

Cerchiamo di approfondire quanto detto finora con qualche esempio numerico.

Scegliamo un modulo in Silicio Monocristallino aventi le seguenti caratteristiche:

- ☐ Numero di celle: 72
- ☐ Dimensione della cella: 125x125 [mm]
- ☐ Forma della cella: ottagonale
- ☐ Potenza di picco del modulo: 180 [W]
- ☐ Tolleranza: 3 [%]
- ☐ Efficienza del modulo: 14.1 [%]
- ☐ Corrente nel punto di massima potenza (I_M): 4.9 [A]
- ☐ Voltaggio nel punto di massima potenza (V_M): 36.8 [V]
- ☐ Corrente di corto circuito (I_{SC}): 5.35 [A]
- ☐ Voltaggio di circuito aperto (V_{OC}): 44.2 [V]
- ☐ Temperatura Operativa Nominale della cella (NOCT): 47 [° C]
- ☐ Tensione massima di isolamento: 1000 [V]
- ☐ Coefficiente di Temperatura per V_{OC} : -0.35 [%/° C]
- ☐ Coefficiente di Temperatura per I_{SC} : 0.05 [%/° C]
- ☐ Coefficiente di Temperatura per la Potenza Massima: -0.45 [%/° C]
- ☐ Configurazione elettrica: 6x12 (tutte le celle sono in serie)
- ☐ Numero di diodi di Bypass: 3 (un diodo ogni 24 celle)
- ☐ Cavo Solare da 4 [mm²], lunghezza 900 [mm], MC4



Per prima cosa si calcolano le tensioni massime e minime del modulo al variare della temperatura del modulo , assumendo per la stessa i valori estremi di -10 e +70 [° C] e ricordando che la temperatura STC del modulo è 25 [° C].



$$V_{OC}(-10^{\circ}\text{C}) = V_{OC}(\text{STC}) \cdot \left[1 - \frac{(-10 - 25) \cdot 0.35}{100} \right] = 49.6 \text{ [V]}$$

$$V_{OC}(+70^{\circ}\text{C}) = V_{OC}(\text{STC}) \cdot \left[1 - \frac{(70 - 25) \cdot 0.35}{100} \right] = 37.2 \text{ [V]}$$

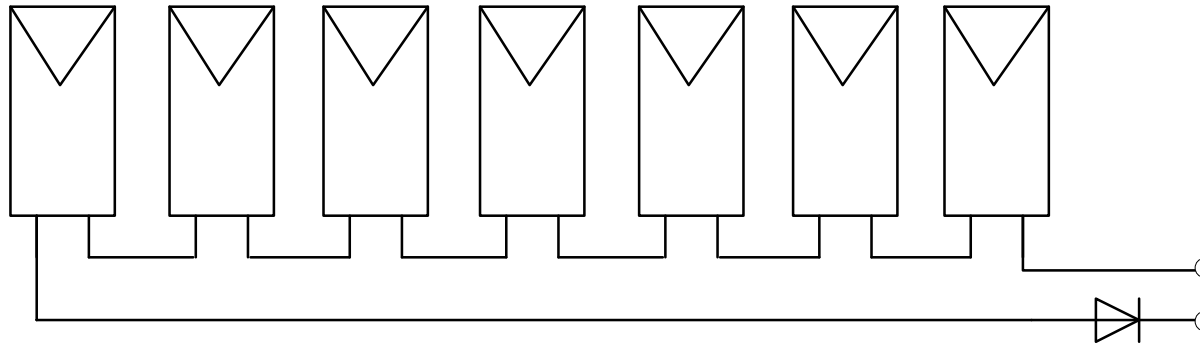
$$V_M(-10^{\circ}\text{C}) = V_M(\text{STC}) - V_{OC}(\text{STC}) \cdot \left[\frac{(-10 - 25) \cdot 0.35}{100} \right] = 42.2 \text{ [V]}$$

$$V_M(+70^{\circ}\text{C}) = V_M(\text{STC}) - V_{OC}(\text{STC}) \cdot \left[\frac{(70 - 25) \cdot 0.35}{100} \right] = 29.8 \text{ [V]}$$

Il Generatore Fotovoltaico (3)

Assumiamo che una stringa di moduli sia formata da 7 moduli, si avrà così:

- ❑ Potenza Massima della Stringa: $7 \times 180 = 1260$ [W]
- ❑ Tensione al punto di massima potenza (V_M): $7 \times 36.8 = 257.6$ [V]
- ❑ Corrente al punto di massima potenza (I_M): 4.9 [A]
- ❑ Corrente di cortocircuito massima: $1.25 \times I_{SC}$: 1.25×5.35 [A] = 6.7 [A]
- ❑ Tensione a vuoto massima: $7 \times V_{OC(-10)} = 7 \times 49.6 = 347$ [V]
- ❑ Tensione minima MPP (di massima potenza): $7 \times 29.8 = 208.6$ [V]
- ❑ Tensione massima MPP (di massima potenza): $7 \times 42.2 = 295.4$ [V]



La potenza complessiva del generatore fotovoltaico potrà essere poi raggiunta mettendo in parallelo più stringhe (CAMPO) e più campi (GENERATORE). Ovviamente tutta la potenza generata dall'impianto fotovoltaico è in corrente continua e non può essere utilizzata direttamente, DEVE pertanto essere trasformata in CORRENTE ALTERNATA mediante un sistema di conversione, comunemente chiamato INVERTER.

Cavi di stringa

I cablaggi elettrici di un impianto fotovoltaico devono essere in grado di operare in condizioni ambientali severe come: alta temperatura, fino a 100 ° C nelle installazioni a tetto, pioggia, neve, luce Ultravioletta, ecc... Oltre a ciò viene richiesta un'alta affidabilità del cablaggio durante l'invecchiamento, così da ridurre i costi di manutenzione ed i rischi di guasto dell'impianto FV. E' per tutta questa serie di ragioni che è nata una categoria di cavi speciali, chiamati per l'appunto SOLARI, che viene identificata con la sigla FG21M21. Essi vengono utilizzati per il collegamento in serie dei pannelli, da ciò di nome di CAVI DI STRINGA, ed, in genere, terminano nelle SCATOLE DI CAMPO. Dalle scatole di campo in poi vengono invece utilizzati dei cavi con guaina per uso esterno, con **temperatura massima** di 70 gradi.

Sezione mm ²	Corrente (A)			
	60°C	70°C	80°C	90°C
1.5	30	27	24	21
2.5	41	37	33	29
4	55	50	45	39
6	70	64	58	50
10	98	90	80	70
16	132	120	108	90
25	176	160	144	125
35	218	198	179	155
50	276	251	226	196
70	347	316	284	246
95	416	378	341	295
120	488	444	400	346

Portata in aria libera dei cavi tipo FG21M21. Qualora interrati la portata di tali cavi deve essere desunta dalla tabella CEI UNEL 35026

I cavi FG21M21 possono operare in un range di **temperatura di lavoro** compreso fra -40 e +90 gradi centigradi ; bisogna stare attenti a non confondere il valore di 90 gradi con il valore di **Temperatura Massima** del cavo che, diversamente, è la temperatura raggiunta dal cavo quando all'interno dello stesso circola la corrente per la quale è stato progettato. Pertanto se 90 gradi fosse stata la temperatura massima ciò avrebbe indicato che qualora l'ambiente avesse raggiunto tale valore il cavo non avrebbe potuto fornire portata alcuna in quanto la sua temperatura sarebbe stata di gran lunga superiore alla massima. La gran parte dei cavi elettrici per esterno presentano proprio una Temperatura Massima di 70 gradi. Il colore dei cavi FG21M21 può essere: ROSSO (positivo), BLU (massa) e NERO (negativo) ed è in grado di resistere a tensioni verso terra di 1800 Vcc ed una tensione fra i poli di 1800 Vcc. Qualora i cavi solari venissero posati in fascio la corrente massima tollerabile viene diminuita di un fattore di correzione per tenere conto del ridotto smaltimento di calore a carico dei cavi; i coefficienti di riduzione sono riportati nella norma CEI UNEL 35024/1.

Caratteristiche Cavo FG21M21

Formazione n° x mm ²	Ø indicativo conduttore mm	Ø esterno max mm	Resistenza elettrica max a 20°C Ω/km	Peso indicativo cavo kg/km	Portate di corrente per cavo in aria libera a 60°C	
					1 cavo	2 cavi adiacenti
					A	A
1 x 1,5	1,5	5,1	13,7	32	30	25
1 x 2,5	1,9	5,7	8,21	43	40	35
1 x 4	2,4	6,2	5,09	60	55	47
1 x 6	3,0	6,9	3,39	82	70	59
1 x 10	3,9	8,2	1,95	125	95	81
1 x 16	5,0	9,3	1,24	185	130	110
1 x 25	6,1	11,4	0,795	280	180	153
1 x 35	7,3	12,8	0,565	370	220	187
1 x 50	8,7	14,8	0,393	520	280	238
1 x 70	10,5	16,9	0,277	715	350	297
1 x 95	11,9	18,7	0,210	925	410	348
1 x 120	13,8	20,7	0,164	1165	480	408

Tensione massima Um: 1200 V c.a.

Tensione massima (anche verso terra) Um: 1800 V c.c.

Temperatura massima di esercizio: 90° C

Temperatura minima di esercizio: -40° C

Temperatura massima di sovraccarico: 120° C

Temperatura massima di corto circuito: 250° C

Temperatura minima di installazione: -40° C

Raggio minimo di curvatura consigliato: 6 volte il diametro del cavo

Massimo sforzo di trazione consigliato: 50 N/mm² di sezione del rame

COEFFICIENTI DI CORREZIONE PER TEMPERATURE AMBIENTE DIVERSE DA 60°C	
Temperatura ambiente (°C)	Coefficiente di correzione
Fino a 60	1,0
70	0,91
80	0,82
90	0,71
100	0,58
110	0,41

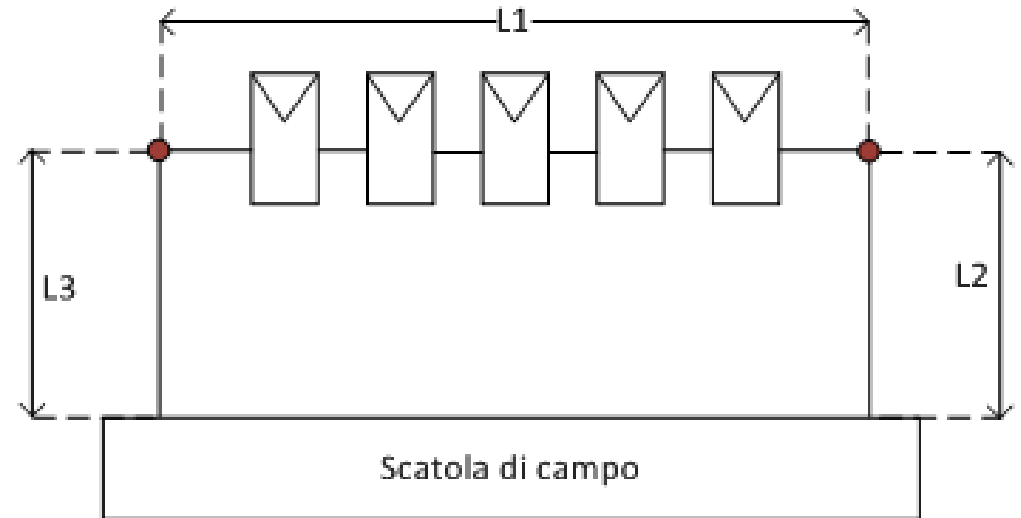
Perdite di tensione sui cavi di stringa

Per il calcolo della perdita di tensione sui CAVI SOLARI che collegano i pannelli l'uno all'altro e la stringa al quadro di campo è necessario dividere la lunghezza della linea in più tratti.

Un primo tratto è relativo alla connessione in serie fra i pannelli (L1); in questo caso il cablaggio è esposto ad una temperatura superiore rispetto al rimanente, circa 70 gradi. Tale incremento di temperatura è associato alla vicinanza del cablaggio con il retro dei pannelli e la resistività elettrica del cavo aumenta.

Il secondo e terzo tratto (L2 ed L3) corrispondono invece ai CAVI SOLARI di connessione fra la stringa ed il quadro di campo; in questo caso la temperatura di lavoro è inferiore, circa 30 gradi, grazie alla ventilazione naturale degli stessi e comunque alla distanza dai pannelli.

Per il tratto L1 si può assumere una resistività del rame di $2.1 \times 10^{-8} [\Omega m]$, per i tratti L2 ed L3 viene invece assunto $1.8 \times 10^{-8} [\Omega m]$; se "N" è il numero di pannelli che compongono la stringa, "S" la sezione dei cavi in mm^2 , " U_{MPP} " la tensione di massima potenza di ognuno dei pannelli e "Pmax" la potenza massima della stringa si ha:



$$\Delta U\% = 100 \cdot \left(\frac{\rho_1 \cdot L_1}{S_1} + \frac{\rho_2 \cdot L_2}{S_2} + \frac{\rho_3 \cdot L_3}{S_3} \right) \cdot \frac{P_{\max}}{(N \cdot U_{MPP})^2} \quad [\%]$$