

■ Perché?

Si avvicina sempre di più il momento in cui ogni governo dovrà confrontarsi con la necessità di trovare nuovi sistemi per poter “fare energia”. La crisi del petrolio è solo la punta di un problema che sta mettendo in crisi le economie di moltissimi Paesi europei e, in particolare modo, dell'Italia. I costi sempre maggiori dell'estrazione, dovuta dalle guerre che imperversano sui quei territori, sono, a loro volta, rincarati dall'esaurimento della materia prima e dagli inevitabili costi aggiuntivi necessari per poter forare sempre più in profondità alla ricerca di nuovi sorgenti da cui poter estrarre. L'esaurimento di materie prime sta coinvolgendo non solo la genesi di energia ma, anche, il suo trasporto: è ormai di dominio pubblico come il rame (elemento principale per i collegamenti elettrici) sia un elemento di sempre più difficile recupero.

Per ora non si è ancora visto un impegno concreto da parte delle amministrazioni per poter fronteggiare questa emergenza, ma nell'arco di pochi anni sarà necessario fare una rivalutazione del sistema economico e, in particolare modo, del sistema energetico nazionale. Per questi motivi, sempre più spesso si sente parlare di energie alternative, fonti rinnovabili e conto energetico, e ancora più spesso la conoscenza di questi argomenti è quantomeno incompleta e fallace.

Fonti energetiche alternative e rinnovabili

Le denominazioni di fonti energetiche alternative e di fonti energetiche rinnovabili sono utilizzate spesso come sinonimi, ma questo non sempre è vero e frequentemente la dicitura “*fonte energetica alternativa*” è utilizzata fuori luogo. Storicamente il termine fonte energetica alternativa divenne di uso comune negli anni '70, a valle delle crisi petrolifere del 1973 e 1979, che avevano evidenziato le problematiche poste da un sistema energetico eccessivamente dipendente dal petrolio e, più in generale, dalle fonti fossili. Più recentemente il suo utilizzo è divenuto ancora più frequente dopo che si è identificata nella CO₂ una delle cause principali dell'effetto serra. Il significato tecnico di fonte energetica alternativa (o anche i termini *fonti alternative* o *energie alternative*) è attribuito a un modo di ottenere energia senza aumentare la concentrazione di CO₂ presente in atmosfera, ovvero in modo “alternativo” all'utilizzo dei combustibili fossili. Le fonti energetiche alternative si dividono in due gruppi: quelle di origine nucleare (da fissione o da fusione di nuclei atomici) e quelle rinnovabili.

Le fonti energetiche rinnovabili utilizzate per la produzione di energia elettrica annoverano al loro interno i sistemi di conversione impiegati da

tempo dall'uomo per ricavare energia, quali i grossi impianti idroelettrici e geotermici (per esempio i soffioni boraciferi di Larderello), ed i sistemi sviluppati più recentemente, quali i generatori eolici, i piccoli impianti idroelettrici, gli impianti fotovoltaici, gli impianti che sfruttano la biomassa e i biocombustibili.

Tra i sistemi di sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili più attuali si annovera, quindi, anche il *solare fotovoltaico*, la cui diffusione è avvenuta negli ultimi anni grazie ad una politica di incentivazione sostenuta, in primo luogo, da precise direttive imposte dalla Commissione Europea. Gli impianti solari fotovoltaici attuali sono principalmente basati sulla tecnologia del silicio, conosciuta da decenni (la prima navicella che ha portato l'uomo nello spazio era già equipaggiata con celle a silicio monocristallino). Questa tecnologia è però molto costosa. Al momento sono in fase di studio altri sistemi di conversione dell'energia solare per la produzione di energia elettrica. È ragionevole pensare, quindi, che tra uno o due decenni si potrà raggiungere la "grid parity", quando il costo di produzione di energia elettrica per conversione dalla radiazione solare diverrà competitivo con il costo di produzione di energia elettrica da combustibile fossile, senza la necessità di incentivi.

In Italia, il fotovoltaico è promosso in ambito edilizio attraverso il programma denominato *Conto energia*, che eroga incentivi in conto esercizio della produzione elettrica per impianti connessi alla rete. I governi che si sono succeduti dal 2003 hanno cercato di agevolare tale processo, cambiandone via via le modalità. Ad esempio, il DM 2/03/09 ha assegnato il diritto a premi aggiuntivi anche a impianti di dimensioni medio-piccole; la legge 23/07/2009, n. 99, invece, estende le modalità di scambio in Conto energia e la remunerazione di quanto prodotto da impianti rinnovabili alle condizioni economiche di mercato, per favorirne la diffusione.

Il presente volume illustra lo studio, la progettazione e la messa in servizio di impianti fotovoltaici secondo i criteri normativi sanciti dal decreto sul Conto energia.

Completa la trattazione un CD-Rom contenente il programma *EnergySave* (software di Analist Group), utile per progettare e calcolare impianti fotovoltaici alle diverse latitudini in Italia, scegliendo la potenza, l'esposizione e gli elementi da utilizzare. I risultati del programma costituiscono valida documentazione per accedere al Conto energia.

2.1 Impianti e componenti

Vediamo quali sono i principali componenti che si trovano all'interno di un impianto fotovoltaico, sia esso stand alone, grid connected o quant'altro, valutandone sia il funzionamento, sia alcuni dei parametri caratterizzanti su cui fondare la scelta di un possibile acquisto.

Sono aggiunte, inoltre, alcune considerazioni ed approfondimenti su componenti non sempre presenti (inseguitore del punto di massima potenza, regolatori di potenza, diodi di bypass, selezionatori), che permettono un controllo sia della potenza erogata, sia sull'efficienza dell'impianto stesso. Queste nuove apparecchiature compongono il sistema per il controllo della potenza, volto ad ottimizzare le performance del sistema.

La presenza di questi dispositivi sempre più frequente, seppur non necessaria al funzionamento dell'impianto, permette un suo utilizzo e una sua gestione più accorti e attenti; la presenza in un circuito di tali elementi, garantisce una vita della struttura impiantistica e una qualità del servizio di gran lunga superiori rispetto a impianti che, invece, non presentano tali accorgimenti tecnici.

Al termine del capitolo daremo uno scorcio e quelle tecnologie definite "ibride", che negli ultimi periodi stanno maturando, e che stanno interessando in misura sempre crescente il mercato.

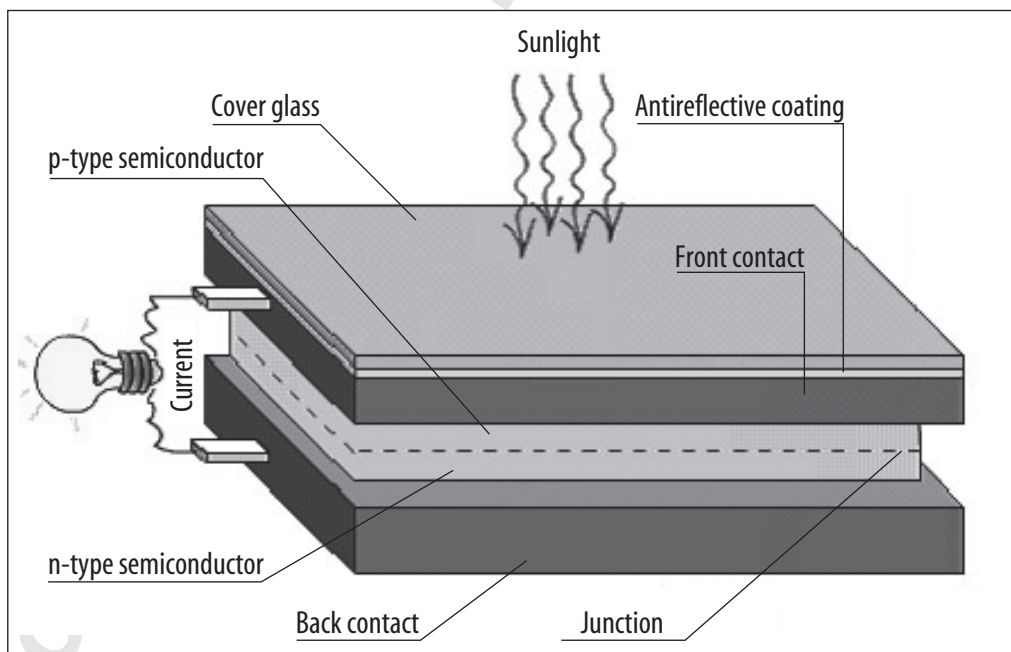


Fig. 2.1 Schema di modulo fotovoltaico.

2.2 Modulo fotovoltaico

I pannelli fotovoltaici o moduli fotovoltaici, contenenti celle fotovoltaiche in silicio **cristallino**, sono in genere composti da una matrice di celle disposte tra due superfici di sostegno, di cui almeno una trasparente. L'insieme di celle fotovoltaiche così disposte vengono collegate elettricamente mediante **ribbon** (per questi motivi costruttivi, il rendimento dei moduli fotovoltaici è in genere inferiore o uguale al rendimento della loro peggior cella), ovvero sottili nastri in materiale conduttore, in genere rame stagnato, in modo da costituire opportunamente serie e paralleli elettrici, in base alle esigenze del produttore.

Tra le varie celle viene usualmente lasciato uno spazio **vuoto**, di spessore di massimo 2 mm, per compensare eventuali variazioni della dimensione delle celle dovute a dilatazione termica. I pannelli contenenti, invece, celle fotovoltaiche in silicio **amorfo** sono composti da un sottile strato siliceo sigillato tra due strati traslucidi flessibili.

I moduli fotovoltaici più comuni sono realizzati mediante **pressofusione** di più strati di materiale. Sopra una superficie posteriore di **supporto**, in genere realizzata in un materiale opaco (per accentuare la concentrazione dei raggi luminosi e diminuirne la dispersione) ed isolante con scarsa dilatazione termica, come ad esempio il vetro temperato o un polimero come il tedlar (adatto per i nostri scopi e molto economico), vengono appoggiati ad un sottile strato di **acetato di vinile** (spesso chiamato con la sigla EVA e caratterizzato dall'essere trasparente) che funge da collante, la **matrice** di moduli preconnessi, mediante i già citati ribbon, un **secondo strato di acetato** e un **materiale trasparente** che funge da protezione meccanica anteriore per le celle fotovoltaiche, in genere vetro a basso contenuto di ferro ed ad elevata trasmittanza nella banda del visibile, dotato, inoltre di una buona resistenza alle sollecitazioni meccaniche. Esso deve infatti, non solo non fungere da elemento di ostacolo alle radiazioni ma deve essere anche elemento protettivo (da imbrattamento, piogge acide ecc.) per le celle e deve poter consentire l'accesso ai moduli per il montaggio (deve perciò permettere al pannello di poter essere calpestato senza risentirne) e la pulizia manutentiva.

Dopo il procedimento di pressofusione, che trasforma l'EVA in mero collante, le terminazioni elettriche dei ribbon vengono chiuse in una **morsettiera stagna**, generalmente fissata alla superficie di sostegno posteriore, e il "sandwich" ottenuto viene fissato ad una **cornice in alluminio**, che sarà utile al fissaggio del pannello alle strutture di sostegno atte a sostenerlo e orientarlo opportunamente verso il sole.

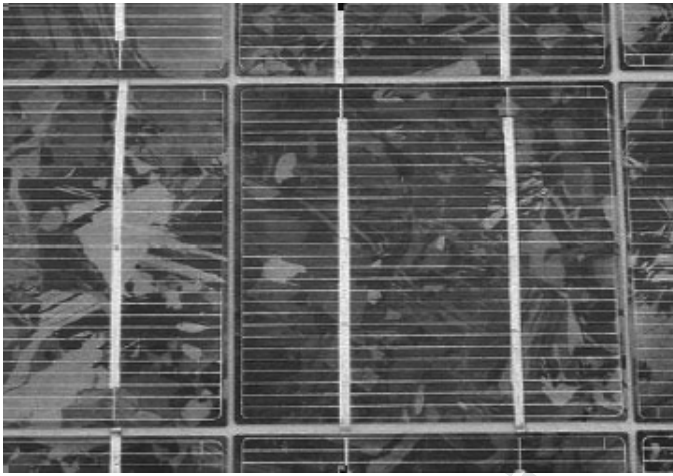


Fig. 2.2 Esempio modulo fotovoltaico.

I moduli fotovoltaici in silicio cristallino più comuni hanno dimensioni variabili da $0,5 \text{ m}^2$ a $1,5 \text{ m}^2$, con punte di $2,5 \text{ m}^2$ in esemplari per grandi impianti.

Non vi è, comunque, particolare interesse a costruire moduli di grandi dimensioni, a causa delle grosse perdite di prestazioni che l'intero modulo subisce all'ombreggiamento (o malfunzionamento) di una sua singola cella. Più moduli potranno poi essere collegati in serie o parallelo per meglio rispondere alle differenti esigenze dell'utenza.

Mediamente per **produrre 1 kW**, a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ è necessario avere un numero di moduli tali che coprano una superficie di circa 8 m^2 .

I moduli fotovoltaici odierni hanno una **vita** stimata di 50 anni circa, anche se è plausibile ipotizzare che vengano dismessi dopo un ciclo di vita di 20-25 anni, a causa della presunta obsolescenza della loro tecnologia.

2.2.1 Tipologie commerciali

Analizziamo ora le varie tecnologie, limitando l'analisi ai soli modelli commerciali a base silicea, valutandone principalmente il costo e il rendimento.

- *Silicio monocristallino*: ogni cella è costituita da un wafer prodotto da un lingotto di silicio purissimo. Questa tipologia di pannelli fotovoltaici appare esteticamente come un pannello quadrato, o rettangolare in cui le celle sono collegate in serie.

Il rendimento globale di un pannello solare in silicio monocristallino è di circa il 13-17%. Uno dei difetti di questa tipologia di cella è legata all'energia spesa per la loro produzione: infatti, per pro-



Fig. 2.3 Modulo in silicio monocristallino.

durre questi tipi di moduli viene spesa molta energia, e quindi, ogni modulo impiega anche 3-6 anni per restituire la sola energia che è stata impiegata per essere prodotto, mentre nell'arco della sua vita ne produrrà 4-8 volte di più. Un altro difetto di questa tecnologia fotovoltaica, è legata ad un sostanziale diminuzione, od anche abbattimento, del rendimento, in caso di ombre particolari che coprono anche una piccola porzione del modulo, o nel caso di nuvole, o ancora durante le ore serale o della mattina presto. Ciò non toglie che questa tipologia di pannelli fotovoltaici rimanga un ottimo prodotto di qualità e stabilità del rendimento.

Per queste sue caratteristiche il suo utilizzo è consigliato nelle zone maggiormente soleggiate che presentano brevi periodi di ombreggiamento come, ad esempio, le isole o il sud Italia.

- *Silicio policristallino o multicristallino*: il lingotto di cui sopra è prodotto mediante drogaggio chimico. Il wafer di multicristallo si origina dalla fusione e successiva ricristallizzazione del silicio di scarto dell'industria elettronica ("scraps" di silicio).

Da questa fusione si ottiene un "pane" che viene tagliato verticalmente in lingotti con forma di parallelepipedo, per cui i wafer ottenuti hanno forma squadrata e le caratteristiche striature. Ha un rendimento pari al 13% e acquisisce quasi tutti i pregi e i difetti del silicio monocristallino.

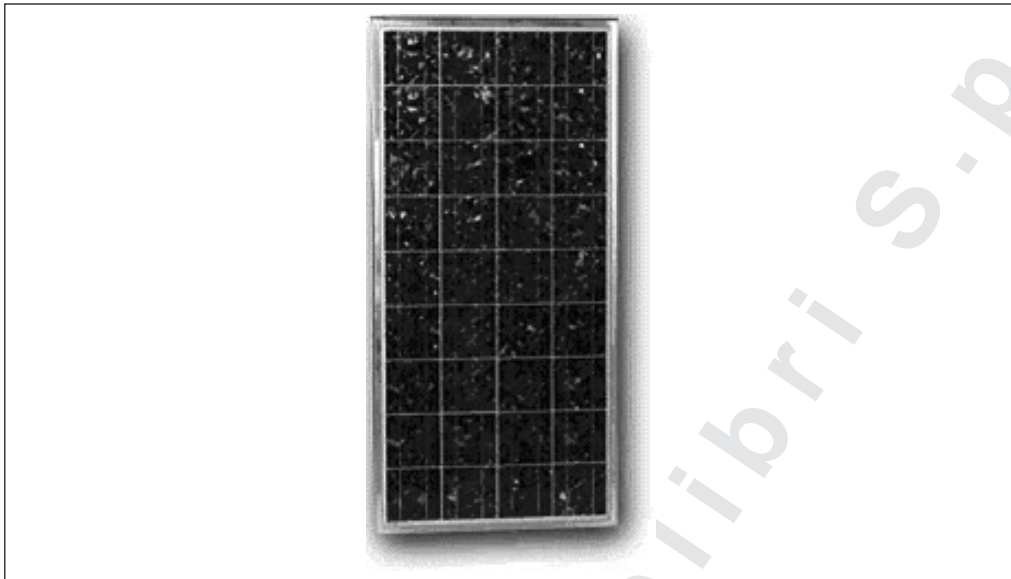


Fig. 2.4 Modulo in silicio policristallino.

- *Silicio amorfo*: gli atomi silicei vengono depositi chimicamente in forma amorfa, ovvero strutturalmente disorganizzata, sulla superficie di sostegno. È il modulo fotovoltaico più economico, ma anche quello con il minor rendimento ed un maggiore degrado del rendimento nel tempo.

Questo tipo di pannello fotovoltaico si presenta come una lastra di vetro grigio/bluastra di colore uniforme, lo spessore è di pochi millimetri e, solitamente, è dotato di una cornice in alluminio per conferire maggiore robustezza o maneggiabilità al modulo stesso. In pratica un vetro trasparente speciale rivestirà su un lato, al fine di creare un ottimo livello di impermeabilità e di isolamento elettrico. Il lato trasparente è quello che si esporrà al sole, mentre sullo strato opaco sono fissati dei profili di alluminio per il fissaggio.

Il **rendimento** di questi pannelli fotovoltaici va dal 6 al 10% circa, ma, nei primi due mesi di vita, il rendimento diminuisce di circa il 20%, per poi rimanere stabile, con un degrado delle prestazioni che usualmente non supera il 20% nei primi 20 anni di funzionamento. Da un punto di vista di costo energetico per la natura, il pannello fotovoltaico in silicio amorfo è il prodotto che si difende meglio, in quanto necessita di un quantitativo abbastanza basso di **energia** per essere prodotto, energia che riesce a restituire in circa 2-3 anni, riuscendone a generarne fino a 10-12 volte di più nell'arco della sua vita. Un ulteriore pregio, molto presente nei moduli a silicio amorfo, è legato al

Tab. 2.1 Caratteristiche medie.

	Silicio monocristallino	Silicio policristallino	Silicio amorfo
Area	1,1 mq	0,64-1,5 mq	0,84 mq
Potenza max nominale	150 Wp	80-130 Wp	60 Wp
Area necessaria per 1 Kwp	7,33 mq	8-11 mq	14 mq
Tensione di lavoro	24 V	17 V	65 V
Corrente nominale (Imp)	4.8 A	4.5 A	0.89 A
Resistenza grandine	45 mm a 39 m/s	45 mm a 39 m/s	45 mm a 39 m/s
Peso	15 Kg	6-10 Kg	13 Kg
Dimensioni medie	1600 x 800 x 40 mm	1200 x 530 x 2 1600 x 1060 x 4 mm	920 x 920 x 40 mm

fatto che, durante le **giornate nuvolose**, ombreggiate, o nelle ore serali e mattutine, si ottengono dei rendimenti superiori anche dell'8-15% rispetto alle tecnologie mono e poli-cristalline, in quanto questa tecnologia riesce a sfruttare anche questi momenti particolari. Se ne deduce, quindi, che i pannelli solari a silicio amorfo sono particolarmente indicati per le zone dove spesso c'è la presenza di nuvole o ostacoli fisici che generano ombre come, ad esempio, nel nord Italia.

L'insieme a pannelli monocristallini è la tipologia di cella più diffusa.

- **Eterogiunzione:** viene impiegato uno strato di silicio cristallino come superficie di sostegno di uno o più strati amorfi, ognuno dei quali ottimizzato per una specifica sotto-banda di radiazioni 16% nei moduli in eterogiunzione.

I dispositivi sono ottenuti per deposizione PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition, una tecnica per il rivestimento in camere sotto vuoto) a bassa temperatura (< 250 °C) su substrato di Si monocristallino.

I risultati originali conseguiti consistono nella realizzazione di celle con triplo strato (microcristallino *p* - amorfo *p* - amorfo *i*) che permettono di raggiungere una tensione a circuito aperto di 638 mV senza passivazione dei contatti.

Un'altra caratteristica del processo realizzativo è l'uso di PE-CVD ad alta frequenza (VHF) che permette un buon controllo della qualità dello strato microcristallino.

Le efficienze raggiunte sono circa il 14%.

Inoltre si sta cercando sia il passaggio a substrati in silicio tessu- rizzato, il che consentirebbe di incrementare la corrente di corto cir- cuito, e sia la sostituzione del silicio amorfo con silicio microcri- stallino per ridurre l'assorbimento nell'emettitore. È, inoltre, in fase avanzata lo sviluppo di dispositivi *p-i-n* in silicio microcristallino deposto sempre per PE-CVD per la realizzazione di celle a basso co- sto su substrati di tipo industriale. La tecnologia delle celle solari ad eterogiunzione di silicio cristallino/silicio amorfo (cSi/aSi) è con- tinuamente progredita, fino a raggiungere l'attuale risultato del 20% di efficienza.

Tali celle uniscono l'alta **efficienza** e la **stabilità** nel tempo, intrin- seche del silicio cristallino, ai vantaggi offerti dal metodo di **depo- sizione** basato sul plasma a radiofrequenza (PE-CVD). L'uso di que- sta tecnica, in alternativa al processo convenzionale di formazione della giunzione mediante diffusione, consente di abbattere i costi del prodotto finale, attraverso la riduzione delle temperature del pro- cesso di fabbricazione delle celle e la riduzione del costo unitario del processo, dovuta alla possibilità di trattare simultaneamente gran- di lotti di wafer.

- *Silicio microsferico*: in cui si impiega silicio policristallino ridotto in sfere del diametro di circa 0,75 mm ingabbiate in un substrato di alluminio. Tale tecnologia raggiunge un rendimento di circa il 10%.

Di queste tecnologie, soltanto l'amorfo e il microsferico permettono la **flessione** del loro substrato di sostegno: nel caso dell'amorfo non vi è la struttura cristallina del materiale ad impedirne la flessione, nel caso del microsferico non è la cella (sfera) a flettersi, ma la griglia a nido d'ape su cui è disposta.

Vi sono inoltre altre tecnologie, la maggior parte delle quali ancora in via di sviluppo, che hanno valori di rendimento più elevati: ad esempio ci so- no celle fatte in arsenurio di gallio che raggiungono il 34% di rendimento ma tendono a rilasciare vapori tossici quando si riscaldano, ed è quindi pre- valentemente utilizzato per i moduli spaziali (dove raggiungono un ren- dimento superiore al 50%, perchè non vi è il filtraggio di determinate lun- ghezze d'onda da parte dell'atmosfera); si stanno sviluppando materiali pla- stici che, sfruttando nanotecnologie, convertono i raggi solari e infrarossi (quindi funziona anche con il tempo nuovoloso) in elettricità, prevedendo dei valori di rendimento cinque volte maggiori rispetto a quelli attuali.

2.3 Modelli

Vediamo ora una carrellata delle varie tipologie di pannelli presenti sul mercato, concentrandoci sulle caratteristiche tecniche degli stessi. Tale panoramica non vuole essere esaustiva della materia (né potrebbe esserla, a causa del continuo proliferare di moduli di forma e capacità integrativa diversi) ma vuole essere un elemento che incuriosisca il lettore e sottolinei ancor di più la possibilità di poter trovare sul mercato il tipo di pannello che, o per la sua natura geometrica o per le sue peculiarità tecniche, meglio si amalgama alle diverse e diversificate tipologie d'impianti e installazioni.

L'elenco, sotto riportato, contiene principalmente quei moduli che possiedono una elevata duttilità (legata principalmente alla riduzione del peso dei pannelli stessi) nel campo dell'edilizia potendo, infatti, essere usati come elementi integranti superfici piane, superfici inclinate e facciate o come elementi ricoprenti le stesse. Il ridotto spessore dei moduli, raggiunto con le nuove tecnologie, rende gli stessi, inoltre, adatti anche alla copertura di superfici curve. Vi sono, infine, nuovi tipologie di pannelli presenti sul mercato che sono ottenuti integrando moduli fotovoltaici con elementi architettonici di più largo consumo (come, ad esempio, le tegole), fornendo, in tal modo, all'utente finale un prodotto che non necessita di costi aggiuntivi per l'installazione.

Da tale lista sono state lasciate fuori tutte le tipologie di moduli caratterizzanti gli impianti stand-alone. L'esclusione di tali elementi è stata dettata da due osservazioni. La prima riguardante l'impossibilità di fornire un seppur minimo elenco valido per tale branca di utilizzo: le più diverse richieste da parte di un mercato sempre più vasto, hanno indotto le aziende produttrici a fornire soluzioni che, con il tempo, si sono sempre più settorializzate e, di conseguenza, vincolate al campo d'utilizzo. La seconda, invece, riguarda il fine di tali dispositivi: la finalità del presente testo è quella di fornire uno strumento di supporto, analisi e studio per l'utilizzo e la diffusione del fotovoltaico nella vita della collettività; quindi nel seguente elenco si è posto l'accento su quelle tipologie di moduli che, per le loro caratteristiche, meglio di altre possono calarsi nella realtà di ogni individuo ed essere utilizzate dallo stesso, e, di conseguenza, tralasciando quelle la cui destinazione d'uso (come, ad esempio, l'illuminazione stradale, l'illuminazione di musei e scavi archeologici ecc.) è maggiormente legata alle amministrazioni locali. Nel momento, però, in cui necessiteremmo di tali tipologie basterà compiere una piccola ricerca su Internet per poter essere sommersi dalle più diverse e performanti soluzioni per le nostre necessità.

Tipologie commerciali				
Azienda produttrice	Modello	Tipologia tecnologica	Caratteristiche tecniche	
Photowatt International S.A.	PW 500	Si Policristallino	Caratteristica	Valore
			Tensione nominale	12 V
			Potenza nominale	55 W
			Corrente di corto circuito	3,1 A
			Tensione a circuito aperto	21,6 V
			Dimensioni	1007x462x24,5 mm 5,5 kg
Photowatt International S.A.	PW 850	Si Policristallino	Caratteristica	Valore
			Tensione nominale	12 V
			Potenza nominale	85 W
			Corrente di corto circuito	4,7A
			Tensione a circuito aperto	21,5V
			Dimensioni	1237x556x45 mm 7,8 kg
Photowatt International S.A.	PWX 850	Si Policristallino	Caratteristica	Valore
			Tensione nominale	12 V
			Potenza nominale	85 W
			Corrente di corto circuito	4,7 A
			Tensione a circuito aperto	21,5 V
			Dimensioni	1272x556x39 mm 13 kg

Azienda produttrice	Modello	Tipologia tecnologica	Caratteristiche tecniche	
			Caratteristica	Valore
Photowatt International S.A.	PW 1250	Si Policristallino	Tensione nominale	24 V (anche a 12 V)
			Potenza nominale	135 W
			Corrente di corto circuito	4,7A
			Tensione a circuito aperto	31,9 V
			Dimensioni	1237x822x38 mm 12,5 kg
Photowatt International S.A.	PW 1650	Si Policristallino	Tensione nominale	24 V (anche a 12 V)
			Potenza nominale	175 W
			Corrente di corto circuito	4,8 A
			Tensione a circuito aperto	43 V
			Dimensioni	1237x1082x45 mm 18 kg
Sharp	NA-801WP	Si amorfo combinato con silicio monocristallino	Tensione nominale	48 V
			Potenza nominale	80 W
			Corrente di corto circuito	2,08 A
			Tensione a circuito aperto	63,3 V
			Dimensioni	1129x934x46 mm 14 kg