

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE*

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA*

**TESI DI LAUREA**

in  
**ENERGETICA**

**PANNELLI FOTOVOLTAICI DI NUOVA GENERAZIONE  
PER INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA**

**CANDIDATO:**  
Federico Rivelli

**RELATORE:**  
Chiar.mo Prof. Carlo Maria Orlandelli

Anno Accademico 2012/13

Sessione II



---

## INDICE

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Energia solare e tecnologia fotovoltaica.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Energia solare .....</b>	<b>6</b>
- Energia solare e irraggiamento .....	
- Calcolo dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata e orientata.....	
<b>2.2 Tecnologia fotovoltaica .....</b>	<b>16</b>
- L'effetto fotoelettrico .....	
- La cella fotovoltaica: caratteristiche costruttive .....	
- La cella fotovoltaica: caratteristiche operative .....	
- L'impianto fotovoltaico.....	
<b>3. Integrazione architettonica della tecnologia fotovoltaica.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Building-integrated photovoltaics (BIPV).....</b>	<b>37</b>
- Storia e attualizzazione dell'integrazione fotovoltaica in architettura.....	
<b>3.2 Modalità e tipologie d'integrazione fotovoltaica .....</b>	<b>39</b>
- Integrazione su edifici esistenti, su nuovi edifici, su arredo urbano.....	
- Integrazione in copertura, in facciata, in elementi frangisole, in arredo urbano .....	
<b>4. Celle fotovoltaiche innovative per integrazione architettonica .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 Celle fotovoltaiche a film sottile .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2 Celle fotovoltaiche polimeriche .....</b>	<b>64</b>
<b>4.3 Celle fotovoltaiche a colorante .....</b>	<b>66</b>
<b>4.4 Celle fotovoltaiche sferiche .....</b>	<b>69</b>
<b>5. Conclusioni.....</b>	<b>73</b>
<b>6. Bibliografia .....</b>	<b>78</b>

---

# 1. Introduzione

Negli ultimi anni il problema energetico globale e, in particolar modo, la preoccupazione per i cambiamenti climatici e l'eccessiva emissione di CO<sub>2</sub> in atmosfera, hanno portato a sviluppare un notevole interesse nei confronti di tutte quelle energie definite rinnovabili. Con il termine "rinnovabili" si intendono le forme di energia prodotte da fonti che per loro caratteristica intrinseca si rigenerano almeno alla stessa velocità con cui vengono consumate o che non sono esauribili nella scala dei tempi umani.

Naturalmente la continua crescita di richiesta energetica ha promosso ancor più lo sviluppo e la ricerca di nuove tecnologie nell'ambito dello sfruttamento di queste fonti. In particolar modo hanno potuto beneficiare di un notevole sviluppo le tecnologie per lo sfruttamento della radiazione solare. Infatti, la possibilità di ottenere una conversione diretta fra irraggiamento solare ed energia elettrica attraverso lo sfruttamento delle proprietà dei materiali semiconduttori è considerata una caratteristica di grande interesse, sia in virtù della tipologia d'energia prodotta, tra le più versatili e sfruttabili, sia per la semplicità di costruzione, manutenzione e funzionamento degli impianti tecnologici necessari a sfruttarla.

Il miglioramento dei processi costruttivi e la ricerca dei materiali più idonei hanno portato la tecnologia solare fotovoltaica ad aumentare notevolmente i rendimenti acquisibili. Inoltre la grande versatilità, la semplicità d'impianto e la non eccessiva quantità d'energia producibile hanno reso la loro funzione perfettamente idonea a conquistarsi un posto di primo piano nella progettazione e nello sviluppo degli edifici urbani.

La possibilità di ridurre la dipendenza energetica di un edificio dal combustibile fossile e di rendere maggiormente autonome le strutture ha reso possibile l'ideazione di sistemi integrati che presentino pannelli fotovoltaici intrinsecamente connessi con elementi architettonici.

In questa direzione si muove il settore del BIPV (Building-integrated photovoltaics) nel quale le rotte dell'efficienza energetica e dell'ottimizzazione delle prestazioni si fondono indissolubilmente con la ricerca estetica e funzionale delle strutture architettoniche. Grazie all'esplorazione di queste nuove vie la tecnologia fotovoltaica può ricercare moderni sviluppi,

divenire al tempo stesso maggiormente efficiente e meno impattante, fino a esternarsi in veri e propri elementi di design e a divenire elemento caratterizzante di smart cities.

Data la sempre maggiore rilevanza che nel futuro prossimo avrà il settore del fotovoltaico integrato, la seguente tesi si prefigge il compito di mostrare una panoramica esaustiva delle tecnologie fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica, esplicitandone in particolar modo, le principali modalità d'implementazione, le caratteristiche, le prestazioni e i miglioramenti che esse possono apportare agli elementi urbani a cui sono destinate. Ciò permetterà al lettore di orientarsi agevolmente nella distinzione delle varie tecnologie che di qui a poco entreranno nel mercato globale e di riconoscerne i punti di forza e i migliori compromessi perseguibili.

L'analisi delle tecnologie fotovoltaiche di nuova generazione si avvarrà, in particolar modo, di una prima introduzione sui principi di funzionamento della cella fotovoltaica e delle caratteristiche di rilevanza ingegneristica che ne descrivono il comportamento. Giungerà, in seguito, ad analizzare le principali metodologie d'integrazione architettonica e si concluderà con la caratterizzazione delle innovazioni in corso di ottimizzazione e commercializzazione.



---

## 2. Energia solare e tecnologia fotovoltaica

Per energia solare s'intende l'energia associata alla radiazione solare, che rappresenta la fonte primaria di energia presente sulla Terra, grazie alla quale risulta possibile lo sviluppo della vita.

Questa energia, infatti, è utilizzata dagli organismi autotrofi per generare energia chimica, poi impiegata a sua volta da altri organismi per il proprio sostentamento.

Inoltre dall'energia solare derivano, più o meno direttamente, quasi tutte le fonti energetiche disponibili all'uomo quali: i combustibili fossili, l'energia eolica, l'energia del moto ondoso, l'energia idroelettrica e l'energia da biomassa, con le sole eccezioni dell'energia nucleare, dell'energia geotermica e dell'energia delle maree.

Questo tipo di energia, pur rimanendo alla base di molte altre, può comunque essere direttamente convertito in calore o in energia elettrica attraverso apposite tecnologie.

Dalla radiazione solare possono essere dunque prodotti: calore, attraverso pannelli solari termici; elettricità, attraverso pannelli solari fotovoltaici.

### 2.1 Energia solare

#### - *Energia solare e irraggiamento*

L'energia solare, come spiegato in precedenza, dipende direttamente dalla radiazione solare.

Quest'ultima rappresenta l'energia radiante emessa nello spazio interplanetario dal Sole ed è generata a partire dalle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel suo nucleo.

La radiazione solare è dunque energia trasmessa nello spazio sotto forma di radiazioni elettromagnetiche a varie frequenze e lunghezze d'onda.

Le radiazioni elettromagnetiche sono caratterizzate dalla velocità di propagazione ( $c=300000$  km/s), dalla frequenza ( $\nu$ ) e dalla lunghezza d'onda ( $\lambda$ ), a loro volta legate dalla relazione  $c = \lambda \nu$

Alla radiazione solare è associato un moto di particelle chiamate *fotoni*; l'energia solare si manifesta perciò, in un flusso continuo di fotoni di varia energia che raggiungono la Terra in circa 8 minuti.

La quantità totale di radiazione emessa dal Sole, nell'unità di tempo e di superficie, che raggiunge le soglie esterne dell'atmosfera terrestre, ha un valore pressoché costante nel tempo. Questo valore è detto *costante solare* e risulta all'incirca  $1367 \text{ W/m}^2$ .

Questa quantità rappresenta la somma delle energie di tutte le frequenze dello spettro della radiazione solare, misurate sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre, su un piano perpendicolare ai raggi.

Si considera la somma di tutte queste energie proprio perché la radiazione solare è composta da onde elettromagnetiche di varie frequenze e lunghezze, le quali possono essere rappresentate attraverso il tipico spettro di un corpo nero a  $T=5775 \text{ K}$ , che viene usualmente scelto per approssimare il comportamento emissivo dell'astro.

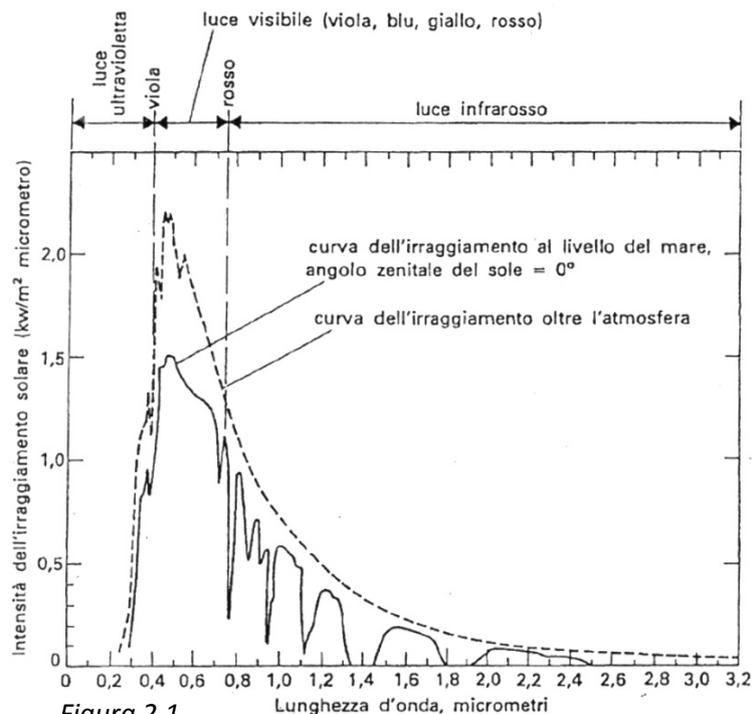


Figura 2.1

Spettro solare per angolo zenitale uguale a zero

(Fonte: <http://www.enea.it>)

## 2. Energia solare e tecnologia fotovoltaica

Sul suolo terrestre l'energia solare disponibile risulterà però minore rispetto al valore espresso dalla costante solare, in quanto dovranno essere considerati la riflessione e l'assorbimento subiti dalle radiazioni nell'incontro con l'atmosfera.

Il valore dell'energia che raggiunge il suolo dipenderà da vari fattori: il percorso effettuato dai fotoni, la presenza di vapor d'acqua, di CO<sub>2</sub>, d'ozono e di polveri e l'influenzabilità che le varie lunghezze d'onda hanno nei confronti dei precedenti elementi (ad esempio la componente infrarossa con  $\lambda \geq 0.8$  nm è fortemente influenzata dal vapor d'acqua).

Si può dunque considerare che la radiazione incidente l'atmosfera venga suddivisa in

### *Radiazione riflessa:*

è quella quota parte della radiazione solare incidente riflessa dalla superficie terrestre per effetto dell'albedo. L'albedo è il coefficiente di riflessione  $r$  e può avere un valore tra 0 e 1.

$r$  è data dal rapporto tra l'energia radiante riflessa e l'energia incidente di una superficie.

La Terra ha un valore medio del 40% ( $r = 0,4$ ) Alla quota di albedo terrestre si aggiungono le radiazioni riflesse dalle particelle atmosferiche verso lo spazio.

### *Radiazione diffusa:*

detta anche indiretta, rappresenta quella quota di radiazione che ha colpito almeno una particella dei gas atmosferici cambiando angolo di incidenza, arrivando comunque al suolo perché verso di esso indirizzata. Aumenta in presenza di cielo nuvoloso. In particolare lo scattering di Rayleigh della componente blu della radiazione solare è responsabile del colore blu del cielo. Una parte della radiazione diffusa è persa, perché riflessa verso lo spazio.

### *Radiazione diretta:*

Detratte tutte le perdite per riflessione da parte delle particelle atmosferiche, l'energia incidente che rimane è assorbita dalla superficie terrestre e contribuisce così al suo riscaldamento, in maniera variabile a seconda della latitudine e del tipo di superficie.

Una importante osservazione da considerare riguarda il percorso effettuato dai fotoni. Infatti nel caso in cui il Sole non si trovi allo zenit il percorso aumenta e naturalmente l'irraggiamento sul suolo terrestre diminuisce.

La seguente figura mostra la configurazione dello spettro solare per un angolo zenitale di  $30^\circ$  in presenza di cielo perfettamente sereno, suddividendo la radiazione diretta da quella diffusa. Il valore dell'irraggiamento diretto e diffuso può essere ricavato effettuando l'integrale delle due curve.

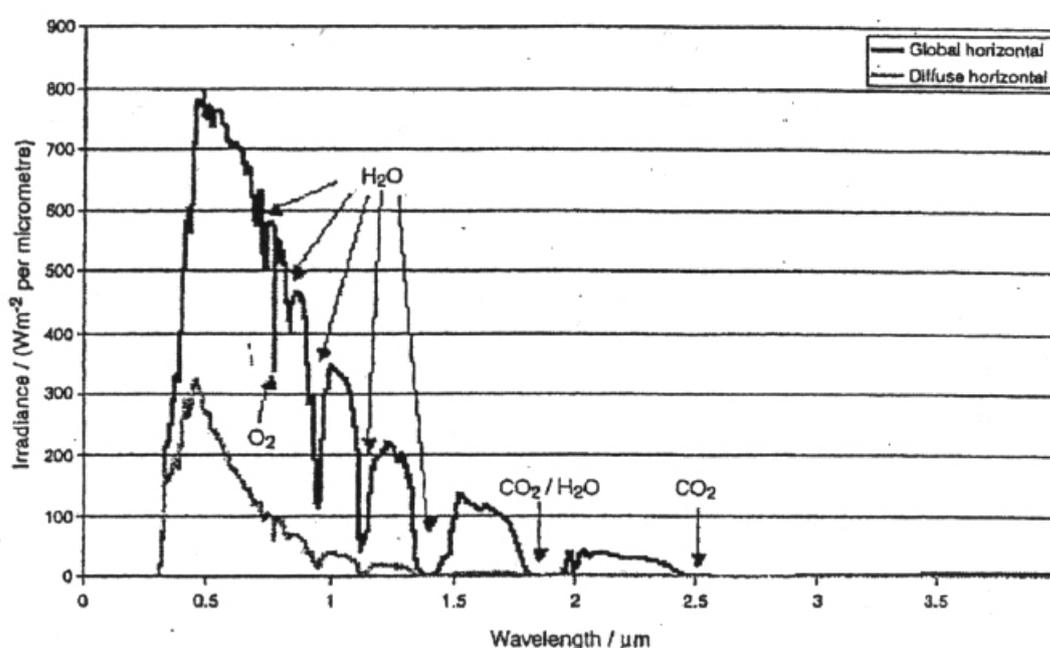


Figura 2.2

Spettro solare della radiazione diretta e diffusa per angolo zenitale di  $30^\circ$

(Fonte: <http://www.enea.it>)

Nel caso di cielo nuvoloso, a seconda della tipologia di nubi, possono variare notevolmente i coefficienti d'assorbimento e quindi la radiazione incidente il suolo terrestre.

Proprio in virtù di tutte queste variabili l'energia solare che raggiunge il suolo può essere determinata solo attraverso corrette elaborazioni giornaliere e mensili sull'andamento spaziale e temporale dell'irraggiamento stesso.

Esistono database predisposti allo scopo di contenere i dati climatici sull'irraggiamento solare in base alle zone e alle condizioni locali e dai quali possono essere recuperate tutte le informazioni necessarie a calcoli, studi e osservazioni.

- **Calcolo dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata e orientata**

Abbiamo visto come la radiazione solare incidente che arriva al suolo terrestre sia solo una parte di quella che giunge fino al limite dell'atmosfera.

Ciò dipende dal percorso dei fotoni, dagli elementi atmosferici e dalle coordinate spaziali e temporali che caratterizzano la superficie studiata.

Per poter calcolare con una certa approssimazione l'irraggiamento solare su una superficie comunque inclinata e orientata su suolo terrestre la norma italiana UNI 8477-1 propone la seguente metodologia.

*Definizione delle coordinate spaziali e temporali:*

*Latitudine ( $\varphi$ )*

La latitudine è pari all'angolo che la verticale di un punto sulla superficie della Terra forma con il piano equatoriale. Tale angolo viene misurato in gradi sessagesimali e può assumere valori nell'intervallo da 0 a 90° N e da 0 a 90° S.

*Longitudine ( $\psi$ )*

La longitudine è la coordinata geografica che indica la distanza angolare in senso Est o Ovest dal meridiano considerato fondamentale. Tale angolo viene misurato in gradi sessagesimali su un piano perpendicolare all'asse terrestre e può assumere valori nell'intervallo da 0 a 180° E e da 0 a 180° W

*Ora solare ( $t_{sol}$ ) e angolo orario ( $\omega$ )*

L'ora solare è l'ora relativa alla posizione del Sole rispetto al luogo in cui ci si trova. Tutti i punti giacenti sullo stesso meridiano hanno uguale ora solare.

La posizione del Sole può essere individuata dall'angolo formato tra il piano meridiano del luogo e il piano su cui l'astro appare in quell'istante. Tale angolo è detto Angolo orario.

$\omega = 0$  al mezzogiorno solare e varia di  $\frac{2\pi}{24}$  gradi ogni ora. Inoltre  $\omega = \pi + \frac{\pi}{12} t_{sol}$

*Ora standard ( $t_{ST}$ )*

L'ora standard è quella indicata dall'orologio, assunta in modo tale che a mezzogiorno i raggi solari siano complanari con il piano meridiano più vicino, avente longitudine multipla di 15°

*Ora legale ( $t_L$ )*

Si calcola a partire dall'ora standard nel seguente modo:  $t_L = t_{ST} + 1$

*Declinazione ( $\delta$ )*

La declinazione è l'angolo formato dal raggio solare collimato e il piano equatoriale e varia da  $+23.45^\circ$  (sole allo zenit nel tropico del cancro) a  $-23.45^\circ$  (sole allo zenit nel tropico del capricorno)

La declinazione si calcola  $\delta = 23.45 \sin\left(2\pi \left(\frac{284+n}{365}\right)\right)$  con  $n$  = numero d'ordine del giorno

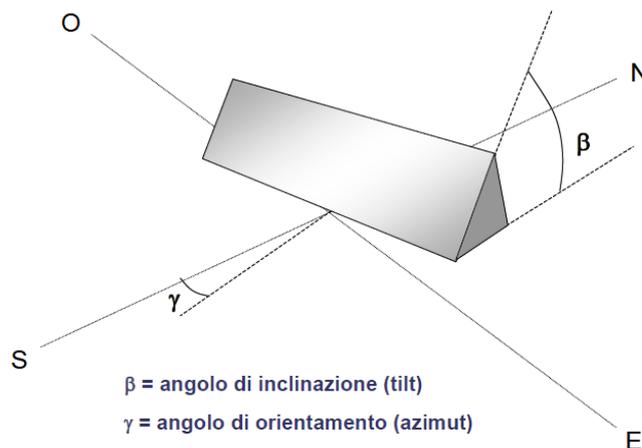
*Definizione delle coordinate di una superficie inclinata e orientata:*

*Inclinazione della superficie ( $\beta$ )*

Angolo tra la superficie e il piano orizzontale perpendicolare al raggio terrestre

*Orientamento della superficie (azimut  $\gamma$ )*

Angolo formato dalla normale  $\underline{n}$  alla superficie e il piano meridiano locale.



*Figura 2.3*

*Coordinate di una superficie inclinata e orientata*

(Fonte: [http://dma.dima.uniroma1.it:8080/users/m\\_ener\\_c1/Solare\\_FV\\_Radiazione\\_Solare.pdf](http://dma.dima.uniroma1.it:8080/users/m_ener_c1/Solare_FV_Radiazione_Solare.pdf))

*Angolo d'incidenza ( $\vartheta$ )*

L'angolo d'incidenza è l'angolo generato fra il raggio solare collimato e la normale alla superficie considerata.

Considerando il raggio solare collimato giacente nella direzione del versore  $\underline{s}$  e la normale alla superficie nella direzione del versore  $\underline{n}$ , possiamo esprimere i due versori attraverso gli angoli di latitudine ( $\varphi$ ), declinazione ( $\delta$ ), inclinazione della superficie ( $\beta$ ), orientamento della superficie ed angolo orario ( $\gamma$ )

$$\begin{aligned}\underline{n} &= [\cos(\varphi) \cos(\beta) + \sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma)] \underline{i} \\ &+ [\sin(\beta) \sin(\gamma)] \underline{j} \\ &+ [\sin(\varphi) \cos(\beta) - \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma)] \underline{k}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{s} &= [\cos(\delta) \cos(\omega)] \underline{i} \\ &+ [\cos(\delta) \sin(\omega)] \underline{j} \\ &+ [\sin(\delta)] \underline{k}\end{aligned}$$

Da cui otteniamo che il coseno dell'angolo d'incidenza è:

$$\begin{aligned}\cos(\vartheta) = \underline{n} \cdot \underline{s} &= \cos(\varphi) \cos(\beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\delta) \cos(\omega) \\ &+ \sin(\beta) \sin(\gamma) \cos(\delta) \sin(\omega) + \sin(\varphi) \cos(\beta) \sin(\delta) \\ &- \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \sin(\delta)\end{aligned}$$

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

Con:  $U = \cos \delta (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma)$  otteniamo:

$$V = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma$$

$$\cos(\vartheta) = U \cos \omega + V \sin \omega + T$$

*Angolo orario del tramonto astronomico ( $\omega_s$ )*

Quando  $\cos(\vartheta) = \cos \frac{\pi}{2} = 0$  i raggi solari sono paralleli alla superficie orizzontale (con  $\beta=0$ ).

In quell'istante si verifica l'alba o il tramonto astronomico. Dunque questo angolo può essere trovato nella seguente maniera:

$$\cos(\vartheta) = \cos \frac{\pi}{2} = U_h \cos(\omega_s) + T_h = 0 \quad \text{perciò otteniamo:}$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \delta \tan \varphi)$$

Angoli orari dell'apparire e scomparire del sole ( $\omega'$ ,  $\omega''$ )

Questi angoli possono essere calcolati risolvendo la precedente equazione trigonometrica

$$\cos(\vartheta) = U \cos \omega + V \sin \omega + T$$

$$\text{Ricordando che } \begin{cases} \cos(\omega) = \cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right) - \sin^2\left(\frac{\omega}{2}\right) \\ \sin(\omega) = 2 \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) \\ 1 = \cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\omega}{2}\right) \end{cases} \quad \text{ottengo:}$$

$$\cos(\vartheta) = U \left[ \cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right) - \sin^2\left(\frac{\omega}{2}\right) \right] + V \left[ 2 \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) \right] + T \left[ \cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\omega}{2}\right) \right] = 0$$

Dividendo tutto per  $\cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right)$  e riordinando, ottengo:

$$(T - U) \tan^2\left(\frac{\omega}{2}\right) + 2V \tan\left(\frac{\omega}{2}\right) + (T + U) = 0$$

equazione di II° grado in  $\tan\left(\frac{\omega}{2}\right)$  che ammette due soluzioni da cui si ricavano  $\omega_1$  e  $\omega_2$

a) Quando  $U^2 + V^2 - T^2 < 0$  allora  $\omega_1$  e  $\omega_2$  sono radici complesse:

$$\text{Se } T + U \geq 0 \text{ la superficie è sempre esposta all'irraggiamento } \begin{cases} \omega' = -\omega_s \\ \omega'' = \omega_s \end{cases}$$

$$\text{Se } T + U < 0 \text{ la superficie non è mai esposta all'irraggiamento } \omega' = \omega'' = 0$$

b) Quando  $U^2 + V^2 - T^2 \geq 0$  allora  $\omega_1$  e  $\omega_2$  sono radici reali:

$$\omega' = -\min[|\omega_1|, (\omega_s)]$$

$$\omega'' = \min[|\omega_2|, (\omega_s)]$$

dove

$\omega'$  = angolo orario che corrisponde all'inizio dell'irraggiamento sulla superficie considerata

$\omega''$  = angolo orario che corrisponde alla fine dell'irraggiamento sulla superficie considerata

*Calcolo irraggiamento su suolo terrestre di una superficie comunque inclinata e orientata*

Come precedentemente spiegato la quantità d'energia solare che raggiunge una superficie posta sul suolo terrestre è suddivisa in tre contributi: componente diretta, componente diffusa e componente riflessa:

$$H = H_b + H_{dif} + H_r$$

Componente diretta ( $H_b$ ):

$$H_b = \int_{\omega'}^{\omega''} \left[ \frac{12}{\pi} G_0 (U \cos \omega + V \sin \omega + T) \right] d\omega \quad \text{con } G_0 = \text{costante solare}$$

Inoltre la componente diretta può essere espressa in funzione della componente diretta su superficie orizzontale, come

$$H_b = R_b H_{bh} = R_b (H_h - H_{dh}) = R_b H_h \left( 1 - \frac{H_{dh}}{H_h} \right)$$

Con  $H_h$  = Irraggiamento globale su superficie orizzontale

$H_{bh}$  = componente diretta su superficie orizzontale

$$H_{dh} = H_h - H_{bh}$$

$$R_b = \frac{H_b}{H_{bh}} = \text{Rapporto d'irraggiamento diretto}$$

Perciò otteniamo che

$$R_b = \frac{H_b}{H_{bh}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{U(\sin \omega'' - \sin \omega') - V(\cos \omega'' - \cos \omega') + T(\omega'' - \omega')}{(U_h \sin \omega_s + T_h \omega_s)} \right]$$

Componente diffusa ( $H_{dif}$ ):

La componente diffusa può essere trovata considerando la seguente approssimazione

$$\frac{d_q}{d_{qh}} \approx \frac{H_{dif}}{H_{dh}} \quad \text{dove} \quad \begin{cases} d_{qh} = \text{potenza emessa dalla superficie dell'intera volta celeste su} \\ \text{un infinitesimo di superficie orizzontale } d_s \\ d_q = \text{potenza emessa dalla superficie interessata della volta} \\ \text{celeste su un infinitesimo di superficie orientato} \end{cases}$$

Esplicitando le varie grandezze, otteniamo dunque

$$H_{dif} = H_{dh} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) = H_h \left( \frac{H_{dh}}{H_h} \right) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$$

Componente riflessa ( $H_r$ ):

Consideriamo la presenza della piastra piana (p), del suolo (s) e del cielo (c)

Dalle proprietà dei fattori di vista abbiamo che  $\frac{F_{pp}}{F_{pp}} + F_{ps} + F_{pc} = 1$  perciò

$$F_{ps} = 1 - F_{pc} = 1 - \frac{d_q}{d_{qh}} = 1 - \frac{1 + \cos \beta}{2} = \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

Inoltre  $S_p F_{ps} = S_s F_{sp}$  quindi possiamo trovare  $F_{ps} = F_{sp} \frac{S_s}{S_p}$ .

Ora possiamo definire  $H_r$  come

$$H_r = \rho \left( F_{sp} \frac{S_s}{S_p} \right) H_h = \rho H_h F_{ps} = \rho H_h \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad \text{con } \rho = \text{coefficiente di riflessione del suolo}$$

Possiamo ora trovare in senso esplicito l'irraggiamento totale su una superficie comunque orientata e inclinata sul suolo terrestre

$$H = H_h \left\{ \left[ R_b \left( 1 + \frac{H_{dh}}{H_h} \right) \right] + \left[ \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \frac{H_{dh}}{H_h} \right] + \left[ \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \right\} = R \cdot H_h = R \cdot K_t \cdot H_{oh}$$

$$\text{Dove } \left\{ \begin{array}{l} R = \frac{H}{H_h} \\ K_t = \frac{H_h}{H_{oh}} = \text{indice di soleggiamento reale (relazione di Duffie e Beckman)} \\ \frac{H_{dh}}{H_h} = 0.881 - 0.972 \cdot K_t \\ H_{oh} = \text{valore medio mensile dell'irraggiamento solare orizzontale} \\ \text{extratmosferico (valore ricavabile da tabelle)} \end{array} \right.$$

Dunque conoscendo le coordinate della superficie inclinata e orientata che vogliamo studiare (ad esempio un pannello fotovoltaico posto in una zona di cui si conosce  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\rho$ ) possiamo ora calcolare l'irraggiamento medio mensile e annuale.

Palermo,  $\beta=30^\circ$ ,  $\gamma=20^\circ$ ,  $\rho=0.2$

mese	$\delta$	$w'$	$w''$	$w_s$	KT	R <sub>b</sub>	R	H <sub>oh</sub>	MJ/m <sup>2</sup> d kWh/m <sup>2</sup> d kWh/m <sup>2</sup> mese		
									H (g)	H (g)	H (m)
gennaio	20.92	-72.55	72.55	72.55	0.475	1.874	1.493	16.20	11.50	3.19	99.01
febbraio	12.96	-77.81	79.60	79.60	0.519	1.566	1.341	21.38	14.89	4.14	115.79
marzo	-2.42	-79.61	88.10	88.10	0.581	1.294	1.186	27.99	18.62	5.17	160.35
aprile	9.41	-81.61	97.47	97.47	0.598	1.078	1.048	34.78	21.80	6.05	181.63
maggio	18.79	-83.28	103.25	105.48	0.639	0.940	0.952	39.42	23.98	6.66	206.48
giugno	23.08	-84.10	104.07	109.54	0.676	0.883	0.908	41.28	25.33	7.04	211.07
luglio	21.19	-83.73	103.70	107.71	0.693	0.908	0.927	40.28	25.85	7.18	222.60
agosto	13.46	-82.31	100.83	100.83	0.690	1.016	1.012	36.50	25.50	7.08	219.55
settembre	2.22	-80.39	91.75	91.75	0.645	1.201	1.147	30.40	22.47	6.24	187.26
ottobre	-9.59	-78.40	82.38	82.38	0.580	1.467	1.311	23.29	17.69	4.92	152.37
novembre	18.91	-74.41	74.41	74.41	0.534	1.784	1.490	17.40	13.86	3.85	115.48
dicembre	23.05	-70.50	70.50	70.50	0.467	1.982	1.547	14.77	10.68	2.97	91.93
Tot.									1963.53 kWh/m <sup>2</sup> anno		

Figura 2.4

Esempio di calcolo dell'irraggiamento medio mensile H

(Fonte: norma italiana UNI 8477-1)

L'irraggiamento medio annuale stimato per le varie zone d'Italia è il seguente:



*Figura 2.5*  
*Irraggiamento medio annuale sul piano orizzontale  $H_h$*   
*(Fonte: <http://solargis.info/doc/71>)*

## 2.2 Tecnologia fotovoltaica

### - *L'effetto fotoelettrico*

*Cenni storici:*

L'effetto fotoelettrico è noto fin dal 1839 quando il fisico francese Alexandre Edmond Becquerel presentò all'Accademia delle Scienze di Parigi lo scritto "Memoria sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari". Becquerel scopre la produzione di una corrente elettrica quando due piastre di due diversi metalli sono immerse in un liquido e vengono esposte alla luce solare.

Egli noto, infatti, che due elettrodi simili, immersi nella soluzione debolmente conduttrice di nitrato di piombo, acquistavano una differenza di potenziale elettrico se la regione attorno ad uno di essi veniva illuminata.

Nel 1876 gli europei, da un lato, gli americani, dall'altro, sono tutti indaffarati nelle ricerche sulla trasmissione via telegrafo. Si stendono i primi cavi da un continente all'altro, e si testano diversi metalli, tra cui il selenio. Che è un ottimo materiale quando è al coperto; ma quando la luce del sole lo raggiunge, la sua conduttività cambia tremendamente. I due britannici William Grylls Adams e il suo allievo Richard Evans alla fine descrivono con precisione nel 1876 l'effetto: se si illumina il selenio, si genera una lieve corrente elettrica.

Nel 1879 negli Stati Uniti Charles Fritts si spinge oltre. Stende un sottile strato di selenio e lo copre con una sottile pellicola semitrasparente d'oro. Nasce il primo pannello al mondo, una cella solare di circa 30 centimetri quadrati a base di Selenio con un'efficienza di conversione dell'1-2 per cento, l'antenato dei moduli moderni, che secondo Werner von Siemens "rappresenta per la prima volta la conversione diretta dell'energia luminosa in energia elettrica".

Nel 1921 Albert Einstein riceve il Premio Nobel per la fisica per le sue ricerche sull'effetto fotoelettrico, dopo che nel 1905 ebbe pubblicato la sua teoria nell'articolo "Su un punto di vista euristico riguardo all'emissione e trasformazione della luce", alla base del concetto di natura corpuscolare della luce e della scoperta dei fotoni.

L'effetto fotoelettrico può essere definito nella seguente maniera:

"Ogni processo in cui un elettrone, assorbendo un quanto di radiazione incidente, ne riceve energia sufficiente per liberarsi dal vincolo con l'atomo di appartenenza e diventa libero e disponibile alla conduzione elettrica, può definirsi effetto fotoelettrico"

#### *Struttura atomica ed effetto fotovoltaico:*

L'effetto fotoelettrico può essere apprezzabile solo in alcuni particolari materiali. Ciò è dovuto alla struttura atomica e cristallina del materiale considerato. Infatti, com'è noto, nella struttura atomica gli elettroni sono distribuiti su *orbitali* concentrici di diversa energia attorno al nucleo di neutroni e protoni.

## *2. Energia solare e tecnologia fotovoltaica*

L'orbitale più esterno è quello che contiene gli elettroni meno legati, detti di valenza, che possono essere al massimo otto. Se tutti e otto i posti disponibili sono occupati da elettroni significa che l'elemento è stabile e chimicamente non reattivo.

In particolare avremo:

Gli elementi del sistema periodico del I°, II° e III° gruppo (metalli) sono quelli i cui atomi hanno rispettivamente 1, 2 e 3 elettroni di valenza, i quali possono essere facilmente ceduti, trasformando l'atomo neutro in uno ione positivo (con eccesso di carica positiva).

Gli elementi del sistema periodico del V°, VI° e VII° gruppo sono quelli i cui atomi hanno rispettivamente 5, 6 e 7 elettroni di valenza e tendono a completare l'ultimo orbitale catturando gli elettroni mancanti e trasformandosi in ioni negativi (con eccesso di carica negativa).

Infine gli elementi del IV gruppo tendono sia a perdere che acquistare elettroni.

Inoltre bisogna considerare che nella materia solida gli atomi sono ben fissati in un reticolo cristallino, uno accanto all'altro secondo vari schemi geometrici. Questo comporta che per i solidi i legami tra atomi riescono a generare orbitali, non più atomici, ma molecolari, di varie energie.

Per facilitare la spiegazione di cosa accade nell'unione di più orbitali atomici in un reticolo cristallino, prendiamo come esempio un metallo del I gruppo.

Il Litio ha un solo elettrone sull'orbitale più esterno, quindi mette a disposizione il suo orbitale per la formazione di orbitali molecolari con 7 posti disponibili. Quando due atomi di Litio si uniscono tra loro per formare il reticolo, si ottengono due orbitali molecolari, uno legante (di livello energetico più basso, dove si pongono gli elettroni di valenza) e uno antilegante (di livello energetico maggiore, che rimane vuoto); gli elettroni che occupano l'orbitale legante sono quindi due, mentre l'orbitale antilegante rimane libero. Lo stesso avviene quando si legano tra loro un diverso numero di atomi.

Bisogna inoltre osservare che all'aumentare dei legami molecolari, la distanza tra l'orbitale legante con minore energia e l'orbitale antilegante con maggiore energia, aumenta, mentre diminuisce la distanza tra gli orbitali interni. Quindi in un reticolo con numerosissimi atomi, fra l'orbitale legante con minore energia e quello antilegante con maggiore energia, gli orbitali presenti sono così vicini tra loro che la distanza di separazione è trascurabile; possiamo quindi vedere questi orbitali come una banda continua.

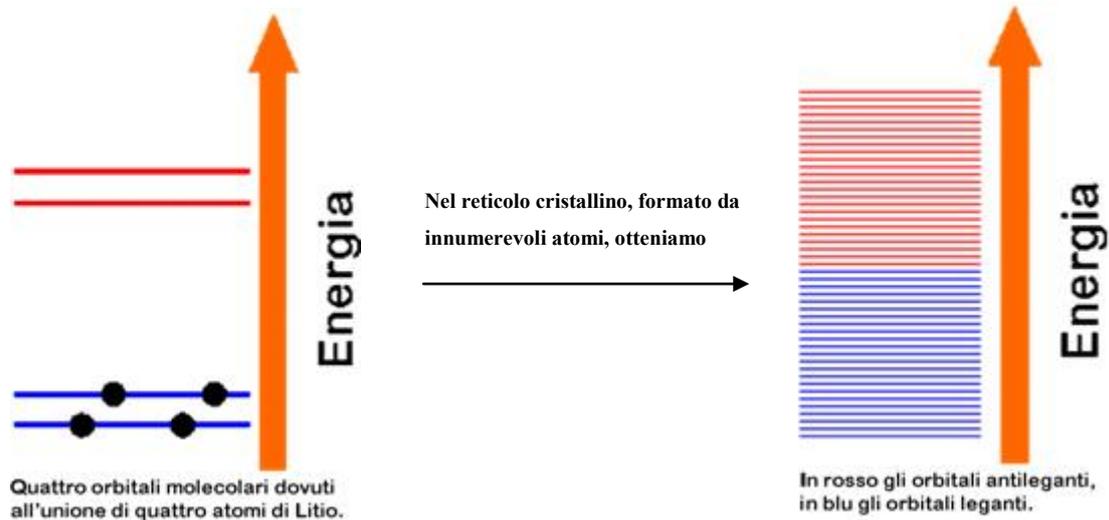


Figura 2.6  
Bande di energia dovute alla generazione di orbitali molecolari nel reticolo cristallino del Litio  
(Fonte: <http://www.iisalessandrini.it>)

Perciò, quando gli orbitali di diversi atomi si uniscono, i loro livelli energetici si sovrappongono originando appunto le bande. Si generano così bande permesse (cioè intervalli energetici in cui possono essere presenti gli elettroni) e bande proibite (intervalli vietati agli elettroni).

Due qualsiasi bande permesse sono quindi divise da un gap inaccessibile agli elettroni, inoltre la più alta banda di orbitali leganti permessa è detta *banda di valenza* (in cui stanno appunto gli elettroni di valenza), mentre quella appena successiva, formata dagli orbitali antileganti, è detta *banda di conduzione* (in cui a 0 K non sono presenti elettroni).

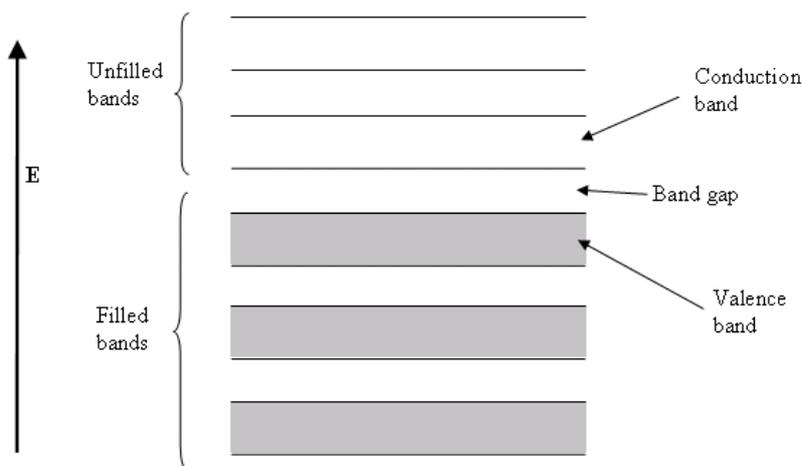


Figura 2.7  
Banda di valenza, banda di conduzione e gap energetico  
(Fonte: <http://www.iisalessandrini.it>)

Queste due importanti bande sono separate da un *gap energetico* di diversa grandezza a seconda del materiale. I materiali si possono così suddividere secondo il seguente criterio:

*Isolanti:*

Presentano un gap energetico molto elevato, in tali condizioni solo pochi elettroni avranno energia sufficiente a passare nella banda di conduzione

*Conduttori:*

Le bande di valenza e conduzione sono sovrapposte, eliminando di fatto la banda proibita. La maggior parte degli elettroni può passare nella banda di conduzione dando origine ad un flusso elettrico.

*Semiconduttori:*

Il gap energetico è molto piccolo, per cui è relativamente facile che degli elettroni possano passare alla banda di conduzione. In particolare gli elettroni possono passare dall'una all'altra se gli viene fornito un certo apporto d'energia, come l'arrivo di fotoni che abbiano associata una energia almeno pari al gap. Si ha allora l'effetto fotoelettrico

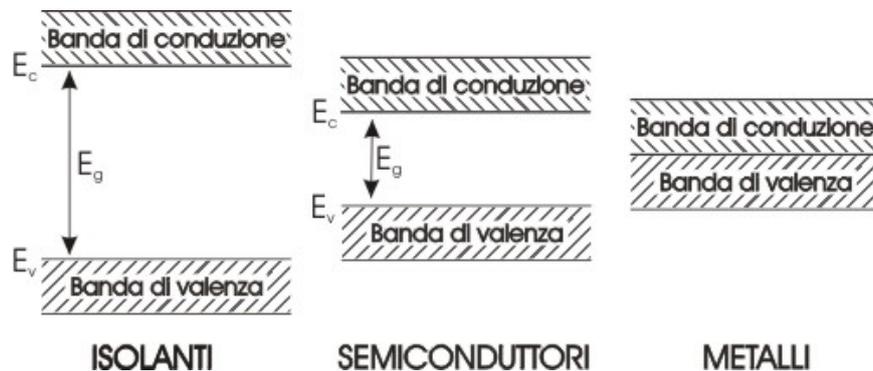


Figura 2.8  
Materiali isolanti, semiconduttori e conduttori in relazione al gap energetico  
(Fonte: <http://www.antoniosantoro.com>)

Dunque per ottenere l'effetto fotoelettrico devono essere utilizzati materiali semiconduttori e la radiazione che li colpisce deve possedere fotoni con energia maggiore o uguale a quella del gap energetico fra banda di valenza e conduzione.

L'energia di un fotone può essere espressa secondo la relazione  $E = h \cdot \nu$  con  $h$  = costante di Planck, mentre l'energia corrispondente al gap è tabulata per vari materiali semiconduttori.

I fotoni che non presentano energia sufficiente ad innescare il processo fotoelettrico contribuiranno solo ad innalzare la temperatura del materiale.

- **La cella fotovoltaica: caratteristiche costruttive:**

*Silicio e coppie elettrone-buca:*

Uno dei semiconduttori più utilizzati per la conversione fotovoltaica è il silicio, con un atomo di 14 elettroni dei quali 4 di valenza; quando del silicio cristallino viene investito da fotoni con energia superiore a 1.08 eV (che corrisponde a  $\lambda = 1.15$  nm), questi sono assorbiti, dando luogo alla liberazione di un elettrone e contemporaneamente di una buca (vacanza).

Perciò, quando un raggio di luce investe il reticolo cristallino di silicio, milioni di *coppie elettrone-buca* vengono generate; appena la luce cessa di illuminare il cristallo, tutti gli elettroni vengono riassorbiti e il materiale torna nelle sue condizioni iniziali, subendo solo un modesto aumento di temperatura.

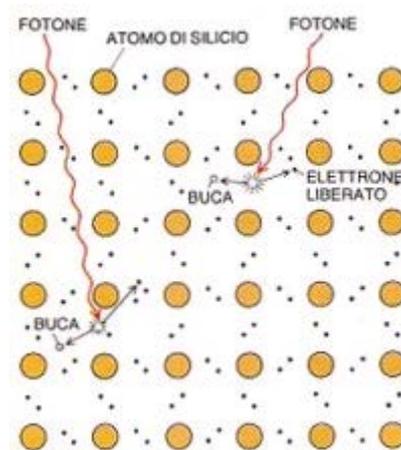


Figura 2.9  
Formazione di coppie elettrone - buca  
(Fonte: <http://www.iisalessandrini.it>)

Per alterare questo normale comportamento e rendere possibile lo sfruttamento del materiale per la produzione diretta d'energia elettrica dalla radiazione solare, si può effettuare un *drogaggio mirato*.

Il drogaggio del silicio avviene attraverso l'introduzione, all'interno del reticolo cristallino, di atomi di diversa specie, appartenenti a sostanze estranee (si inserisce 1 atomo ogni  $10^4$ - $10^7$  atomi di silicio).

Possono essere inseriti atomi di elementi a valenza III (boro, alluminio, gallio, indio, tallio) chiamati accettori, i quali producono un *cristallo di tipo p*, che ha, cioè, un eccesso di buche.

Oppure possono essere inseriti atomi di elementi a valenza V (antimonio, fosforo, arsenico, bismuto) chiamati donatori, i quali producono un *cristallo di tipo n*, che ha, cioè, un eccesso di elettroni liberi.

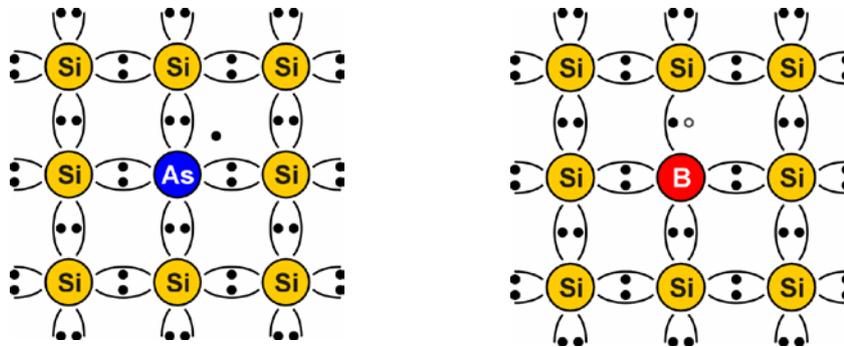


Figura 2.10  
Cristalli di silicio di tipo n e di tipo p  
(Fonte: <http://www.iisalessandrini.it>)

### Giunzione p-n e celle solari:

Nel momento in cui un sottile strato di silicio drogato ad esempio con fosforo (cristallo n) è posto a contatto diretto con del silicio drogato ad esempio con boro (cristallo p), durante la fabbricazione di una cella fotovoltaica, si è effettuata la cosiddetta *giunzione p-n*.

Le conseguenze di questa giunzione tra strato p ed n sono molto importanti. Accade, infatti, che alcuni degli elettroni in eccesso nello strato n diffondano, in un breve tratto, nello strato p sottostante, ricco di buche. Tale parziale migrazione di elettroni lascia gli atomi di fosforo del cristallo n carichi positivamente (difetto di elettroni), mentre gli atomi di boro del cristallo p si caricano negativamente (eccesso di elettroni). Si viene così a generare questo sottilissimo strato di carica elettrica statica detto *zona di svuotamento* o *barriera di cella*.

Una cella solare è dunque composta da uno strato di cristallo n a contatto con uno strato di cristallo p in modo tale da ottenere un passaggio di carica ogni qualvolta dei fotoni con adeguata energia impattino il materiale semiconduttore.

Quando un fotone libera elettroni nei due strati p ed n, la barriera di cella si comporta come un diodo, assecondando il passaggio di elettroni verso il cristallo n e bloccandoli verso il cristallo p, riordinando così le cose, mantenendo l'eccesso di elettroni in n e l'eccesso di buche in p.

In questo modo gli elettroni di conduzione, generati nel cristallo p, riusciranno dunque a superare la zona di svuotamento e si andranno a sommare agli elettroni generati nel cristallo n, dove si accumulano. Ora, se i due diversi strati cristallini di silicio vengono collegati mediante materiale conduttore a cui è associato un carico, si ha il passaggio degli elettroni in eccesso attraverso il circuito elettrico dal cristallo n al cristallo p e la cella assume il comportamento di un generatore di corrente continua.

Il cristallo n è realizzato con uno spessore tale che la giunzione venga a trovarsi ad una profondità ottimale per assorbire fotoni (per il silicio lo spessore ottimale dello strato n è di 0.5 mm).

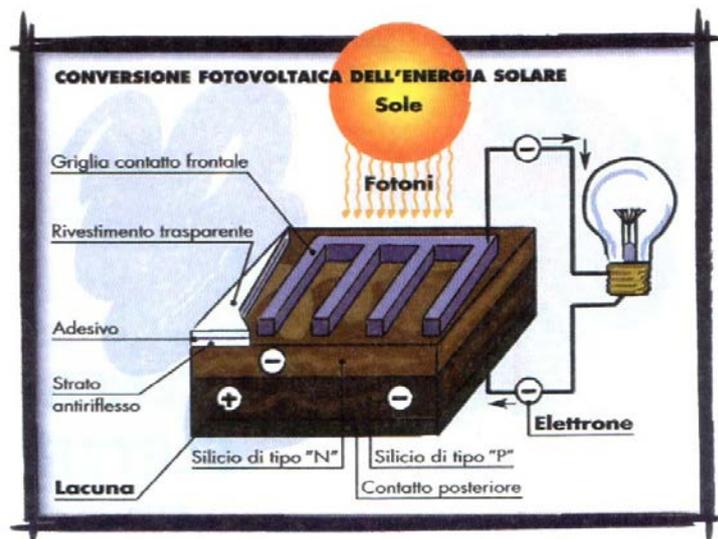


Figura 2.11  
Struttura e comportamento di una cella fotovoltaica  
(Fonte: [fotovoltaicoita.altervista.org](http://fotovoltaicoita.altervista.org))

### Tipologie costruttive delle celle solari

Esistono attualmente in commercio varie tipologie di celle solari, suddivisibili principalmente a seconda del materiale e del processo necessario per produrle. La suddivisione tipica distingue le celle in: celle al silicio monocristallino, celle al silicio policristallino, celle a film sottile.

## *2. Energia solare e tecnologia fotovoltaica*

### *Celle solari in silicio monocristallino:*

Il primo e ancora oggi il più comune materiale semiconduttore usato per le celle fotovoltaiche è il Silicio monocristallino. Le celle di Silicio monocristallino ad alto grado di purezza sono le celle di più alta efficienza: convertono più del 19% dell'energia solare in energia elettrica e sono anche molto durevoli nel tempo.

Il principale problema del Silicio monocristallino è però il suo elevato costo di produzione, infatti, la crescita cristallografica e poi il taglio in sottili film (0,1 – 0,3mm) del pezzo prodotto, è un processo lento e costoso.

La conversione dei wafers in celle fotovoltaiche finite avviene in tre fasi: Una tessitura chimica della superficie per produrre piramidi che riducono la perdita di energia per riflessione. La formazione di una giunzione p-n esponendo le celle alle impurità desiderate ad alta temperatura (le impurità diffonderanno per un sottile strato sulla superficie). L'ultimo e più importante passo è la metallizzazione della cella, cioè l'applicazione sul fronte retro, di contatti metallici. dopo che le celle sono prodotte singolarmente, esse sono interconnesse usando strisce metalliche come interconnettori.

### *I principali vantaggi sono i seguenti:*

Poiché i pannelli solari monocristallini annoverano il più alto grado di purezza del silicio in essi contenuto sono anche i più efficienti. Il tasso di rendimento (la quantità di energia sotto forma di luce solare che viene convertita in energia elettrica), di solito si aggira intorno al 12-19%. Un altro modo di dire "ad alta efficienza" è "spazio-efficienti". Poiché i pannelli monocristallini hanno la più elevata potenza di produzione, richiedono anche una minore quantità di spazio per ottenere una capacità desiderata rispetto agli altri tipi. Inoltre tendono a durare più a lungo e la maggior parte dei produttori dà una garanzia di 25 anni su di loro.

### *I principali svantaggi sono i seguenti:*

I pannelli solari monocristallini sono i più costosi, inoltre se il pannello è parzialmente coperto da ombra, sporco o neve, l'intero circuito è inutilizzabile. Per creare il silicio monocristallino si devono fabbricare grandi lingotti cilindrici e, a causa della geometria di questi lingotti, le celle in silicio monocristallino non sono interamente quadrate, perciò quantità significative di silicio finiscono per essere sprecate.

Inoltre i pannelli monocristallini sono più efficienti durante la stagione fredda, ma quando la temperatura aumenta, il tasso di conversione elettrica diminuisce.

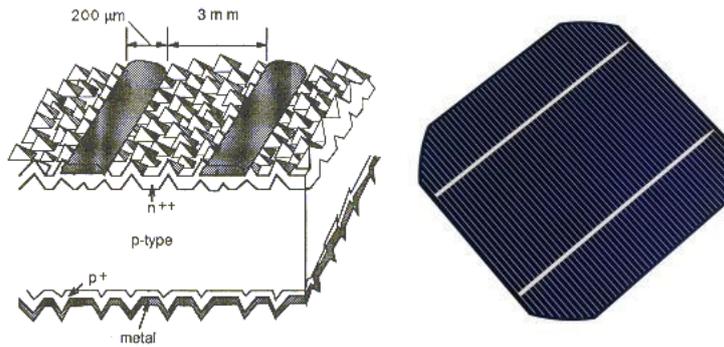


Figura 2.12  
Cella solare in silicio monocristallino  
(Fonte: <http://italian.monocrystalline-solarpanels.com>)

### *Celle solari in silicio policristallino:*

Un materiale alternativo al silicio monocristallino è il Silicio policristallino, la sua tecnica di produzione è il *Wacher ingot facturing process (WICP)* che usa due differenti contenitori per la fusione e la ricristallizzazione. Questo metodo è più economico, ma ha degli svantaggi; i wafer prodotti contengono stress interni, impurità e confini di grano, tutti fattori che aumentano la resistenza del materiale al flusso elettronico.

Le celle di Silicio policristallino sono in sostanza più economiche ma hanno sempre una minore efficienza: 15-17%.

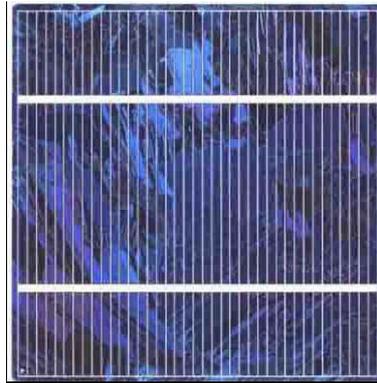
### *I principali vantaggi sono i seguenti:*

Il processo utilizzato per confezionare il silicio policristallino è più semplice e meno costoso. Dal momento che i wafer sono già quadrati, c'è anche minor spreco di materiale, pertanto, i pannelli solari policristallini costano meno.

I pannelli policristallini hanno una tolleranza al calore superiore a quelli realizzati in silicio monocristallino, tendono perciò ad aver risultati migliori quando impiegati ad alte temperature.

### *I principali svantaggi sono i seguenti:*

Questi pannelli non sono efficienti come quelli monocristallini poiché il silicio è meno puro, tuttavia la tecnologia è in costante miglioramento. Bisogna però considerare che è necessario coprire una superficie maggiore per produrre la stessa potenza elettrica che si otterrebbe con un pannello in silicio monocristallino. Infine da un punto di vista puramente estetico i pannelli solari policristallini possiedono il tipico aspetto a chiazze blu, considerato spesso meno piacevole rispetto l'uniformità delle celle monocristalline.



*Figura 2.13*  
*Cella solare in silicio policristallino*  
(Fonte: [www.cifgroup.it](http://www.cifgroup.it))

*Celle solari a film sottile (TFSC):*

Le celle solari a film sottile sono realizzate da un film sottile di materiale fotovoltaico depositato ad un substrato di vetro o altro materiale. I diversi tipi di celle fotovoltaiche a film sottile possono essere classificati in base al materiale fotovoltaico utilizzato:

Film sottile di: silicio amorfo (a-Si); Tellururo di cadmio (CdTe); Seleniuro di rame, indio e gallio (CIGS).

In commercio può essere trovato soprattutto il primo materiale, utilizzato per specifici scopi come l'alimentazione di piccoli oggetti (calcolatrici solari etc.). Il film di queste celle è sottile perché ha una buona proprietà di assorbimento della radiazione, inoltre risulta molto economico da produrre.

*I principali vantaggi sono i seguenti:*

Invece di wafer di silicio spessi, basta materiale fotovoltaico appena sufficiente a coprire la superficie dei substrati. I pannelli solari in silicio amorfo utilizzano addirittura minori quantità di silicio rispetto a ambedue i pannelli mono e policristallino.

Il processo di produzione che si utilizza per la produzione di celle solari a film sottile in silicio amorfo è relativamente semplice, facile da scalare; tali celle solari sono quindi generalmente molto economiche.

Inoltre può essere reso flessibile e leggero e quindi maggiormente applicabile a casi specifici. Possono essere posizionati su superfici curve e probabilmente in futuro essere incorporati in indumenti. Infine questi pannelli fotovoltaici reagiscono meglio in casi di copertura parziale, come sotto ombra, sporcizia e neve rispetto ai pannelli cristallini.

*I principali svantaggi sono i seguenti:*

I pannelli solari a film sottile non durano così a lungo come quelli mono e policristallini. Inoltre il principale problema è che le celle solari amorfe hanno solo un tasso di conversione del 6-12 per cento della radiazione incidente.

Differente è il caso di celle in Tellururo di cadmio (CdTe) e Seleniuro di rame, indio e gallio (CIGS), non ancora commercializzate, ma con proprietà interessanti. Hanno un alto potere d'assorbimento e buone rese per essere celle a film sottile, ma presentano materiali rari e costosi, oltre che un rischio di tossicità elevato nel processo produttivo.



Figura 2.14  
Cella solare a film sottile  
(Fonte: [www.genitronsviluppo.com](http://www.genitronsviluppo.com))

**- La cella fotovoltaica: caratteristiche operative:**

*Circuito elettrico equivalente:*

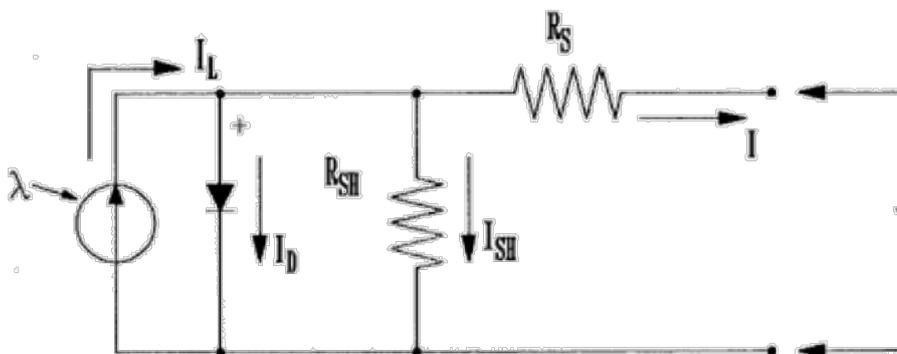


Figura 2.15  
Circuito elettrico equivalente di una cella fotovoltaica  
(Fonte: <http://www.ing.unitn.it>)

## 2. Energia solare e tecnologia fotovoltaica

Da un punto di vista operativo il comportamento di una cella fotovoltaica può essere approssimato attraverso un circuito elettrico equivalente.

I parametri del circuito sono i seguenti:

la corrente in uscita  $I$  è pari alla corrente generata dall'effetto fotovoltaico  $I_L$ , meno la corrente del diodo  $I_d$  e della resistenza trasversale  $I_{sh}$ . La resistenza serie  $R_s$  rappresenta la resistenza interna al flusso della corrente e dipende dalla giunzione, dalle impurità e dalle resistenze dei contatti. La resistenza trasversale  $R_{SH}$  è legata alla corrente dispersa verso terra. In una cella ideale,  $R_s$  è nulla (nessuna perdita interna), e  $R_{SH}$  è infinita (nessuna corrente dispersa verso terra). Tipici valori di una cella di buona qualità sono  $R_s = 0.05 - 0.1 \Omega$  e  $R_{SH} = 200 - 300 \Omega$ . La conversione fotovoltaica è sensibile anche a piccole variazioni di  $R_s$ , ma è praticamente insensibile a variazioni di  $R_{SH}$ . Un piccolo incremento di  $R_s$  può diminuire significativamente la potenza erogata da una cella. Nel circuito equivalente, la tensione  $V_d$  ai capi di  $R_{SH}$  e del diodo è data dalla relazione  $V_d = V + IR_s$

La corrente del diodo è data dalla relazione di Shockley:  $I_d = I_D \left( e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right)$

dove  $I_D$  è la corrente di saturazione del diodo,  $n$  è un coefficiente in genere compreso fra 1 e 2 che dipende dal materiale e dalla costruzione della cella e  $V_T$  è la cosiddetta tensione termica della giunzione:  $V_T = \frac{KT}{Q}$  con  $Q$  la carica dell'elettrone,  $K$  la costante di Boltzmann (circa  $8.617 \cdot 10^{-5}$  eV/°K) e  $T$  la temperatura (in °K).

La corrente sul carico è data quindi da:  $I = I_L - I_D \left( e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_{sh}}$

L'ultimo termine, la corrente dispersa a terra, è in genere piccola rispetto a  $I_L$  e  $I_D$  e può essere trascurata.

Altri due parametri importanti sono la tensione a vuoto  $V_{oc}$  e la corrente di cortocircuito  $I_{sc}$  che rappresentano rispettivamente la corrente che circolerebbe nel caso in cui la cella fotovoltaica fosse chiusa su un cortocircuito e la tensione che si ha ai morsetti della cella in assenza di carico.

Scegliendo un carico opportuno è possibile far lavorare la cella nelle condizioni di massima potenza  $P_M = V_M I_M$

Per una corretta ed univoca valutazione delle prestazioni di una cella solare è necessario riferirsi a condizioni di insolazione e termiche note a priori; a questo scopo si utilizza lo

standard STC (standard test conditions), che consiste in: radiazione incidente =  $1000 \frac{W}{m^2}$ ;  
 temperatura celle =  $25^{\circ}C$ , spettro radiazione solare = 1,5 AM; vento = 0 m/s

Inoltre si definisce *rendimento di conversione* di una cella il rapporto fra la potenza elettrica prodotta e l'intensità dell'irraggiamento. Questo dipende dal materiale utilizzato, soprattutto in relazione alla presenza di difetti reticolari, impurità e dal tipo di lavorazione a cui viene sottoposto il silicio per la realizzazione della cella stessa.

*Caratteristiche I-V e P-V:*

La caratteristica elettrica della cella è in genere rappresentata mediante la caratteristica voltamperometrica (I-V).

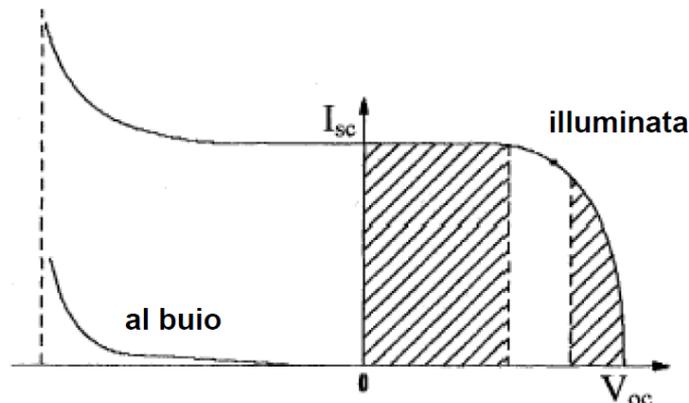


Figura 2.16  
 Caratteristica I-V di una cella fotovoltaica  
 (Fonte: <http://www.ing.unitn.it>)

La figura mostra la caratteristica V-I in condizioni di irraggiamento e al buio. Nel primo quadrante, il valore della corrente per  $V=0$  è la corrente di cortocircuito ( $I_{sc}$ ). Il valore di tensione corrispondente a  $I=0$  è il valore della tensione a vuoto ( $V_{oc}$ ). Nella regione tratteggiata più a sinistra, la cella funziona approssimativamente come un generatore di corrente costante, con valori di tensione che dipendono dalla resistenza complessiva del carico. Nella regione tratteggiata più a destra, la corrente decresce rapidamente anche per un piccolo aumento della tensione. In questa regione la cella funziona come un generatore di tensione quasi costante.

## 2. Energia solare e tecnologia fotovoltaica

Se la tensione è applicata esternamente nella direzione inversa la corrente rimane costante e la cella assorbe potenza. Oltre ad un certo valore di tensione (in ing. breakdown voltage), circa uguale sia in condizioni di cella illuminata sia al buio, la corrente aumenta rapidamente.

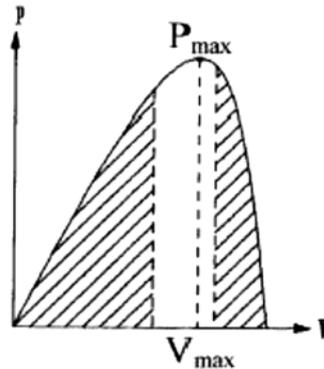


Figura 2.17  
Caratteristica P-V di una cella fotovoltaica  
(Fonte: <http://www.ing.unitn.it>)

La potenza in funzione della tensione prodotta da una cella ha l'andamento mostrato nella figura precedente, ottenuto dal prodotto  $IV$ . Notiamo che la potenza è nulla quando si annulla o la tensione o la corrente. Il valore massimo della corrente si ha in corrispondenza del ginocchio della caratteristica I-V. I circuiti delle celle fotovoltaiche devono essere quindi progettati e controllati in modo da funzionare in corrispondenza di tale zona, leggermente a sinistra del ginocchio (generatore di corrente).

Infine la potenza prodotta dalla cella è influenzata dalla temperatura. Si ha che per ogni  $^{\circ}\text{C}$  di aumento della temperatura la cella al silicio diminuisce la potenza prodotta di circa lo 0,45%. Questo è mostrato nella seguente figura, dove le due curve di potenza sono tracciate per due diverse temperature. Non solo i due picchi di potenza sono diversi, essendo quello a maggiore temperatura più elevato di quello a temperatura più bassa, ma anche i valori di tensione corrispondenti alla potenza massima sono diversi. Ciò rende necessario una regolazione che imponga il valore ottimale della tensione in ogni istante.

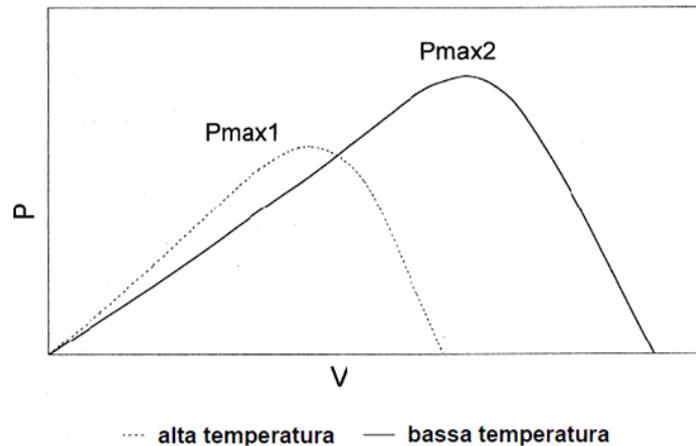


Figura 2.18  
 Caratteristica P-V in relazione a diverse temperature  
 (Fonte: <http://www.ing.unitn.it>)

Questo controllo può essere realizzato mediante diversi schemi. Descriviamo qui tre diversi approcci:

a) in un primo metodo, una piccola corrente è iniettata periodicamente entro il pannello e viene misurata la cosiddetta impedenza dinamica  $Z_d = dV/dI$  e la impedenza statica  $Z = V/I$ . La tensione di esercizio è aumentata o diminuita finché  $Z_d = -Z$ . A questo punto si è nelle condizioni di massima potenza prodotta. Infatti:  $P + \Delta P = (V + \Delta V)(I + \Delta I)$

ignorando il prodotto fra due quantità infinitesime si ha:  $\Delta P = \Delta V \cdot I + \Delta I \cdot V$

Nel punto di massimo  $\Delta P$  deve annullarsi e, quindi, deve risultare:  $\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I}$

b) Un altro metodo consiste nel variare periodicamente la tensione se  $dP/dV$  è diverso da zero.

c) Il terzo metodo sfrutta una proprietà delle celle: il rapporto fra la tensione corrispondente alla potenza massima e la tensione a vuoto è approssimativamente costante e pari ad un valore caratteristico della cella (ad esempio per celle in silicio cristallino è pari a circa 0,72).

Secondo questo metodo, una cella del pannello è lasciata scollegata dalle altre e la tensione del pannello viene controllata ad un valore pari al prodotto della costante soprammenzionata e la tensione a vuoto misurata ai morsetti della cella scollegata.

- **L'impianto fotovoltaico:**

Un impianto fotovoltaico è un impianto elettrico costituito essenzialmente dall'assemblaggio di più pannelli fotovoltaici, dalla necessaria componente elettrica ed elettronica (cavi e inverter) ed eventualmente da sistemi meccanici-automatici di supporto ad inseguimento solare.

Il materiale fotovoltaico è formato a partire dall'unità di base rappresentata dalla *cella* fotovoltaica. Le celle vengono dunque assemblate assieme per formare un *modulo*. A sua volta l'insieme di più moduli viene chiamato *pannello* fotovoltaico e, ancora, l'insieme di questi è una *stringa*. Ecco, infine, che più stringhe rappresentano un *generatore (campo) fotovoltaico* completo.

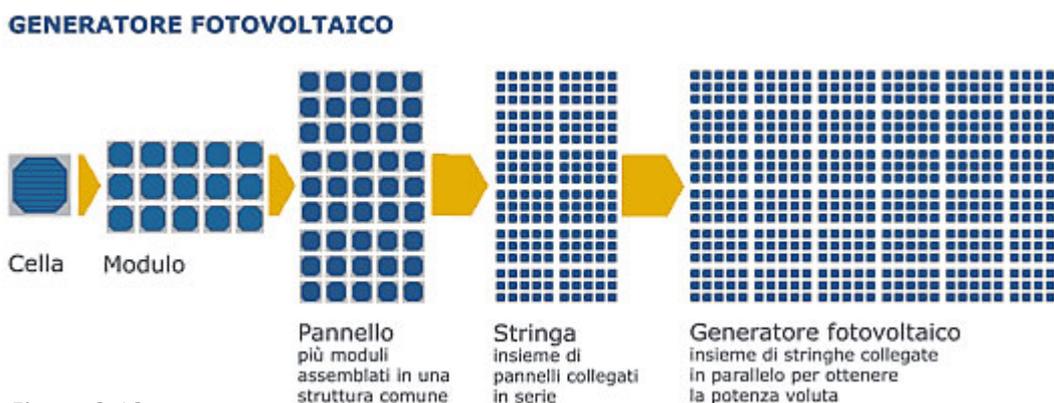


Figura 2.19

Schematizzazione della composizione di un generatore fotovoltaico

(Fonte: <http://www.ing.unitn.it>)

Tipicamente le celle vengono assemblate a gruppi di 9, o al massimo di 18, ciò per fare in modo che 36 celle, collegate in serie, forniscano il voltaggio necessario per caricare delle batterie da 18 V. Dunque un collegamento in serie permetterebbe di aumentare il voltaggio complessivo a parità di corrente circolante, mentre un collegamento in parallelo permetterebbe un aumento di amperaggio a parità di tensione.

Nella pratica il collegamento in serie o in parallelo delle celle comporta importanti conseguenze e problemi, infatti alcune celle potrebbero finire in zone d'ombra e comportarsi come assorbitori di potenza, oppure andare in avaria e rimanere in condizioni di circuito aperto o cortocircuito.

Ogni tipologia di collegamento presenta a suo modo vantaggi e svantaggi:

### *Collegamento in serie*

Se le celle presentano fra loro un diverso comportamento (possiedono caratteristica differente) l'intera fila assumerà le caratteristiche della cella a più basse prestazioni. Inoltre se anche solo una cella si trova in condizioni di circuito aperto l'intera fila sarà inutilizzabile, al contrario, se si trova in cortocircuito, presenta modeste conseguenze sulle altre.

Se sono presenti zone d'ombra che ricoprono alcune celle, queste si comporteranno come assorbitori di potenza e dissiperanno la maggior parte del contributo delle altre.

### *Collegamento in parallelo*

Se le celle presentano fra loro un diverso comportamento (possiedono caratteristica differente) la resa sarà definita dalla media delle rese delle singole celle. Inoltre se una cella si trova in condizioni di circuito aperto presenterà modeste conseguenze sulle altre, ma se si trova in cortocircuito allora l'intera fila sarà inutilizzabile.

Infine, se sono presenti zone d'ombra che ricoprono alcune celle, l'effetto negativo sarà percepito solo sulla fila considerata.

Per minimizzare quest'ultimo problema possono essere posti dei *diodi shunt* tra ogni fila connessa in parallelo o tra ogni cella connessa in serie. In generale è consigliato limitare il numero di celle interconnesse in serie.

Gli elementi fotovoltaici sono poi montati su adeguate strutture di sostegno realizzate generalmente in metallo, con le quali si può ottenere l'inclinazione desiderata del piano dei moduli stessi rispetto all'orizzontale; l'inclinazione approssimativa ottimale è considerata circa 30°.

È inoltre presente un inverter, ovvero un dispositivo elettronico che permette di ottenere la conversione da corrente continua, prodotta dall'impianto fotovoltaico, in alternata, pronta per essere adeguata alle caratteristiche della rete elettrica nazionale o del sistema d'accumulo collegato, se si tratta di impianti isolati.

In aggiunta a tutto questo è naturalmente necessaria la presenza di un sistema di controllo, ovvero di appositi dispositivi elettronici che, oltre a tenere sotto controllo il funzionamento dell'impianto, permettono la registrazione delle misure e la visualizzazione di alcune grandezze caratteristiche. Questi sistemi sono oltremodo necessari nei casi in cui l'impianto è connesso alla rete elettrica, in modo da ricoprire la funzione di contatori e poter quindi gestire le informazioni di produzione e consumo.

## *2. Energia solare e tecnologia fotovoltaica*

Un primo contatore è dunque installato dal gestore GSE a valle dell'inverter, così da poter quantificare la totalità dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico e produrre dati necessari al riconoscimento delle tariffe incentivanti. Un secondo contatore misurerà poi l'energia non assorbita dall'utenza e che quindi può essere introdotta in rete e comprata dal gestore. Infine, un terzo contatore terrà nota dell'energia che la rete fornisce all'utenza nei casi di necessità (ad esempio in periodi di scarso soleggiamento). Questi ultimi due contatori possono essere integrati anche in un unico elemento bidirezionale.



---

### **3. Integrazione architettonica della tecnologia fotovoltaica**

Da quando l'uomo ha iniziato a dotarsi di un tetto sotto il quale vivere, ha sempre cercato di sfruttare, a suo favore e a favore delle condizioni di vita all'interno delle abitazioni, il Sole e l'energia che questo irradia sulla Terra.

Basandosi su manuali non scritti, fondati solo su regole esperienziali, sono stati messi in pratica per secoli principi costruttivi e regole empiriche, tramandati di generazione in generazione da capomastri e artigiani. Costoro, nel proprio tempo e nel proprio spazio, hanno sempre adattato le rispettive conoscenze pratiche a diverse condizioni di vita, differenti climi ed eterogenei livelli di progresso, sia sociale che tecnologico.

Tuttavia, in qualsiasi ambiente ed ogni epoca storica, il Sole è sempre stato posto come punto di riferimento principale fin dalle prime fasi della progettazione.

Nel secolo corrente la corretta ideazione di architetture abitative segue ancora questo stesso principio, ponendo l'astro al centro del processo creativo, ed il suo potenziale sfruttamento, come obiettivo perseguibile di ottimizzazione ed efficienza.

Considerando, inoltre, che nel tempo corrente si sono presentate problematiche nuove, come quelle ambientali, sociali ed economiche che caratterizzano i moderni centri urbani, l'architettura è chiamata a rispondere in maniera nuova, proponendo moderne competenze e tecnologie innovative per la risoluzione di tutti questi problemi.

Una sfida importante in questo senso viene dall'integrazione negli edifici dei dispositivi atti a produrre energia sfruttando la radiazione solare, ossia i sistemi fotovoltaici integrati: occorre fare in modo che questi siano energeticamente efficienti, poco impattanti ed economicamente vantaggiosi.

### 3.1 Building-integrated photovoltaics (BIPV)

#### - *Storia e attualizzazione dell'integrazione fotovoltaica in architettura*

Con il miglioramento della tecnologia fotovoltaica avvenuto a partire dagli anni '90 e la sensibilizzazione dell'opinione pubblica sulle tematiche collegate all'utilizzo di questa applicazione, si è potuto sviluppare il raggiungimento dell'economia di scala da parte del settore, abbattendo, anche grazie a politiche d'incentivazione da parte di governi e istituzioni, i costi necessari alla diffusione di questi prodotti.

Bisogna però considerare che la crescente e repentina popolarità delle tecnologie solari, ha portato inevitabilmente ad un utilizzo architettonicamente e costruttivamente indiscriminato della tecnologia fotovoltaica. A partire da questa problematica si è potuto sviluppare un nuovo modo d'intendere l'utilizzo del fotovoltaico. Un approccio del tutto nuovo, che ricercasse, al tempo stesso, una efficienza specificatamente architettonica ed una capacità d'ottimizzazione delle prestazioni, sia tecniche che economiche, eminentemente ingegneristica. Questo connubio di visioni ha generato un nuovo settore dell'industria fotovoltaica: l'integrazione costruttiva ed architettonica di elementi fotovoltaici (BIPV).

Divenendo, il pannello, contemporaneamente parte dell'involucro edilizio e generatore di energia, i sistemi BIPV permettono di ridurre i costi d'investimento iniziali in quanto sia il materiale che la manodopera necessari alla realizzazione dell'impianto fotovoltaico sono minori rispetto ad un'esecuzione tradizionale dove i moduli non rimpiazzano i tradizionali elementi costruttivi.

Si tratta di una tecnologia multifunzionale che può essere adottata in modo ottimale sia nelle nuove costruzioni che negli edifici preesistenti.

Questo utilizzo più razionale dei materiali permette di ridurre il quantitativo di energia grigia necessario alla realizzazione del sistema edificio + impianto fotovoltaico.

Grazie allo sfruttamento in loco della tecnologia fotovoltaica viene inoltre ridotto l'utilizzo di vettori energetici non rinnovabili, così come di gas serra immesso in atmosfera.

Tutto ciò rende oggi la tecnologia BIPV uno dei settori dell'industria fotovoltaica con il più alto tasso di crescita.

### *3. Integrazione architettonica della tecnologia fotovoltaica*

L'acronimo BIPV si riferisce a sistemi e concetti nei quali l'elemento fotovoltaico assume, oltre alla funzione di produrre elettricità, il ruolo di elemento da costruzione.

Negli ultimi anni l'integrazione in architettura dei moduli sta evolvendo fortemente. I nuovi prodotti, infatti, per dimensioni e caratteristiche, sono in grado di sostituire integralmente molti dei componenti costruttivi tradizionali.

Con elemento da costruzione si intende un componente edilizio utilizzato come parte dell'involucro dell'edificio (elemento di copertura del tetto, rivestimento di facciata, superficie vetrata), dispositivo di protezione solare (frangisole), elemento architettonico "accessorio" (pensilina, parapetto di balconi, ecc.) e ogni altro elemento architettonico necessario al buon funzionamento dell'edificio (schermatura visiva e acustica).

Questa definizione esclude quindi gli impianti "indipendenti" dall'edificio quali pannelli montati su supporti appoggiati o fissati a tetti o altre parti di edificio che non assumono nessun'altra funzione oltre alla produzione di elettricità (soluzioni che rappresentano la maggior parte delle superficie fotovoltaiche installate oggi).

Oltre all'edilizia nel senso stretto del termine, sono anche considerati "integrati" gli impianti legati a strutture "urbane" e di trasporto (pensiline indipendenti, ripari per veicoli, strutture sportive o di gioco, fermate di bus, etc.).



*Figura 3.1*

*Esempio di una recente architettura BIPV (Monte Rosa Lodge )*

*(Fonte: <http://www.rogerallen.net/blog/archives/7779>)*

## 3.2 Modalità e tipologie d'integrazione fotovoltaica

### - *Integrazione su edifici esistenti, su nuovi edifici, su arredo urbano*

L'integrazione architettonica dei sistemi fotovoltaici negli edifici si può distinguere in tre principali categorie, le quali si possono classificare a seconda dell'oggetto d'intervento:

- a) interventi su edifici esistenti retrofit;
- b) interventi su nuovi edifici;
- c) interventi su elementi di arredo urbano.

In tutte le possibili integrazioni vi sono molteplici elementi di cui tenere conto, anche in base alla scelta della specifica esigenza. Sicuramente la difficoltà maggiore in fase di progettazione sta nel dimensionare, orientare e posizionare i moduli nell'edificio affinché se ne possa massimizzare il rendimento energetico. Negli interventi BIPV "ex novo" la procedura è semplificata dal fatto che l'edificio può essere progettato interamente in funzione di questo aspetto. Al contrario, per interventi retrofit, dovendo intervenire su edifici già esistenti, si dovrà agire solo sulle superfici che hanno la migliore esposizione solare. In tutti e due i casi è comunque fondamentale tenere conto delle possibili ombreggiature dovute agli edifici adiacenti, alla presenza di alberi o ad altri elementi che ostacolano la radiazione incidente. Negli interventi retrofit, poi, va sicuramente posta particolare attenzione alla progettazione della struttura di sostegno e di ancoraggio dei moduli, specie nelle integrazioni in facciata, in cui quest'ultima deve essere capace, al tempo stesso, di sopportare i carichi dei pannelli e di non compromettere l'estetica dell'edificio.

Altrettanto delicata è la progettazione di facciate vetrate fotovoltaiche, sia in interventi retrofit che "ex novo"; In questo caso infatti, occorre curare l'isolamento della struttura tra le giunture dei pannelli e, assieme, riuscire a nascondere i cablaggi di collegamento delle varie stringhe. Nella realizzazione di lucernai fotovoltaici o di coperture vetrate è inoltre fondamentale tenere conto di eventuali sovraccarichi dovuti alla neve, oltre che delle possibili infiltrazioni d'acqua. Va, dunque, curata sia l'impermeabilizzazione dei giunti tra i pannelli, sia la resistenza della struttura di sostegno e delle celle vetrate stesse.

È, infine, importante predisporre il sistema, già dalla fase di progettazione, ad una agevole manutenzione. Lo sporco o il malfunzionamento di collegamenti o scatole di giunzione può causare notevoli inefficienze dell'impianto, con conseguenti perdite di rendimento, affatto trascurabili.

### *3. Integrazione architettonica della tecnologia fotovoltaica*

#### *Integrazione su edifici esistenti*

Si definiscono interventi retrofit quelli in cui il sistema fotovoltaico è integrato nella struttura di un edificio esistente.

Sono interventi spesso complessi perché non sempre vengono soddisfatti tutti i requisiti che garantiscono un'ottima collocazione della superficie dell'impianto. Inoltre tali interventi spesso rendono difficile l'integrazione dell'impianto con la struttura dell'edificio esistente. In questo caso un possibile modo d'agire è rappresentato dall'impiego di telai autonomi da applicare all'edificio.



*Figura 3.2*

*Intervento retrofit a Bari prima e dopo il recupero*

*(Fonte: <http://www.domusweb.it/it/architettura/2011/02/18/forms-of-energy-9.html>)*

#### *Integrazione su nuovi edifici*

Gli interventi su nuovi edifici sono così definiti quando il sistema fotovoltaico è concepito già in fase di progettazione.

In questo caso è dunque possibile curare contemporaneamente gli aspetti impiantistici ed estetici del progetto, valorizzando al massimo l'ottimizzazione del sistema edificio-impianto.

Ciò rappresenta il caso ideale per il progettista, il quale avrà a disposizione molta libertà di manovra e potrà basare il proprio lavoro su caratteristiche specifiche, inerenti al luogo e alle condizioni ambientali.

*Integrazione su elementi di arredo urbano*

Questo tipo di integrazione si applica a elementi accessori del contesto urbano (ad esempio lampioni stradali, percorsi pedonali coperti, pensiline per il ricovero di biciclette, coperture di parcheggi etc.) proponendosi come ottima metodologia di riduzione del fabbisogno energetico della ordinaria amministrazione di una città.



*Figura 3.3*  
*Pensilina fotovoltaica a Roma*  
(Fonte: <http://www.archilovers.com/p66865/PENSILINE-FOTOVOLTAICHE-bike-sharing>)

**- Integrazione in copertura, in facciata, in elementi frangisole, in arredo urbano**

La conformazione e la flessibilità di adattamento del modulo fotovoltaico, grazie alla ormai grande variabilità delle sue caratteristiche geometriche e formali, estendono a dismisura i suoi campi di applicazione.

Le tipologie di integrazione possono essere perciò le più svariate, tanto da non poter essere racchiuse in un elenco davvero esaustivo. La tecnologia attuale e i suoi possibili sviluppi, anche a breve termine, fanno pensare che questo ipotetico elenco sia destinato a crescere nel tempo e che le possibilità di integrazione aumentino a vantaggio della validità estetica degli interventi e della loro convenienza ambientale e economica, e quindi anche della accettazione di tali sistemi da parte della società. Le tipologie d'integrazione prese in esame sono quindi solo alcune di quelle oggi più diffuse al mondo.

### 3. Integrazione architettonica della tecnologia fotovoltaica

#### *Integrazione in copertura*

Può variare a seconda che la copertura sia piana, inclinata o curva e che i moduli siano integrati o montati su strutture di sostegno.

Le principali integrazioni in copertura utilizzate sono:

#### *Integrazione a riseghe*

In questa tipologia i moduli, che diventano parte integrante della copertura, sono disposti a risega e inclinati in maniera ottimale rispetto ai raggi solari, garantendo un'alta efficienza energetica e un' ottimo sfruttamento della luce naturale che filtra all'interno.

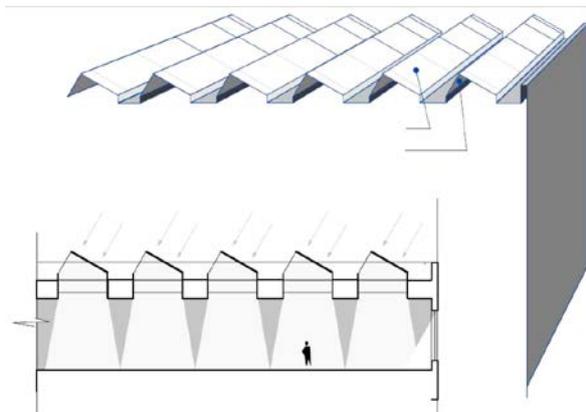


Figura 3.4: Esempio di copertura fotovoltaica a riseghe: municipal centre, Ludesch, Austria  
(Fonte: [http://www.energyprojects.at/details.php?lang\\_id=1&proj\\_id=20](http://www.energyprojects.at/details.php?lang_id=1&proj_id=20))

#### *Integrazione a stringhe*

Questa applicazione prevede che i moduli siano disposti lungo stringhe montate su strutture di supporto sopra la copertura, risultando in tal modo indipendenti da essa. Come nel caso precedente grazie all'inclinazione dei moduli si ottiene la massima efficienza energetica.

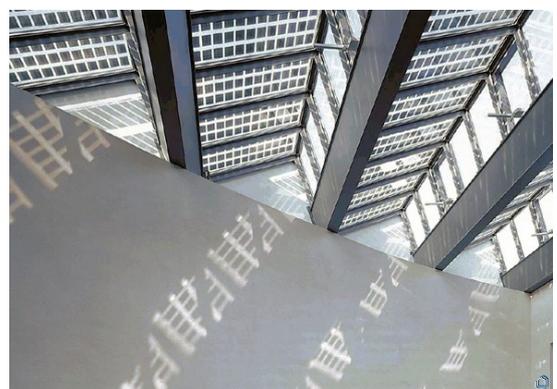
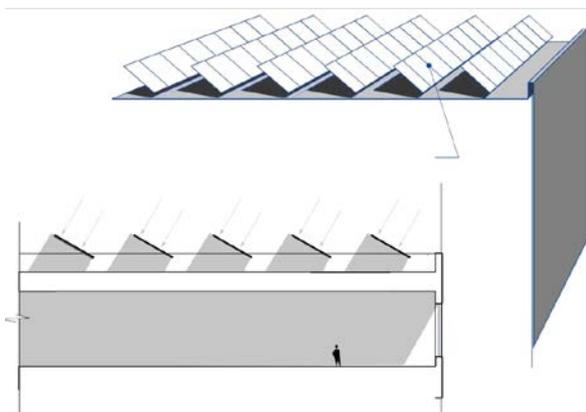


Figura 3.5: Esempio di copertura fotovoltaica a stringhe  
(Fonte: <http://www.solaris-energy.ie/solutions/photovoltaic>)

*Integrazione attraverso lucernai fotovoltaici*

Si tratta di una modalità di integrazione che prevede aperture indipendenti in copertura sulle quali vengono installati i pannelli in direzione orizzontale oppure inclinata. Nel caso di moduli inclinati si garantisce ovviamente una più alta efficienza energetica mentre in entrambi i casi si ha un ottimo sfruttamento della luce naturale che filtra all'interno.

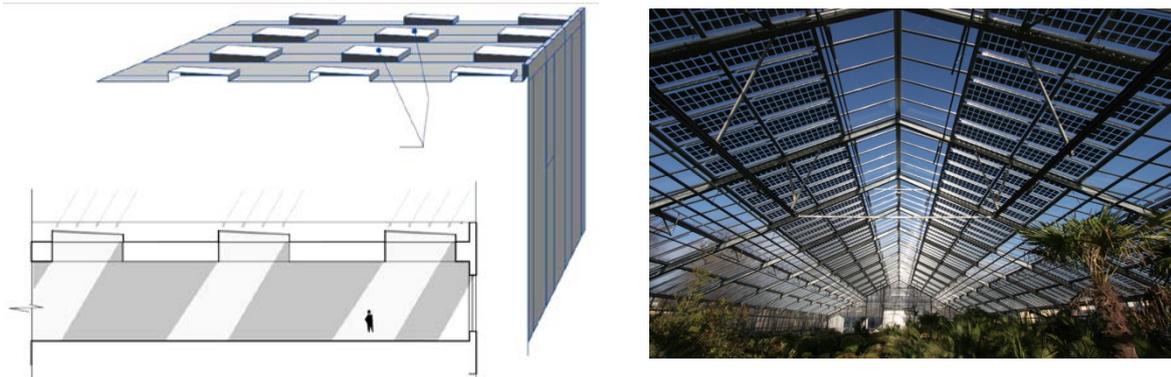


Figura 3.6: Esempio di lucernaio fotovoltaico: Palmerhouse, Monaco di Baviera  
(Fonte: <http://www.sapa-solar.com/italy/BIPV-progetti/palmenhaus-monaco.html>)

*Integrazione totale in copertura*

In questo sistema i pannelli sono integrati completamente nella copertura sia essa piana o inclinata, fungendo da elementi costruttivi e offrendo una buona resa energetica.

L'installazione comporta costi ridotti, in quanto i moduli possono sostituire integralmente gli elementi della copertura. Si possono però presentare problemi strutturali per eventuali sovraccarichi, come nel caso di abbondanti nevicate, o problemi di tenuta all'acqua.

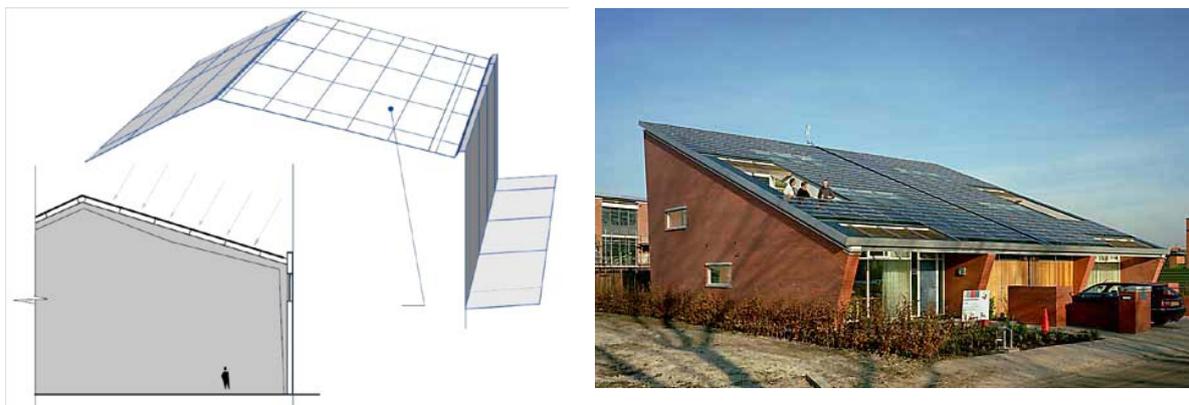
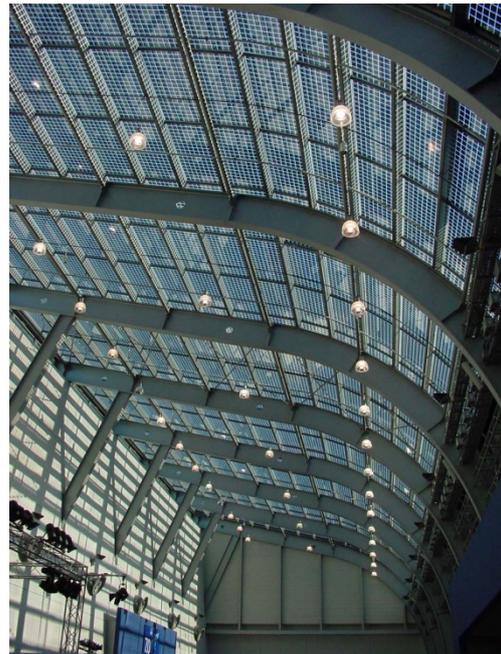
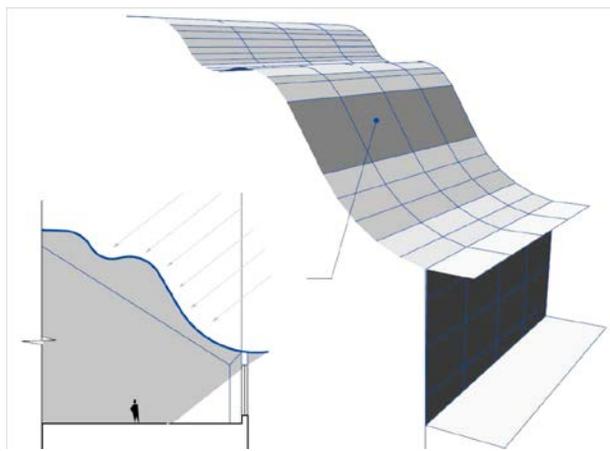


Figura 3.7  
Esempio di integrazione totale in copertura: energy house, Amersfoort  
(Fonte: [http://www.pvdatabase.org/projects\\_viewbest.php](http://www.pvdatabase.org/projects_viewbest.php))

### 3. Integrazione architettonica della tecnologia fotovoltaica

#### *Integrazione su copertura curva*

Questo sistema consiste nell'installare i moduli su un piano curvo che coincide con la copertura o con la facciata, o talvolta con entrambi, costituendo in tal modo un involucro globale. Tale configurazione, per via della forma, necessita di strutture portanti relativamente complesse e di particolari pannelli flessibili, comportando perciò costi piuttosto onerosi.



*Figura 3.8*

*Esempio di integrazione su copertura curva: Messe Essen, Germania*

*(Fonte: <http://www.abakus-solar.us/power-solutions/pv-architecture>)*

#### *Integrazione in facciata*

Questo tipo di integrazione varia a seconda che si intervenga su una facciata continua, non continua, inclinata o su elementi di affaccio nelle seguenti maniere:

##### *Integrazione con “curtain wall” verticali*

E' un intervento in cui i moduli fotovoltaici sono integrati su una facciata verticale attraverso un unico sistema strutturale. I pannelli, infatti, vengono impiegati come elementi costruttivi in sostituzione di quelli tradizionali, con la possibilità di alternare pannelli opachi e semitrasparenti a seconda delle esigenze di illuminazione interna. Questa tipologia risulta piuttosto diffusa e vantaggiosa in termini di risparmio economico.

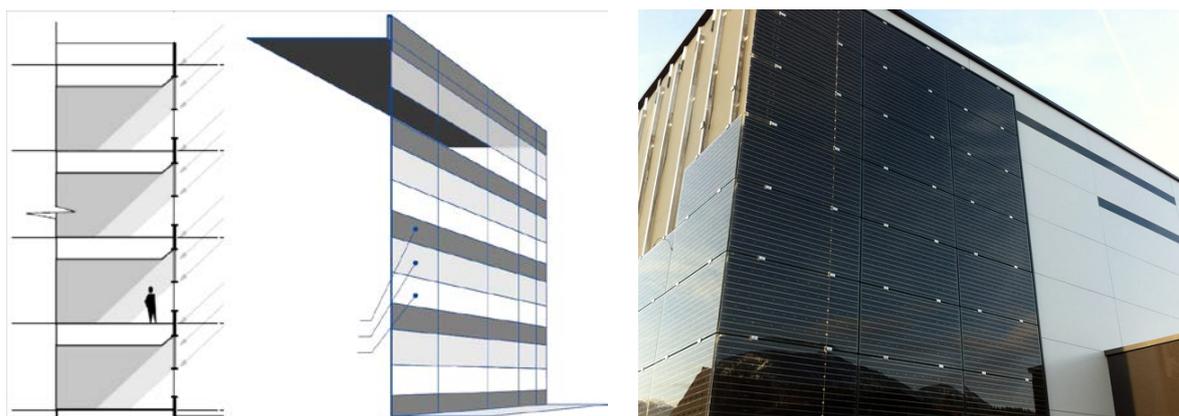


Figura 3.9: Esempio di integrazione in facciata verticale: Kirchbichl, Tirolo  
(Fonte: <http://www.pvp.co.at/it/BIPV-esempi2012.php>)

### *Integrazione con moduli a risega su facciata verticale*

In questo caso i pannelli sono integrati alla facciata attraverso una struttura di supporto esterna sagomata e inclinata rispetto al piano orizzontale per garantire un'esposizione ottimale e quindi un'alta efficienza energetica.

I moduli possono essere utilizzati sia come schermature opache, sia come finestre semitrasparenti, permettendo, inoltre, il controllo della luce solare in ingresso. Come nel caso precedente si hanno costi di progettazione e realizzazione piuttosto contenuti e un utilizzo sia in edifici ex-novo sia in edifici già realizzati.

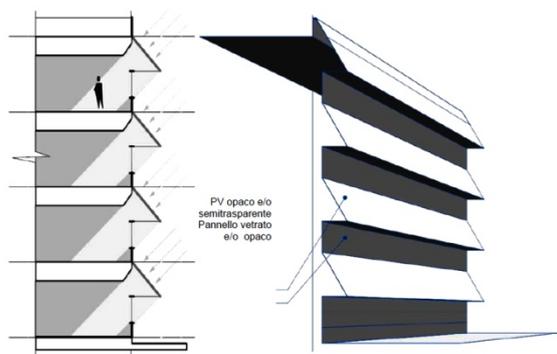


Figura 3.10: Esempio di moduli a risega in facciata: Kyocera Building, Tokyo



### *Integrazione con "curtain wall" inclinati*

Come nel primo esempio si tratta di un intervento in cui i moduli sono integrati su una facciata continua inclinata attraverso un unico sistema strutturale che consente la migliore esposizione ai raggi solari e di conseguenza la massima efficienza energetica. Anche in questo caso i pannelli possono essere disposti in modo da alternare fasce opache e semitrasparenti a seconda delle esigenze di illuminazione interna.

### 3. Integrazione architettonica della tecnologia fotovoltaica



Figura 3.11: Esempio di integrazione in facciata inclinata: Solar Office Doxford, Londra  
(Fonte: [http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/01-02/RE\\_info/solar1.htm](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/01-02/RE_info/solar1.htm))

#### *Integrazione attraverso vetrata strutturale*

Si tratta di una tipologia particolarmente vantaggiosa dal punto di vista economico, in quanto consente di realizzare facciate strutturali integrate con moduli fotovoltaici opachi e semitrasparenti per consentire il passaggio della luce naturale e quindi garantire l'illuminazione interna. Per contro, possono però presentarsi problemi a livello di giunzioni e sigillature tra i pannelli.

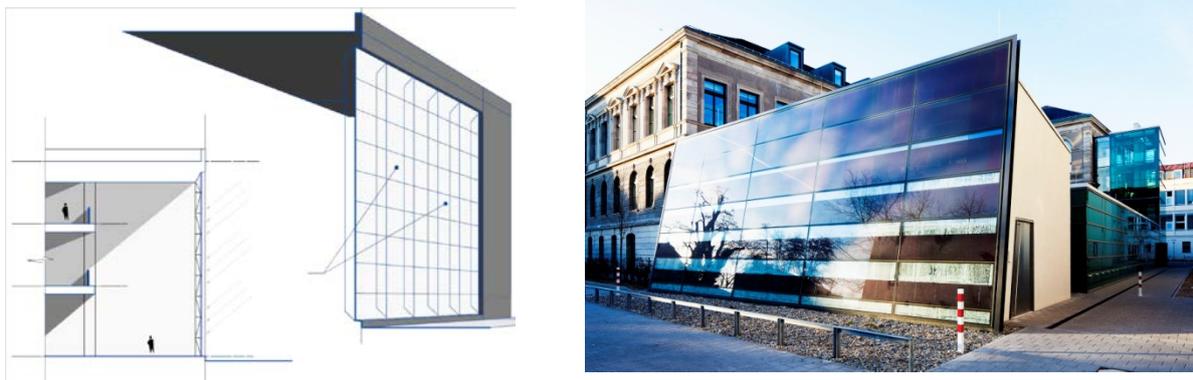


Figura 3.12: Esempio di integrazione in vetrata strutturale: Pathologie Centre, Erlangen  
(Fonte: <http://www.bba-online.de/Fachartikelansicht/33003199/Wuerdiger-Abschied.html>)

#### *Integrazione su elementi di affaccio*

Questa tipologia di integrazione sfrutta la presenza di elementi di affaccio quali ad esempio balconi per integrare i pannelli in direzione verticale o inclinata. Molto utile nel caso di applicazioni retrofit



Figura 3.13  
Esempio di parapetto  
fotovoltaico

### *Integrazione in elementi frangisole*

I moduli possono anche fungere da dispositivi di schermatura dai raggi del sole. La schermatura può essere totale o parziale nell'edificio e le soluzioni variano a seconda del tipo di sistema oscurante.

Le modalità principali sono le seguenti:

### *Integrazione con sistemi a scorrimento*

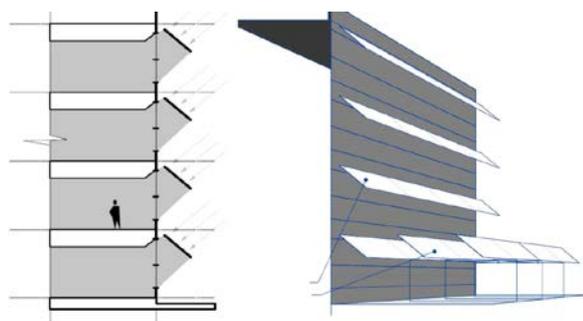
In questo tipo di integrazione i pannelli sono disposti a libro su binari in modo da poter scorrere lungo la facciata dell'edificio e all'occorrenza oscurare gli ambienti interni.



*Figura 3.14*  
*Integrazione in frangisole a scorrimento,*  
*Elementary school Hermagor, Austria*  
(Fonte:  
<http://www.architekten-ronacher.at/de/projects/hermagor-elementary-school>)

### *Integrazione con sistemi a ribalta*

In questo tipo di integrazione i pannelli sono installati su un telaio di supporto (“controfacciata”) esterno all'involucro edilizio realizzato in maniera tale da consentire l'inclinazione delle lamelle fotovoltaiche rispetto al piano orizzontale. In tal modo si garantisce un'esposizione ottimale dei moduli e quindi una loro migliore efficienza. Questa tipologia presenta costi di progettazione e realizzazione piuttosto contenuti, inoltre si presta ad un utilizzo sia in edifici ex-novo sia in edifici già realizzati.



*Figura 3.15*  
*Esempio di integrazione su frangisole a ribalta*

### *3. Integrazione architettonica della tecnologia fotovoltaica*

#### *Integrazione in elementi di arredo urbano*

In questo caso i moduli vengono integrati in elementi accessori del contesto urbano, rappresentando, come già detto sopra, una efficace alternativa all'integrazione sugli edifici circostanti, oltre che un metodo interessante per rendere autonomi certi servizi ai cittadini.

Le principali applicazioni sono le seguenti:

#### *Integrazione su corpi illuminanti*

Questo tipo di integrazione apre la strada all'illuminazione urbana con il fotovoltaico, di pregevole impatto visivo, assolutamente adatto per l'inserimento in contrasti architettonici e paesaggistici di pregio, oltre che negli stessi centri storici.



*Figura 3.16  
Integrazione su corpi illuminanti*



#### *Integrazione su pensiline e barriere*



*Figura 3.12  
Esempio di Integrazione in pensilina da parcheggio  
(Fonte: <http://www.greenme.it>)*



*Figura 3.18  
Esempio di Integrazione su barriera fonoassorbente nell'autostrada del Brennero  
(Fonte: <http://www.conceptbook.org>)*



---

## 4. Celle fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica

Nel capitolo precedente sono state mostrate le principali modalità di integrazione architettonica agli edifici del materiale fotovoltaico. Come si è potuto notare, le applicazioni sono molteplici e sempre in continuo sviluppo, in linea con le aspettative e le esigenze progettuali di architetti e ingegneri.

La novità rappresentata dal settore e il suo intrinseco successo hanno portato numerose aziende ad investire nella ricerca e sviluppo di nuove tecnologie solari, fin dal principio finalizzate alla integrazione totale delle celle fotovoltaiche nei materiali necessari alla costruzione degli edifici. Ciò ha portato a sviluppare le celle pensando direttamente alle esigenze di costruzione e generando, quindi, una notevole fioritura di brevetti innovativi e una varietà di prodotti vergini, tuttora in fase di commercializzazione.

Questo capitolo si propone di studiare nel dettaglio le principali tipologie di celle innovative già immesse nel mercato, o comunque in fase di commercializzazione entro pochi anni.

Lo studio delle principali celle fotovoltaiche innovative per applicazioni BIPV si divide in quattro principali categorie: celle a film sottile, celle polimeriche, celle a colorante, celle sferiche.

### - *Aspetti generali*

Prima di analizzare, una per una, queste nuove tecnologie, è necessario mostrare una veloce panoramica dei vari aspetti generali delle celle fotovoltaiche per integrazione edilizia.

*Aspetti energetici:*

Una caratteristica di ogni elemento fotovoltaico è la potenza. Questo valore, espresso in W (watt), esprime la quantità di energia in J (Joule) che viene consumata (o generata) ogni secondo. In termini elettrici, 1 Watt corrisponde alla potenza generata da 1 Ampere di corrente che scorre sotto l'influsso di un potenziale di 1 Volt (V):  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ A} \times 1 \text{ V}$

La potenza dei moduli fotovoltaici che viene misurata in condizioni standard (irraggiamento incidente  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura modulo  $25^\circ\text{C}$ ,  $1.5\text{AM}$ ) è espressa in Wp (watt di picco). Tipicamente, un modulo mono- o multicristallino ha una potenza di picco superiore a  $100 \text{ Wp/m}^2$ .

La quantità di energia elettrica che viene fornita (o comperata) dall'azienda di distribuzione viene invece misurata in kWh (kilowattora). Questa energia  $E=P*t$  è il prodotto di una potenza P (in kilowatt) e un tempo t (in ore), durante il quale la potenza viene erogata:

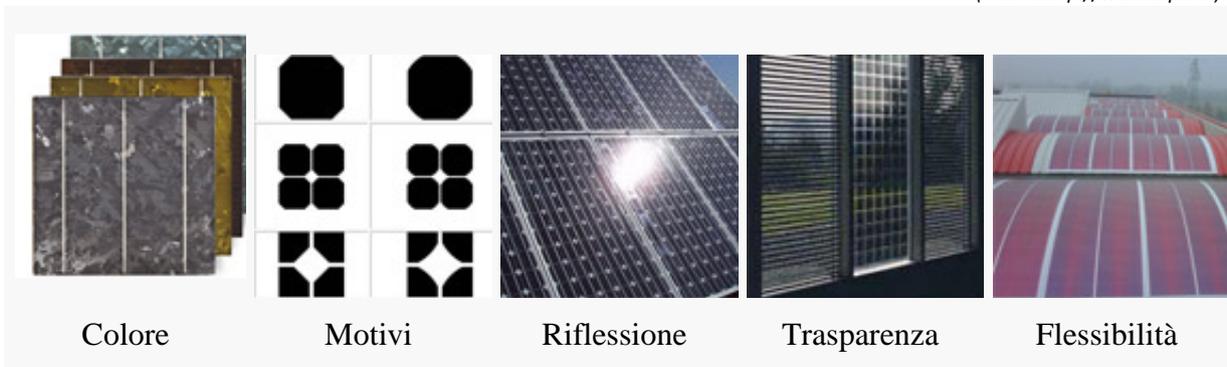
$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \times 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 1000 \text{ J/s} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \text{ MJ}$$

Il kWh viene usato per misurare l'energia attiva sia consumata che prodotta. Per dare un'idea di questa quantità di energia, si può dire che con 1 kWh si possono preparare 40 tazze di caffè con una macchina espresso automatica, lavare un bucato in lavatrice a  $60^\circ\text{C}$  oppure guardare la televisione per 12 ore.

*Aspetti visivi:*

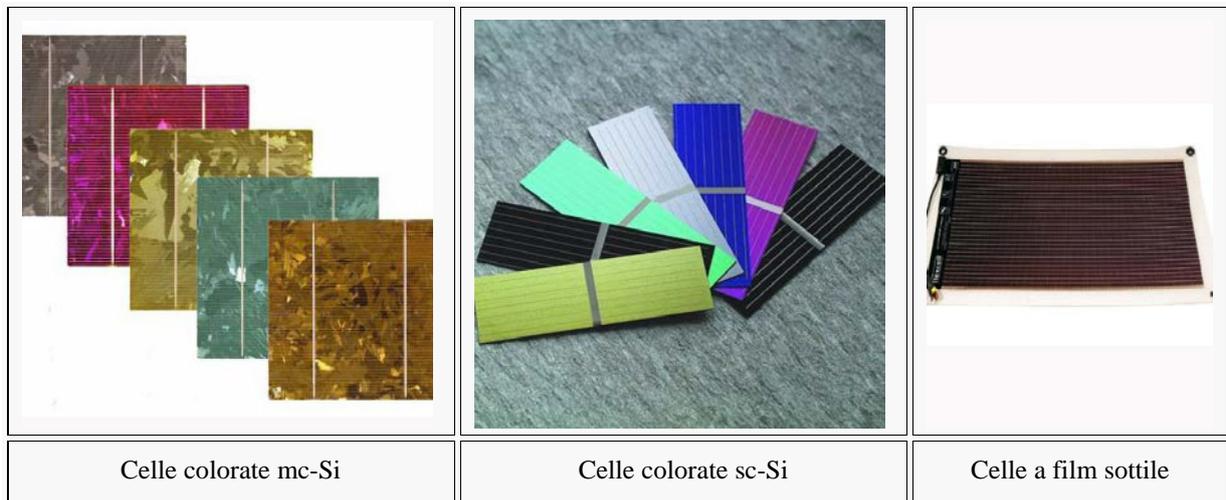
Esistono diversi tipi di moduli PV non solo a livello di tecnologia ma anche per quanto riguarda l'aspetto visivo. Possono variare il colore delle celle, dello sfondo (dove sono appoggiate le celle) e della cornice, la forma delle celle e del modulo, il tipo di griglie per i contatti elettrici, la riflessione ottica del modulo, la trasparenza e la flessibilità.

(Fonte: <http://www.bipv.ch>)



*Colore*

In generale il colore blu delle celle mono- e multicristalline risulta dal rivestimento antiriflettente comunemente usato, ma la scelta dei possibili colori è più ampia. Sul mercato sono infatti già presenti celle di colore grigio, giallo, rosso, verde, argento e rosa.



*Figura 4.1*  
*Esempi di celle fotovoltaiche colorate. (Fonte: <http://www.bipv.ch>)*

Malgrado il fatto che le celle colorate producano meno (il blu “standard” corrisponde a un’ottimizzazione della captazione dell’irraggiamento solare), l’estetica può essere un fattore più importante rispetto alla potenza, se la superficie a disposizione è abbastanza vasta per coprire le esigenze.

Esempio sul rendimento delle celle colorate disponibili sul mercato, confrontate con celle blu:

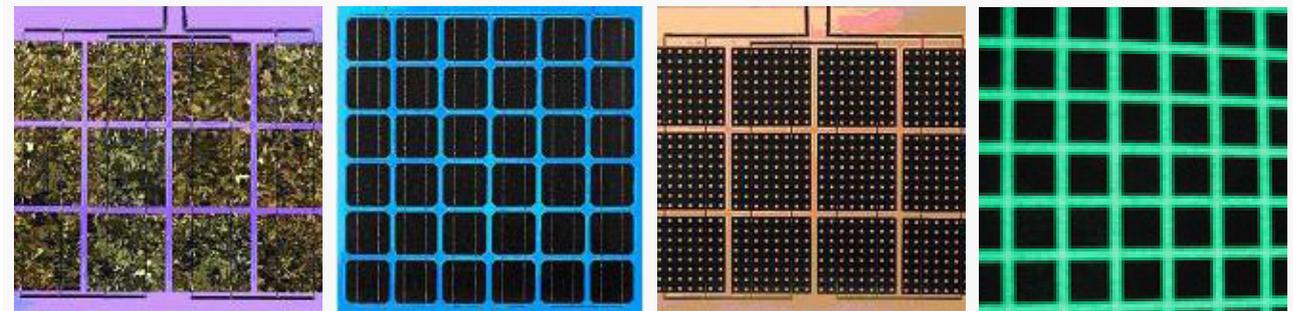
*(Fonte: <http://www.bipv.ch>)*

Colore	Celle multicristalline (mc-Si)	Celle monocristalline (sc-Si)
Blu	100%	100%
Grigia	73-80%	84%
Rossa	77-80%	n.d.
Marrone	81-90%	87%
Giallo	83-93%	81%
Verde	86-98%	n.d.
Magenta	n.d.	78%

Nei moduli tradizionali lo sfondo è solitamente bianco o nero. È possibile però cambiare il colore variando quello del materiale incapsulante, (normalmente EVA oppure PolyVinyl Butyral - PVB).

L'uso del vetro nei moduli fotovoltaici permette di cambiare il colore, le caratteristiche e fare disegni serigrafati. Lo sfondo può essere anche trasparente. In questo modo i moduli possono essere usati nella costruzione come materiale semitrasparente.

Figura 4.2 Esempi di alcuni prodotti offerti da diverse industrie. (Fonte: <http://www.bipv.ch>)



### Motivi

Le celle possono avere forme e dimensioni diverse. Le celle c-Si standard misurano normalmente 12.5x12.5cm. Le dimensioni dei moduli invece non sono standardizzate. Esistono inoltre più varianti di griglie per i contatti elettrici che possono dare un aspetto diverso ai moduli.

Figura 4.3 Forma delle celle e motivo prodotto dal loro assemblaggio. (Fonte: <http://www.bipv.ch>)

1: forma delle celle; 2: motivo prodotto dall'assemblaggio di celle 3: zoom sugli spazi tra celle

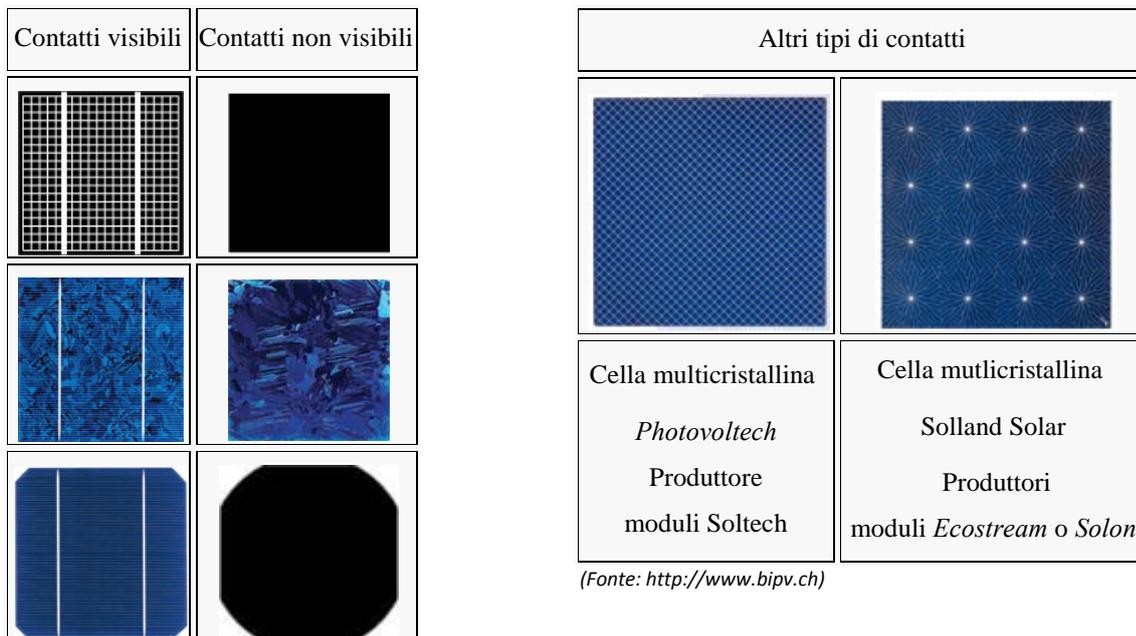
	Quadrata	Angoli troncati	Angoli arrotondati	Rotonda
1				
2				
3				

#### 4. Celle fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica

Le dimensioni delle celle più comuni sono: 10x10, 12.5x12.5, 15x15cm. Invece la separazione fra di esse, dal punto di vista del rendimento energetico, deve essere minima, anche se per ragioni di estetica o di integrazione nell'edificio si può scegliere una separazione maggiore.

Per quanto riguarda le dimensioni dei moduli, inizialmente erano concepiti per essere collegati ad una batteria ed avevano le tipiche dimensioni di circa 1.5x0.6x0.04m (4x9celle 12V). Oggi le dimensioni dei moduli non sono più standard, con tutti i vantaggi in termini di flessibilità d'uso che questo comporta.

Per quanto riguarda griglie (contatti) per la messa in serie delle celle, questi possono essere:  
*Visibili*: le bande di rame galvanizzate necessarie per raccogliere e condurre la corrente sono visibili sulla parte anteriore del modulo. Questi moduli presentano una struttura non uniforme.  
*Non visibili*: il contatto metallico si trova sulla superficie posteriore. Questo design conferisce un aspetto uniforme ai moduli ed aumenta la superficie attiva della cella, quindi il suo rendimento.



Per quanto riguarda le celle fotovoltaiche più comuni, le misure sono 10x10cm, 12.5x12.5cm e 15x15cm. La forma più ricorrente è quadrata con smussatura sugli angoli, circolare. Lo spessore tipico è compreso tra 0.25 e 0.35mm e la potenza standard è di circa 1.5W.

### Riflessione ottica

La riflessione ottica del modulo cambia a dipendenza del materiale di protezione anteriore delle celle (vetro, plastica) o dell'eventuale trattamento del vetro. Per il produttore è molto importante minimizzare la riflessione ottica per catturare al massimo la radiazione solare.

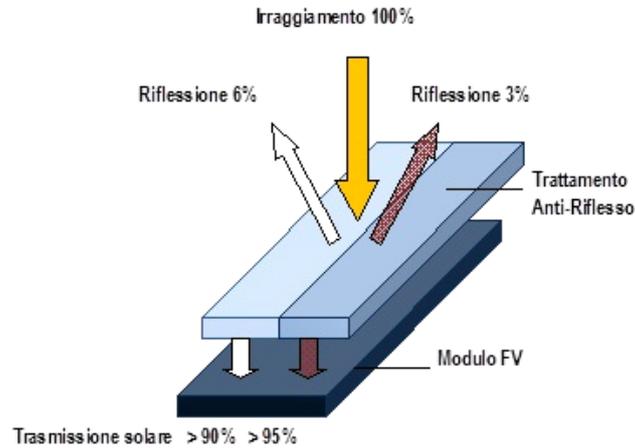


Figure 4. 4 - 4.5 I moduli riflettono la luce diversamente uno dall'altro. Alcuni di essi non riflettono l'immagine, altri invece riflettono la forma anche se non chiaramente visibile, altri ancora riflettono l'immagine come uno specchio. (Fonte: <http://www.bipv.ch>)



### Trasparenza

Quando il modulo fotovoltaico sostituisce un vetro, la semi-trasparenza è un fattore importante per il benessere interno, sia a livello di luce che di apporti termici. La semi-trasparenza della cella, ossia la quantità di luce che la oltrepassa, può essere compresa tra lo 0 e il 30% (standard: 20%), mentre l'efficienza diminuisce proporzionalmente.

Numero Celle	% Trasparenza	% Opacità	Potenza (Wp)
16	61%	39%	62
20	51%	49%	78
25	39%	61%	97
30	27%	73%	117
36	12%	88%	140

(Fonte: <http://www.bipv.ch>)

#### 4. Celle fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica

##### a) Moduli mono- e multi cristallini:

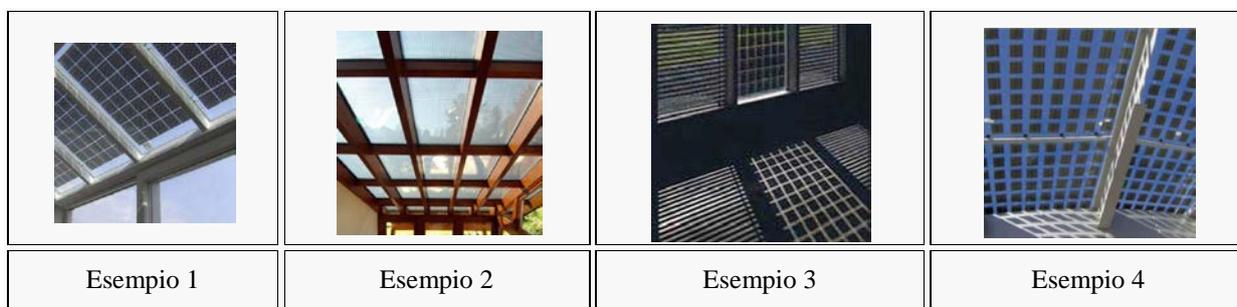
Il grado di trasparenza dei moduli è dato modificando la distanza tra le celle. Esistono inoltre delle celle ottimizzate che permettono di aumentare la trasparenza.

##### b) Moduli a film sottile:

La trasparenza dei moduli è determinata dall'assenza dello strato riflessivo posto sotto le celle oppure grazie ad un processo di incisione al laser che permette di creare l'effetto semi-trasparente. Così facendo, si ottiene un rivestimento con una trasparenza omogenea del tutto identica a quella ottenibile con un vetro colorato.

Figura 4.6 Alcuni esempi di vetrate fotovoltaiche di diversa fattura e trasparenza.

(Fonte: <http://www.bipv.ch>)



#### Flessibilità

Tranne i moduli tradizionali, esistono sul mercato anche diversi tipi di moduli che possono essere integrati nelle parti curve o flessibili della costruzione. Alcuni esempi sono presentati di seguito.

	La flessibilità dei moduli permette di ottenere una tenda da sole con doppia funzione; protezione dal sole e generazione di energia.
	Questi moduli cristallini curvi sono ottenuti attraverso un sofisticato ed esclusivo processo tecnologico brevettato. In questo modo la cella fotovoltaica in silicio mono o multicristallino aderisce perfettamente alla superficie in vetro curvato.
	L'infrastruttura in alluminio viene totalmente o parzialmente rivestita da moduli a film sottile. I fogli solari sono estremamente robusti e possono essere utilizzati per rivestire tetti con forme convesse e concave.

*Aspetti termici:*

Per alcuni sistemi di integrazione è importante conoscere le proprietà termiche dell'elemento fotovoltaico. Esse sono determinanti quando i moduli hanno funzionalità aggiuntive come l'isolamento termico o i controlli solari.

Ad esempio, una finestra con vetro semplice conduce relativamente bene il calore. La sua poca resistenza termica è visibile dalla condensazione di vapore acqueo sulla superficie. È dunque imperativo abbassare il coefficiente di trasmissione termica, prevedendo più vetri separati da spazi intermedi. Alcune ditte, per ovviare a questi problemi, forniscono moduli fotovoltaici inseriti in un sistema multi-vetro.

Il coefficiente di trasmissione termica "U" è il valore che determina le perdite di calore che si verificano attraverso un elemento costruttivo.

Esso *“esprime la quantità di calore che attraversa ogni secondo un metro quadrato di un elemento costruttivo per una differenza di temperatura di 1°C tra l'aria interna ed esterna.”*

Quanto più basso è questo valore, tanto più elevato è l'isolamento termico. I valori tipici variano tra 6W/m<sup>2</sup>K di una finestra a vetro semplice e 1W/m<sup>2</sup>K di una finestra a doppi vetri a bassa emissività.

Figura 4.7

*Esempi di valori di trasmittanza termica in funzione delle caratteristiche specifiche di costruzione di un modulo FV d'integrazione per coperture e facciate trasparenti. (Fonte: <http://www.bipv.ch>)*



## 4.1 Celle fotovoltaiche a film sottile

La principale caratteristica che rende queste celle estremamente competitive rispetto alle classiche in silicio mono o policristallino è la possibilità di ottenere una maggiore produzione a minor costo. Proprio per questo motivo già nel 2015 si stima che la tecnologia a film sottile rappresenterà il 35% del mercato del fotovoltaico nel mondo.

Considerando che per produrre moduli in silicio cristallino servono più di 24 passaggi e una grande quantità di spreco del materiale di partenza, si può comprendere come effettivamente la produzione di moduli a film sottile sia molto appetibile e conveniente, in quanto si compone della deposizione di tre materiali principali, che sono: una base che funge da elettrodo; un layer di semiconduttore; un conduttore trasparente che lasci passare radiazione. I principali vantaggi sono dunque: spreco di materiale quasi nullo, basso costo e alta velocità di produzione, peso ridotto, flessibilità per possibile integrazione architettonica.

### *Celle al silicio amorfo (a-Si)*

La tecnologia a film sottile basata su silicio amorfo offre una alternativa potente per ridurre il costo dei moduli solari tradizionali e ottenere al contempo prestazioni migliori in molte condizioni reali d'irraggiamento esterno.

Una lega di a-Si assorbe la luce più efficientemente del corrispettivo Si cristallino, per cui lo spessore della cella può essere ridotto tantissimo, ottenendo un film sottile e abbassando significativamente il costo e lo spreco dei materiali. Inoltre l'introduzione di celle a tripla giunzione (formate da tre strati con diverso band-gap), che rendono possibile l'assorbimento di radiazione per diverse lunghezze d'onda, permette un notevole aumento dell'efficienza, che si assesta intorno al 4-10% per modulo.

Questi accorgimenti, possibili solo in virtù di uno spessore minore del materiale, riescono a rendere più adattabile il comportamento della cella, facendolo risultare migliore in condizioni di luce reale.

Inoltre, le celle di a-Si a tripla giunzione vengono depositate su un substrato flessibile d'acciaio inossidabile tramite un processo di deposizione del vapore roll-to-roll condotto a basse temperature (semplicità e flessibilità d'impianto, cioè minori costi e maggior produttività).

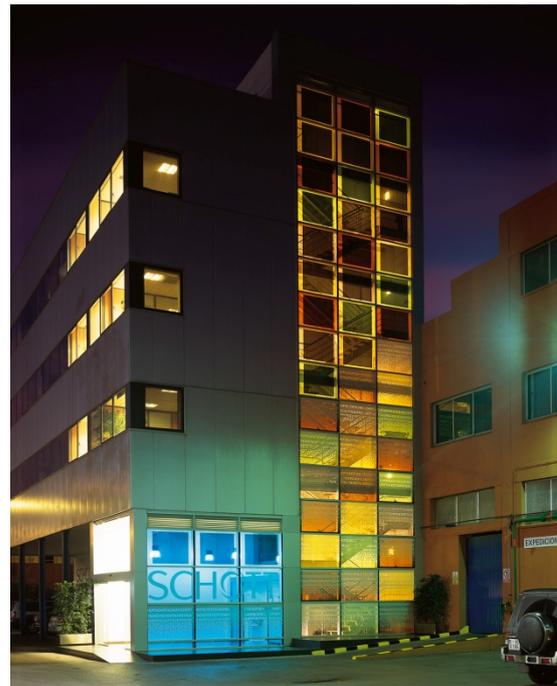
Infine sulla superficie di questo substrato fotovoltaico flessibile viene posto un livello riflettente in Al/ZnO (che serve per riflettere la luce non assorbita dalla cella), in maniera che si possa procedere con l'incapsulamento finale in polimeri stabili contro l'irradiazione UV.



Figura 4.8  
Impianto di produzione di celle a film sottile in silicio amorfo  
(Fonte: <http://www.uni-solar.com>)

Attraverso questo processo si ottiene dunque un materiale leggero e flessibile, pronto per svariate tipologie di applicazione diretta. Inoltre, test prolungati hanno dimostrato che in condizioni di utilizzo reale il degrado del materiale risulta dell'1% all'anno, in linea con le caratteristiche del materiale cristallino, ma queste celle hanno un minor coefficiente termico, che comporta ad ogni grado di temperatura un minor abbassamento del rendimento (-0,5 %/°C per il cristallino, -0,2%/°C per a-Si). Ciò dimostra come effettivamente, queste celle si comportino in maniera ottimale in condizioni reali di utilizzo dove la risposta all'innalzamento di temperatura conta tantissimo in quanto più alto rimane il rendimento, prima avverrà il ritorno economico d'investimento iniziale.

Bisogna comunque ricordare che già di partenza il silicio amorfo ha minor rendimento rispetto al mono e policristallino, ma può vantare una possibilità d'installazione maggiore e una produzione energetica più elevata con alte temperature.



*Figura 4.9*  
*Edificio con facciata in vetri colorati al silicio amorfo della Schott Iberica, Spagna;*  
*Vista giorno-notte*  
*(Fonte: <http://www.etsav.upc.edu/unitats/cisol>)*

### *Celle al CIGS*

Il diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS =  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ ) ha mostrato subito le proprie potenzialità applicative nel campo del fotovoltaico, dando luogo a celle a film sottile con efficienza superiore a quelle in silicio amorfo. I moduli costituiti da CIGS hanno infatti raggiunto efficienze del 9-13%.

Si può notare fin da subito che in termini di efficienza questi moduli non hanno nulla da invidiare a quelli composti da silicio cristallino, inoltre, poiché non ha luogo nessun processo intrinseco che porti ad una drastica diminuzione delle prestazioni di queste celle, le CIGS sono vendute con una garanzia di 25 anni di vita. Inoltre, al contrario delle celle in silicio cristallino queste ultime migliorano le proprie prestazioni col passare del tempo, durante le condizioni operative reali. La struttura del reticolo cristallino, infatti, viene rigenerata durante il funzionamento grazie alla presenza interna del rame.

Già da qualche anno diverse aziende producono celle CIGS attraverso stampaggio del semiconduttore sotto forma d'inchiostro, permettendo una produttività elevata ed un utilizzo del materiale ottimale, che evita gli sprechi. L'inchiostro al CIGS è costituito da una miscela omogenea di nano particelle, stabilizzate da una dispersione organica.

#### 4. Celle fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica

La cella solare complessiva è dunque costituita depositando un film di molibdeno (elettrodo) sul substrato d'alluminio, sul quale è successivamente depositato lo strato attivo d'inchiostro al CIGS, seguito da un film di ossido di zinco trasparente (controlettrodo).



Figure 4.10, 4.11

*Impianto di produzione di celle con inchiostro al CIGS* (Fonte: <http://www.nanosolar.com>)

La principale problematica per lo sviluppo su larga scala della produzione di questo tipo di cella è evidentemente vincolata alla rarità degli elementi costituenti. In particolar modo l'indio rappresenta uno dei metalli rari più scarsamente presenti sulla Terra e, sfortunatamente, è anche il materiale principale della tecnologia a display ultrapiatto, oltre ad essere in generale molto importante in qualsiasi produzione elettronica. Questa intrinseca rarità, aggiunta a lavorazioni davvero poco efficienti che giungono a sprecare l'85% del materiale d'inizio filiera, pongono un grande problema di costi. Inoltre la richiesta di indio dall'industria tecnologica aumenta del 40% all'anno; questo significa che, a dispetto delle sole 6000 tonnellate stimate su tutto il pianeta, ne sono consumate 400 all'anno. Ciò porta a considerare che tra nemmeno dieci anni l'unica strada di approvvigionamento di questo materiale sarà il riciclo.



Figura 4.12

*Pannelli in CIGS integrati nella facciata del Ferdinand-Braun Institute, Berlino*

(Fonte: [http:// http://www.solteature.com](http://http://www.solteature.com))

### *Celle al CdTe*

Le celle al Tellururo di Cadmio (CdTe) sono in grado di ottenere la stessa efficienza di modulo delle celle basate su tecnologia cristallina, ma utilizzando l'1% del materiale necessario a queste ultime.

Il grande coefficiente d'assorbimento per la luce visibile di questo materiale rende possibile il suo utilizzo come film sottile. Nella cella reale, al sottile strato di CdTe, è aggiunto un livello di CdS che permette di produrre la giunzione da cui si origina il potenziale, vero motore del processo fotovoltaico.

Nonostante il maggior produttore a livello mondiale di questo tipo di celle flessibili sia l'americana First Solar, la tecnologia manifatturiera più avanzata risulta essere italiana e appartiene alla società Arendi. Il suo processo di produzione è, infatti, completamente originale, sviluppato a partire da ricerche condotte con università italiane, e si avvale di sei step principali, tutti completamente automatizzati.



*Figura 4.13*  
*Impianto di produzione di pannelli al CdTe*  
(Fonte: <http://www.firstsolar.com>)

In condizioni operative reali queste celle producono più elettricità rispetto ai moduli tradizionali, proprio in virtù del fatto che il CdTe assorbe l'energia della radiazione solare anche a bassa intensità e in condizioni di luce diffusa, potendo prostrarre un certo contributo anche nelle ore di alba e tramonto, o con cielo nuvoloso. Inoltre queste celle risentono meno dell'aumento della temperatura rispetto le cristalline, generando più elettricità nel caldo tipico dei mesi estivi.

Il principale problema che potrebbe sorgere in merito a queste celle può essere associato alla estrema tossicità del Cd non legato. In realtà durante la produzione dei moduli non vengono prodotte sostanze inquinanti e l'obbligo di riciclaggio al termine della vita utile, già pagato nel prezzo iniziale, pone una soluzione concreta al rischio di smaltimento illecito in ambiente, trattandosi inoltre di materiale maneggiato comunque da personale tecnico.

Sia il Cadmio che il Tellurio si trovano in maniera abbondante e verrebbero comunque prodotti dalle filiere dell'estrazione di rame e zinco, dunque il loro legame per la produzione di moduli fotovoltaici presenta più che un problema ambientale, una vera e propria soluzione. Inoltre lo studio dei moduli operativi ha dimostrato che non vi è rilascio di Cadmio in atmosfera durante l'utilizzo, in quanto il CdTe è un composto stabile, insolubile e non volatile, e si può toccare tranquillamente senza ottenere alcun rilascio. Diverso sarebbe il caso in cui un modulo si rompesse in acqua o in atmosfera, ma è stato provato che infrangendo un pannello e lasciandolo in acqua o in terra per diversi mesi la quantità di Cadmio rilasciato non supera le quantità consentite da legge (l'acqua è rimasta potabile).

L'unico caso preoccupante, che è stato opportunamente studiato, è quello di incendi molto gravi, in quanto il CdTe fonde al di sopra dei 1000°C, difficilmente raggiungibili in casistiche domestiche. Ma anche in questo caso si è visto che il Cadmio non verrebbe rilasciato in atmosfera, in quanto il vetro incapsulante le celle fonderebbe molto prima e ingloberebbe la sostanza nociva, evitandone la fuoriuscita. Infine numerosi studi dimostrano che, a parità di GWh prodotti, il rilascio di Cadmio in ambiente è comunque nettamente maggiore per le classiche fonti non rinnovabili riconducibili ai combustibili fossili.



*Figura 4.14*  
*Pannelli in CdTe integrati a Flemington, Australia*  
(Fonte: <http://www.firstsolar.com>)

La seguente tabella riassume le principali prestazioni delle varie tecnologie a film sottile, comparate con le classiche cristalline.

<i>Tecnologia fotovoltaica</i>	<i>Efficienza modulo [%]</i>	<i>Potenza per m2 di moduli PV [Wp]</i>	<i>Spazio necessario per 1kWp [m2]</i>
sc-Si	14-19	140-190	5.5-7
mc-Si	12-17	120-170	6-9
a-Si	4-10	40-100	10-25
CIS, CIGS	9-13	90-130	7-12
CdTe	17	170	9-10

(Fonte: <http://www.bipv.ch>)

## 4.2 Celle fotovoltaiche polimeriche

Queste celle dalle grandi potenzialità hanno caratteristiche costruttive differenti rispetto le celle inorganiche in silicio, poiché si basano sull'utilizzo di polimeri fotoattivi con caratteristiche chimico-fisiche del tutto specifiche. Infatti, in una classica cella inorganica vi sono modeste forze elettriche a legare le coppie elettrone-buca, che pertanto riescono facilmente a rimanere divise e produrre il passaggio di carica desiderato. Nei polimeri semiconduttori organici, invece, una volta che il fotone ha generato una suddivisione di cariche positive e negative, queste ultime si trovano sottoposte a forze notevolmente maggiori e tendono a ristabilire l'equilibrio, annullandosi vicendevolmente, impedendo quel passaggio di carica che genera appunto la corrente elettrica. Inoltre, la tipica struttura amorfa dei materiali organici rende ancor più difficoltoso il passaggio di quelle poche cariche sopravvissute alla ricombinazione.

Per poter sfruttare questi materiali si è dunque dovuta studiare una maniera efficace per rendere stabile la suddivisione e il passaggio di carica. La soluzione consiste nell'utilizzare materiale organico bistrato, formato da un donatore (polimero) e da un accettore (fullerene), posto tra due elettrodi differenti che generino la differenza di potenziale necessaria al passaggio di cariche. Gli elettrodi sono appunto differenti: quello superiore è trasparente

(ossido di indio e stagno ITO che si sta però cercando di sostituire con altri materiali meno rari e costosi) e quello inferiore ben applicabile su substrati flessibili (Al, Ca, Mg).

Dunque il materiale organico è utilizzato solo per la generazione di elettroni. In pratica i fotoni incidenti eccitano il materiale donatore, il quale riuscirà a diffondere gli elettroni generati al materiale accettore prima che avvenga la ricombinazione (meccanismo molto efficiente, dell'ordine dei femtosecondi). Il passaggio di carica è poi garantito dagli elettrodi.

Il fattore limitante di questo concetto è che per realizzare il pieno assorbimento della luce incidente, lo spessore del materiale assorbente di 100 nm è molto più grande dei tipici 10 nm corrispondenti alla distanza di diffusione delle coppie elettrone-buca, che in questo modo si neutralizzano a vicenda in grande quantità. Quest'ultimo problema è stato risolto introducendo il concetto di cella ad eterogiunzione di tipo bulk (BHJ). In pratica la giunzione fra materiale organico donatore e accettore viene distribuita, non più planarmente, ma spazialmente in tre dimensioni. I due materiali si compenetrano, aumentando notevolmente la superficie di scambio. Grazie a questi accorgimenti si sono potute generare celle fotovoltaiche plastiche con rendimenti del 5%.

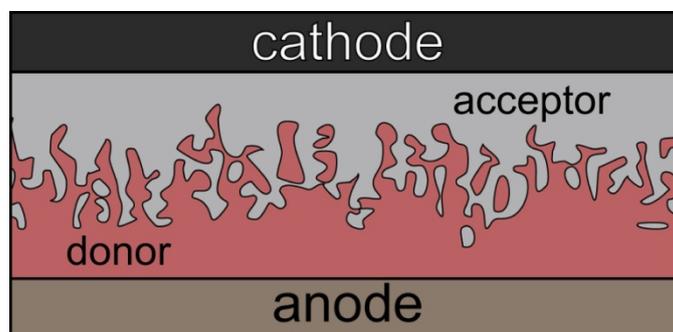


Figura 4.15  
struttura di una cella polimerica ad eterogiunzione di tipo bulk  
(Fonte: [www.spie.org/x84765.xml](http://www.spie.org/x84765.xml))

L'utilizzo di questi materiali estremamente economici e facilmente assemblabili su substrati flessibili porta ad una potenziale produzione in continuo attraverso semplici tecnologie di stampaggio a getto d'inchiostro, attraverso le quali si può facilmente gestire anche l'aspetto estetico delle celle prodotte. Questo significa ottenere produzioni elevate a prezzi modesti e utilizzare tecnologie già esistenti e ben ottimizzate. Bisogna però sottolineare che le celle plastiche presentano ancora notevoli problemi di durata di vita, ben lontana dalla garanzia di 25 anni del silicio tradizionale.

#### *4. Celle fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica*

L'azienda Konarka ha introdotto da tempo l'utilizzo di stampanti a getto d'inchiostro per la produzione di questo tipo di celle ed ha brevettato nel 2006 la "power plastic", poi utilizzata dall'aeronautica americana per produrre caricatori portatili per tende da campeggio.

Altri recenti utilizzi sono l'applicazione in tendoni da ombreggiamento (SkyShades negli USA), in vele solari per il campo nautico sportivo (Progetto SIEP, finanziato dalla regione Toscana) e, soprattutto, nell'integrazione architettonica attraverso la produzione di tende solari da applicare alle finestre.



*Figura 4.16  
Tende fotovoltaiche in Power Plastic in alcuni uffici a Tamarac, Florida  
(fonte: [www.archithings.com](http://www.archithings.com))*

### **4.3 Celle fotovoltaiche a colorante**

Le celle fotovoltaiche a colorante sono state studiate a lungo, a partire dalla principale applicazione esistente in natura, ovvero la clorofilla vegetale. Naturalmente il tentativo di utilizzare questo tipo di colorante o altri composti organici hanno portato a scarsissimi risultati d'efficienza, in quanto in natura ciò che conta non è ne la durata del materiale (le foglie sono attive per una sola stagione), ne l'efficienza, ma una buona risposta di adattabilità a qualsiasi livello di luce solare. Perciò solo nel 1991 alcuni studi condotti all'università di Losanna in Svizzera dai ricercatori O'Regan e Grätzel hanno portato alla produzione di una cella a colorante che avesse una efficienza molto significativa, che arrivava al 7%.

I due studiosi scoprirono una nanotecnologia che permettesse di utilizzare come semiconduttore, non un semplice cristallo di ossido di titanio ( $\text{TiO}_2$ ), ma una spugna di nanoparticelle dello stesso materiale, ricoperte da uno strato esterno di pigmento sensibilizzante, unendo così le ricerche sui coloranti organici a quelle sui semiconduttori inorganici.

Il funzionamento di una cella solare nanocristallina a colorante sensibilizzato (Dye-sensitized Solar Cells = DSC) è molto diverso rispetto a quello della tecnologia inorganica al silicio. Infatti, al contrario dei sistemi tradizionali, in cui il semiconduttore svolge la duplice funzione di assorbitore di luce e portatore di carica, nelle DSC il colorante assorbe la luce e successivamente il film mesoporoso di titania ( $\text{TiO}_2$ ) svolge la funzione di trasportatore d'elettroni, mettendo questi ultimi in contatto con l'elettrodo. Come precedentemente spiegato per le celle polimeriche, anche in questo caso uno dei principali problemi è proprio la ricombinazione del colorante ossidato, che tornerebbe velocemente allo stato iniziale, producendo soltanto dissipazione. La soluzione a questo inconveniente si ottiene grazie all'utilizzo di coloranti adatti (principalmente strutture complesse a base di rutenio) che massimizzano il passaggio di carica a scapito della ricombinazione elettronica. Inoltre, l'utilizzo di questi coloranti sensibilizzatori porta la cella ad ampliare notevolmente la propria risposta spettrale rispetto al solo utilizzo del semiconduttore puro di titania.

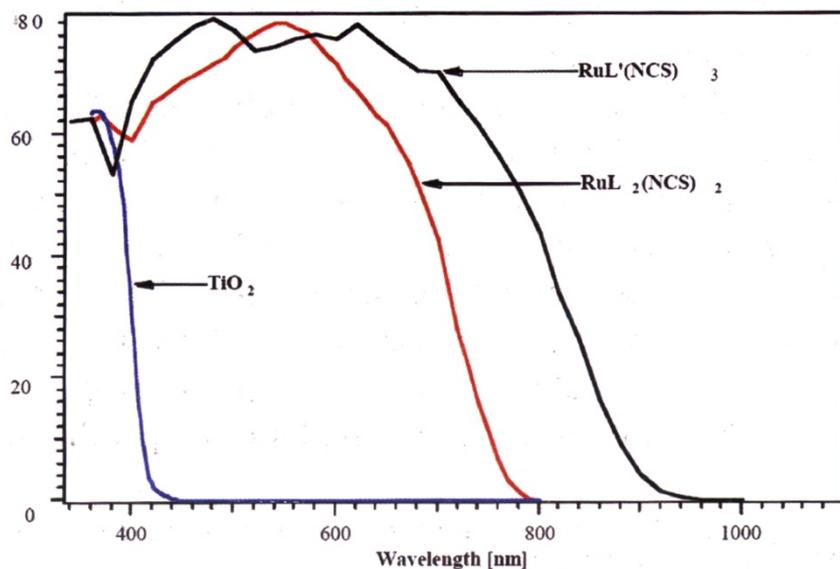


Figura 4.17

Efficienza di conversione dei fotoni incidenti in corrente elettrica ottenuta come risposta al  $\text{TiO}_2$  puro e sensibilizzato tramite  $\text{cis-RuL}_2(\text{NCS})_2$  e  $\text{RuL}'(\text{NCS})_3$

(fonte: Nakade S. et al., Influence of measurement conditions on electron diffusion in nanoporous  $\text{TiO}_2$  films)

#### 4. Celle fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica

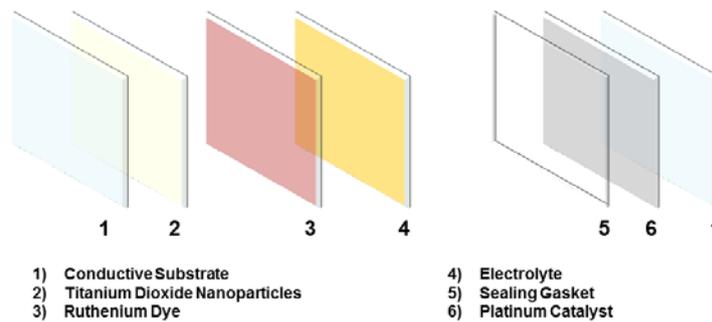


Figura 4.18

Struttura e composizione di una cella DSC

(fonte: [www.dyesol.com](http://www.dyesol.com))

Come s'è visto queste celle presentano notevoli vantaggi, infatti sono composte da materiali facilmente reperibili e poco costosi; possono essere applicate sia su substrati vetrosi che flessibili con tecnologie semplici e già esistenti e possono aumentare la propria efficienza in condizione di luce diffusa e in caso di alte temperature, grazie alla sensibilità all'infrarosso che le caratterizza. Inoltre le celle DSC, a differenza di quelle al silicio, non vedono la propria efficienza ridotta da impurezze presenti nei materiali impiegati, proprio per il fatto che sia l'assorbimento di luce, sia la separazione di carica, hanno luogo in prossimità della superficie di due materiali differenti (colorante ed elettrolita). L'unica problematica che potrebbe presentarsi è la possibile fuoriuscita di liquido sensibilizzante o la sua evaporazione, con conseguente riduzione d'efficienza. Si sono comunque studiate apposite progettazioni di celle e moduli che escludono questo inconveniente. Infine anche la durezza è ben più elevata delle celle polimeriche, raggiungendo tranquillamente i dieci anni di vita in climi sfavorevoli e addirittura quindici per i climi più freddi.

Le grandi possibilità che presenta questo tipo di cella portano la tecnologia solare a colorante ad essere quella con più grandi aspettative e potenzialità del prossimo futuro. Già nel 2015 alcune aziende come l'israeliana 3GSolar, commercializzeranno alcuni prodotti come vetri colorati per progetti BIPV. In particolare, l'indifferenza sul rendimento delle varie possibili cromie di vetro incapsulante, lo stampaggio personalizzabile, il basso costo e la possibilità di ottenere anche celle semitrasparenti, rendono la tecnologia particolarmente appetibile proprio per il settore dell'integrazione architettonica. Sicuramente le caratteristiche uniche di queste celle ampliano il panorama di utilizzo della tecnologia fotovoltaica anche per climi caldi, dove tutte le altre produzioni avrebbero problemi di efficienza ridotta e rappresenterebbero un investimento sconveniente.



Figura 4.19  
Render della vetrata in  
celle DSC dello Swiss  
Tech Convention  
Centre in costruzione  
a Losanna  
(fonte: <http://www.tstcc.ch>)



Figura 4.20  
Vetrata in celle DSC in costruzione presso lo  
Swiss Tech Convention Centre di Losanna  
(fonte: <http://www.tstcc.ch>)

#### 4.4 Celle fotovoltaiche sferiche

L'ideazione di celle fotovoltaiche sferiche è una idea originale dell'imprenditore e scienziato giapponese J. Nakata, il quale, fondando una società apposita, decise di sviluppare interamente gli studi e il processo di produzione di questa tecnologia.

Alla base dell'idea sta l'importanza del considerare che la luce solare impatta le celle su diverse inclinazioni in tutto l'arco della giornata e non riesce, perciò, ad essere completamente assorbita in maniera continua da strutture piatte. Da qui il progetto di generare celle in silicio cristallino di forma sferica, che potessero aumentare l'efficienza grazie all'importante contributo dei maggiori raggi diretti intercettati e della radiazione riflessa dalle altre celle sferiche che sarebbero state poste l'una affianco dell'altra.

La fase di sperimentazione iniziò con il provare a produrre sfere di silicio fuso, utilizzando un tunnel con condizioni localizzate di assenza di gravità e cercando, in un secondo momento, di far cristallizzare il materiale durante la caduta. Il passo successivo è stato quello di generare la giunzione PN attraverso tecniche specifiche della filiera della microelettronica.

#### 4. Celle fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica

Nel 2004 le prove sperimentali ottengono ottimi risultati e la società Kyosemi registra il prodotto sotto il nome di Sphelar, le prime celle solari sferiche al silicio cristallino.

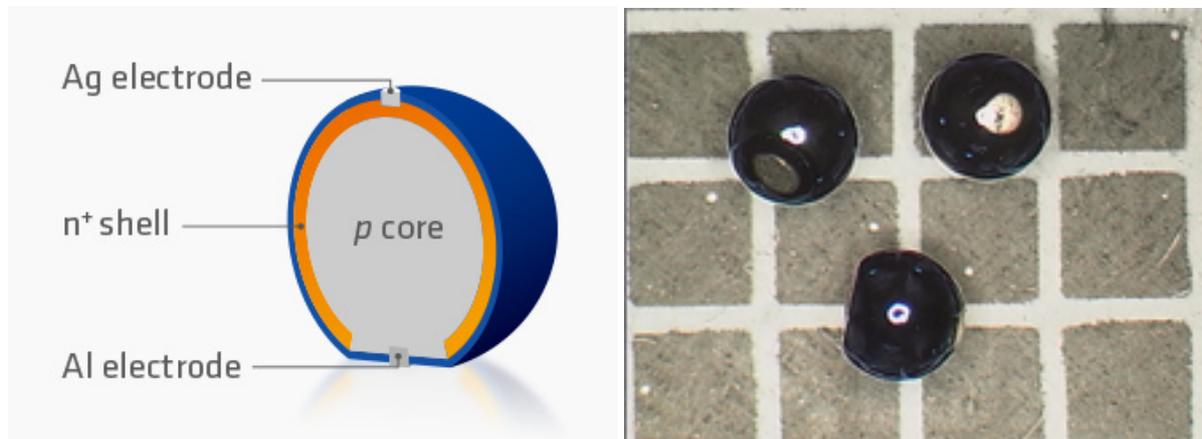


Figura 4.21

Struttura e aspetto di una cella fotovoltaica sferica in silicio cristallino

(Fonte: <http://sphelarpower.com>)

Uno dei principali vantaggi nel processo di generazione di queste celle è l'utilizzo di materiale di scarto ad inizio filiera, in quanto servono piccole quantità di silicio per produrre numerose celle sferiche di adeguata grandezza. Inoltre, come precedentemente riportato, la forma sferica promuove la cattura dei raggi solari aumentando l'efficienza rispetto alle tradizionali celle piatte, avendo un migliore comportamento in condizioni reali d'irraggiamento ed essendo meno dipendente dall'angolazione del Sole durante tutto l'arco della giornata.

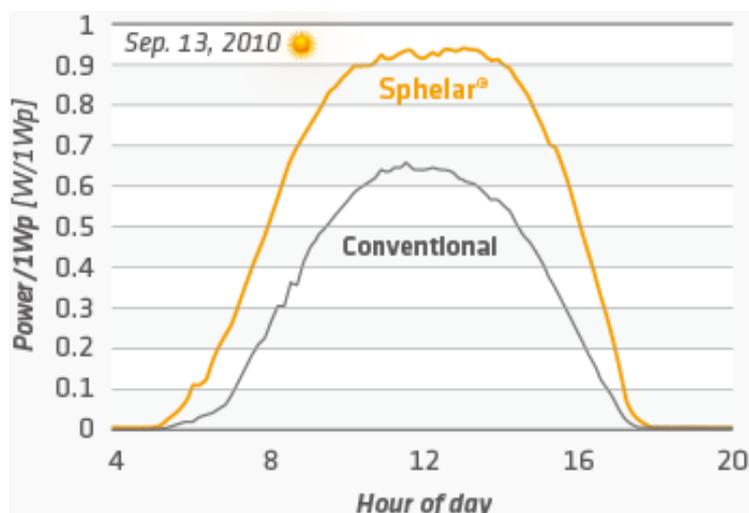


Figura 4.22

Confronto della potenza prodotta per 1Wp installato durante l'arco di una giornata per celle sferiche e celle piatte al silicio cristallino

(Fonte: <http://sphelarpower.com>)

Inoltre, la grande modularità di queste piccole celle sferiche presenta la possibilità di generare pattern flessibili, applicabili in diversi campi, tra i quali la creazione di facciate vetrate fotovoltaiche o la produzione di pelli plastiche, adatte all'integrazione su superfici curvilinee e su altro genere di supporto, come dimostra la recente applicazione su struttura tessile. Le potenziali applicazioni sono dunque numerose e appartengono a diversi settori di mercato. Si possono, infatti, già trovare in commercio oggetti di design ai quali sono stati applicati pattern generati dall'assemblaggio di celle a forma sferica e, in tempi brevi, saranno utilizzati i primi materiali per la costruzione di facciate vetrate fotovoltaiche integrate agli edifici.



*Figura 4.23*  
*Render di una futura integrazione delle celle sferiche nella produzione di vetrate fotovoltaiche per BIPV*  
*(Fonte: <http://sphelpower.com>)*



*Figura 4.24*  
*Prototipo di substrato flessibile composto da celle solari sferiche*  
*(Fonte: <http://sphelpower.com>)*



---

## 5. Conclusioni

Attualmente, il mercato del fotovoltaico integrato negli edifici (BIPV) rappresenta meno del 5% del mercato fotovoltaico globale (dominato, in termini di energia, dai grandi parchi da 1 MW o più), ma si ritiene che il giro d'affari del BIPV possa superare i 5 miliardi di euro entro il 2015. Le potenzialità di sviluppo di questo mercato sono in prospettiva notevoli, considerata l'enorme superficie complessiva sfruttabile ed il fatto che nei Paesi industrializzati gli edifici incidono fino al 40% sul consumo totale di energia (elettrica e termica) e per il 70% su quello di elettricità, mentre perdono il 34% di tale energia a causa della scarsa efficienza degli impianti stessi. Poiché le fonti di energia tradizionali (combustibili fossili, nucleare, etc.) potranno coprire solo in parte i fabbisogni dei prossimi anni, causando un aumento notevole dei costi dell'energia elettrica, è facile prevedere una diffusione sempre più ampia del BIPV. Ciò accadrà soprattutto in paesi come l'Italia, in cui gli incentivi statali favoriscono molto questo tipo di applicazioni energetiche, rendendole attraenti per i proprietari di edifici che, in questa maniera, hanno la possibilità di tagliare le spese della propria bolletta elettrica e guadagnare un profitto attraverso le tariffe previste dal Conto Energia.

Ma anche se non fossero previsti incentivi, grazie al fotovoltaico integrato si potrebbe ottenere un notevole risparmio, soprattutto nei progetti di nuovi edifici, dove una facciata fotovoltaica in molti casi non costa più di una normale e il costruttore risparmierebbe sugli usuali materiali edilizi altrimenti utilizzati.

Un sistema BIPV integra, in qualche modo, dei pannelli fotovoltaici nella struttura esterna di un edificio, pertanto, fungendo simultaneamente da materiale di rivestimento e da generatore di energia, permette di risparmiare sia sui costi dei materiali sia su quelli dell'energia, oltre che di ridurre l'uso di combustibili fossili e di aggiungere interesse architettonico all'edificio.

Vi sono anche altri importanti vantaggi derivanti dall'integrazione del fotovoltaico negli edifici. I mezzi tradizionali per catturare energia solare sono sempre stati i pannelli fotovoltaici o i pannelli solari termici, entrambi utilizzati in modo semi-integrato come un'"aggiunta" che disturbava chiaramente l'armonia architettonica. Integrando il fotovoltaico su tetti o facciate di edifici, invece, non solo si possono creare strutture

architettonicamente attraenti e moderne, ma si evita, inoltre, di aggiungere sulla copertura, pesi non previsti, di praticare buchi per il montaggio dei pannelli e per il passaggio dei fili, di sottrarre spazio abitabile e di aumentare la vulnerabilità al vento. Infine, poiché i pannelli fotovoltaici, se integrati nell'edificio, non occupano spazio extra e non richiedono opere di ingegneria civile, non presentano restrizioni burocratiche dovute alla loro installazione e al loro utilizzo, neppure nelle aree urbane più popolate.

Per tutte queste ragioni, il fotovoltaico integrato costituirà nel prossimo futuro la via d'applicazione privilegiata della tecnologia solare fotovoltaica.

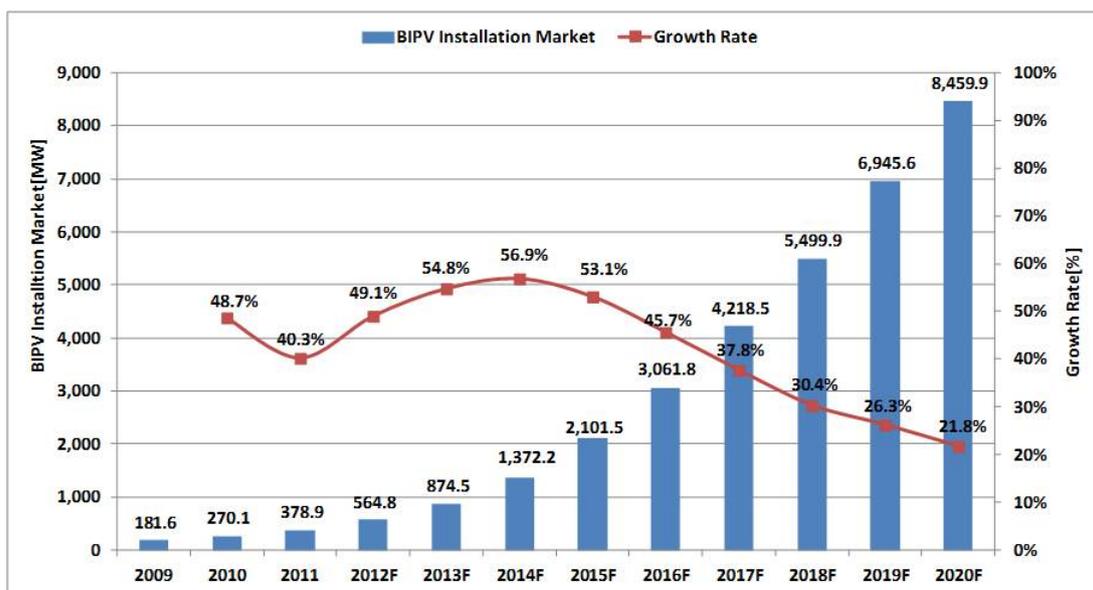
Ma, per comprendere appieno quali siano, nella pratica, le differenze di costo tra un impianto integrato ed uno tradizionale, bisogna effettuare alcune importanti premesse.

Per prima cosa risulta difficile dare numeri precisi. Considerata la varietà di prodotti ed il fatto che non si assiste ancora a una loro specifica produzione di massa, vi sono molte differenze di prezzo fra le varie aziende, anche su prodotti simili. Ad ogni modo, come ordine di grandezza: se il prezzo di un impianto non integrato "chiavi in mano" è di 4.000 euro al kW, quello di un impianto integrato nell'edificio attraverso materiali realizzati ad hoc (ad es. tegole, vetri, etc.) costa poco più del doppio, e cioè circa 10.000 €/kW, di cui circa 7.000-8.000 euro per i componenti fotovoltaici più il costo del vetro e dell'integrazione. Ma è davvero questo il prezzo effettivo del fotovoltaico integrato?

Spesso purtroppo quest'analisi grossolana viene considerata attendibile, ma in realtà sovrastima notevolmente il costo "reale" di un impianto integrato negli edifici.

L'analisi di quest'ultimo, infatti, deve tener conto di tre fattori fondamentali:

- Il risparmio dei materiali e della manodopera che si ha installando impianti fotovoltaici negli edifici in costruzione, in quanto, ad es. nell'utilizzo di una vetrata fotovoltaica non dovrebbero essere considerati i costi del vetro e della sua installazione, i quali si sarebbero comunque dovuti sostenere;
- Il valore dell'energia elettrica prodotta nel tempo dall'impianto fotovoltaico, che è calcolabile in modo preciso e viene ad accrescere in maniera corrispondente il valore dell'edificio, cui inoltre fa acquisire un'elevata classe nella certificazione energetica;
- Gli incentivi statali, che in Italia favoriscono, anche nel Nuovo Conto Energia, il fotovoltaico integrato (definito come "impianti integrati con caratteristiche innovative") rispetto a tutti gli altri impianti.



Prospettiva di crescita del mercato delle applicazioni BIPV

Fonte:

BIPV Technology e Market Forecast (2009 ~ 2020), 2 ° Version', Solar&Energy

[http://www.sneresearch.com/kor/service/report\\_show.php?id=776](http://www.sneresearch.com/kor/service/report_show.php?id=776)

Compresa dunque l'importanza che rappresenterà per il futuro del fotovoltaico il settore del BIPV, occorre ora definire quali delle tecnologie innovative, a breve disponibili, siano le più adatte e convenienti.

Attualmente le tecnologie fotovoltaiche più prestanti dal punto di vista del rapporto efficienza/prezzo sono in generale quelle del silicio mono e policristallino, ma per l'integrazione in un edificio, a seconda dei casi, la scelta non deve mai essere considerata così ovvia. Numerosi fattori, infatti, contribuiscono a modificare l'approccio e riconsiderare l'analisi puramente economica sotto la luce di diversi ulteriori aspetti.

Di notevole importanza sono la collocazione e l'orientamento dell'edificio, infatti, su una applicazione in facciata, i costosi moduli cristallini (su supporto opaco tradizionale o inglobati in vetri) possono essere preferibili ad altre soluzioni solo nel caso in cui l'edificio in questione abbia un'orientazione a sud (più o meno 45°). Se l'edificio non ha una direzione del genere, il loro impiego dovrebbe essere limitato al tetto, proprio perché il limite di queste tecnologie è rappresentato da un notevole calo di efficienza in condizioni di parziale ombreggiamento o di luce indiretta. La tecnologia a film sottile, invece, realizzata con celle al silicio o basate su altri materiali semiconduttori organici o inorganici, permette di massimizzare il rapporto efficienza/prezzo in numerose situazioni reali: è infatti ideale per sfruttare le grandi superfici, come le facciate ed i tetti commerciali e industriali, nonché per applicazione in climi caldi, dove le prestazioni del silicio cristallino decadrebbero assai rapidamente. I film sottili sono

inoltre maggiormente versatili, mantenendo buoni rendimenti anche in condizioni di luce diffusa e di parziale ombreggiamento, e rappresentano notevoli possibilità di adattamento di forma attraverso i substrati flessibili sui quali sono implementati.

Per il momento queste nuove tecnologie non possono beneficiare dei vantaggi di una economia di scala, risultando dunque più rare e costose, ma, dati gli indiscutibili vantaggi che possiedono per la maggior parte delle applicazioni BIPV e dato che si prevede quest'ultimo come il settore fotovoltaico di maggior sviluppo dei prossimi anni, saranno destinate a crescere esponenzialmente, di pari passo con la ricerca scientifica che ne aumenterà la durata e l'efficienza. Questa crescita sarà sostenuta anche dalle stesse case produttrici di pannelli a tecnologie classiche (silicio poli e monocristallino) in virtù del minor costo di produzione, della minor complessità d'impianto e del minor consumo di materia prima occorrente.

Technology Segment	Crystalline Silicon	Thin Film (Part 1)			Thin Film (Part 2)		
	Mono	Multi	a-Si	CdTe	CIGS	DSC	OPV
Record cell efficiency	22 % SunPower	20.3%	12% United Solar Ovonic	12.4% EMPA	19.9% NREL	12% EPFL	7.9% Solarmar
Module efficiency	13.5%	12%	6.5%	10%	11-12%	~5%	~5%
Cost S/Wp	\$1.3-\$1.8	\$1.3-\$1.8	\$1-\$1.6	\$0.90	\$1.5-\$2	\$3-4	\$3-4
Energy pay-back time	<4.6 years	<2.7 years	9 years	1.1 years	<5.1 years	-	-
Stage	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Introduction/Scale-up	Development/Introduction	Development/Introduction

Confronto tra tecnologie fotovoltaiche classiche ed innovative per applicazioni BIPV

Fonte: Report GTM sul BIPV Market - <http://newenergynews.blogspot.it/2010/08/integration-of-sun-with-structure.html>

A seguito dell'analisi fin qui effettuata si può infine sostenere che:

- Gli impianti BIPV rappresentano una valida scelta di applicazione delle tecnologie fotovoltaiche e saranno destinati ad avere sempre maggiore importanza, sia attraverso interventi su edifici esistenti, sia in applicazioni ex novo.
- Le tecnologie fotovoltaiche innovative presentate, a scapito di attuali e provvisorie minori efficienze e durate, presentano vantaggi specifici che aumentano notevolmente il campo di applicabilità e la versatilità della tecnologia fotovoltaica, aderendo perfettamente alla maggior parte degli intenti di applicazioni BIPV. Rappresentano dunque, già da ora, notevoli alternative per applicazioni specifiche, caratterizzate ad esempio dalla presenza di grandi superfici disponibili, elevate temperature d'esercizio, possibili e frequenti ombreggiamenti, superfici d'applicazione di geometrie particolari, importanza estetica.



---

# Bibliografia

[1] <http://www.solarenergysunrise.com/2012/10/genesi-delle-celle-solari-fotovoltaiche.html>

[2] [http://www.iisalessandrini.it/progetti/studenti/lcroci/le\\_bande\\_di\\_energia.htm](http://www.iisalessandrini.it/progetti/studenti/lcroci/le_bande_di_energia.htm)

[3] <http://www.icmontenero.it/eff-foto.pdf>

[4] <http://www.bipv.ch/index.php/it/>

[5] [http://www.sneresearch.com/kor/service/report\\_show.php?id=776](http://www.sneresearch.com/kor/service/report_show.php?id=776)

[6] <http://www.greentechmedia.com/research/report/building-integrated-photovoltaics-an-emerging-market>

[7] <http://newenergynews.blogspot.it/2010/08/integration-of-sun-with-structure.html>

[8] <http://www.gse.it/it/Conto%20Energia/Fotovoltaico/QuintoContoEnergia/FotovoltaicoIntegratoInnovativo/Pagine/default.aspx>

[9] Il nuovo fotovoltaico / M. Pagliaro, G. Palmisano, R. Ciriminna. – Ed. Flaccovio