

# Premessa

I sistemi fotovoltaici convertono l'energia solare in elettricità. Il termine "photo" deriva dal greco "phos", il cui significato è luce, mentre "volt" prende le sue radici da Alessandro Volta (1745-1827), primo a studiare il fenomeno elettrico. "Fotovoltaico", viene tradotto letteralmente come "luce-elettrica".

Il termine viene però anche comunemente usato con il significato di "cella solare".

I sistemi fotovoltaici, possono essere, semplici sistemi di approvvigionamento per piccole calcolatrici ed orologi da polso utilizzati ogni giorno, oppure, sistemi più evoluti, in grado di fornire un approvvigionamento elettrico per il funzionamento di pompe per l'acqua, sistemi di comunicazione, illuminazione di case e molte altre applicazioni.

Nella maggior parte dei casi, l'approvvigionamento di elettricità attraverso impianti fotovoltaici, rappresenta la soluzione più economica al fine di effettuare le mansioni sopra indicate.

## L'effetto fotovoltaico. Alcuni cenni storici.

"L'effetto fotovoltaico" è noto fin dal 1839, e trova il suo fondamento nella esperienza del fisico francese Edmond Becquerel (1820-1891) che presentò alla Accademia delle Scienze di Parigi la sua "Memoria sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari". La scoperta di tale effetto avvenne casualmente, mentre Becquerel effettuava delle esperienze su una cella elettrolitica, in cui erano immersi due elettrodi di platino. Nel 1870 l'effetto fotovoltaico fu studiato in solido sul selenio, da Heinrich Hertz, e nel 1876, da Smith, Adam e Day, i quali conclusero che tali celle erano in grado di convertire la luce in elettricità con una efficienza compresa fra 1% e il 2%. Contemporaneamente, il selenio venne utilizzato nel campo della fotografia, nei dispositivi per la misurazione.

L'idea di sfruttare l'effetto fotovoltaico sottoforma di fonte energetica non poté essere sviluppata fino a quando non si presentò l'occasione di operare con materiali diversi dal selenio, il cui rendimento fosse migliore. Solo nel 1954, Person, Fuller e Chapin, ottennero la prima cella solare commerciale in silicio realizzata all'interno dei laboratori Bell.

Passi avanti verso la commercializzazione del fotovoltaico vennero fatti tra il 1940 e l'inizio del 1950, quando venne sviluppato il processo Czochralski per la produzione del silicio cristallino altamente puro, con efficienza del 4%.

I costi ingenti della nuova tecnologia rappresentarono un fattore restrittivo a casi particolari nel campo d'azione del sistema: ad esempio, l'alimentazione di satelliti artificiali.

---

# L'effetto fotovoltaico.

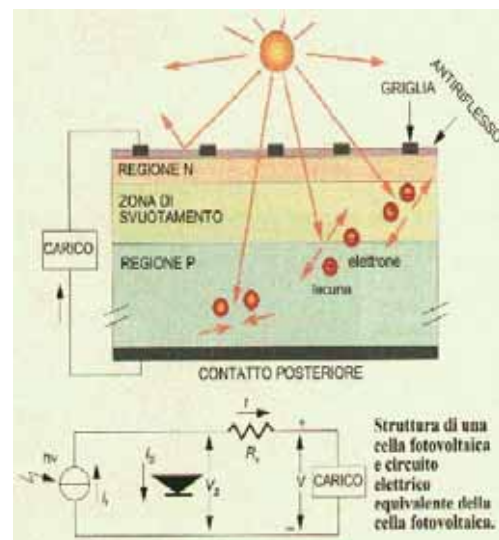
Le celle solari comunemente usate sono quelle al silicio. La fabbricazione di tali celle inizia da un cristallo cilindrico di silicio ottenuto da un bagno di silicio fuso. Tale cristallo viene contaminato ("drogato"), mediante una piccola concentrazione di impurità, che considerata la sua bassa conducibilità elettrica diviene conduttore di elettricità. A seconda della natura delle impurità, il cristallo diventa conduttore di cariche negative ("n"), "elettroni", oppure di cariche positive ("p"), "lacune". Si può impiegare Fosforo per rendere il cristallo di tipo "n" e Boro per renderlo di tipo "p". Successivamente il cristallo cilindrico viene tagliato in fettine ("wafers") sottilissime (frazioni di  $\mu\text{m}$ ). A questo punto si deve ottenere la "giunzione p-n": se si usa un "wafer" di tipo "n", viene diffuso ad alta temperatura del Boro nella sua superficie, in misura tale che, un sottilissimo strato di tale superficie diventi di tipo "p". Il materiale di tipo "p", che è quello generalmente esposto alla radiazione solare, ha spessore dell'ordine del  $\mu\text{m}$ , mentre quello di tipo "n" ha spessore di circa 200  $\mu\text{m}$ .

Quando un fotone della radiazione solare urta la regione della giunzione "p-n", si produce una coppia elettrone-lacuna, e l'elettrone tende a migrare verso lo strato di Silicio tipo "p". Se gli strati "p" ed "n" sono connessi con fili conduttori, che la corrente elettrica prodotta può circolare in un circuito esterno di utilizzazione. Ogni cella, irraggiata da luce solare, produce una tensione di 0,4 , 0,5 Volt.

Dal punto di vista fisico l'effetto fotovoltaico consiste nella generazione di forza elettromotrice in seguito all'assorbimento di radiazioni ionizzanti, tra le quali la radiazione luminosa.

L'effetto fotovoltaico può manifestarsi in gas, liquidi e solidi, anche se dall'inizio l'utilizzazione fu limitata ai materiali semiconduttori.

A differenza di altri tipi di conversione termodinamica, effetto fotovoltaico non prevede l'esistenza di parti in movimento, di circolazione di fluidi o di consumo di materiale, che rendono l'effetto stesso non soggetto alle limitazioni del ciclo di Carnet.



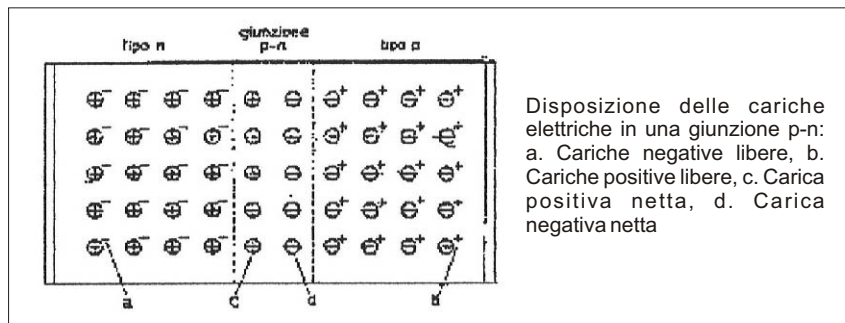
L'effetto fotovoltaico si caratterizza attraverso due processi: il primo, in cui per assorbimento delle radiazioni ionizzanti vengono a generarsi cariche positive "lacune" e negative "elettroni", in eccesso rispetto all'equilibrio termico; il secondo, in cui tali cariche di segno opposto si dispongono in due diverse zone del dispositivo, a loro volta separate da una disomogeneità, realizzata in alcuni casi tra due semiconduttori uguali di diversa resistività ("omogiunzione") o tra due semiconduttori diversi ("eterogiunzione").

Complessivamente il processo può essere schematizzato nel modo seguente:

- generazione delle cariche
- migrazione delle cariche
- separazione delle cariche.

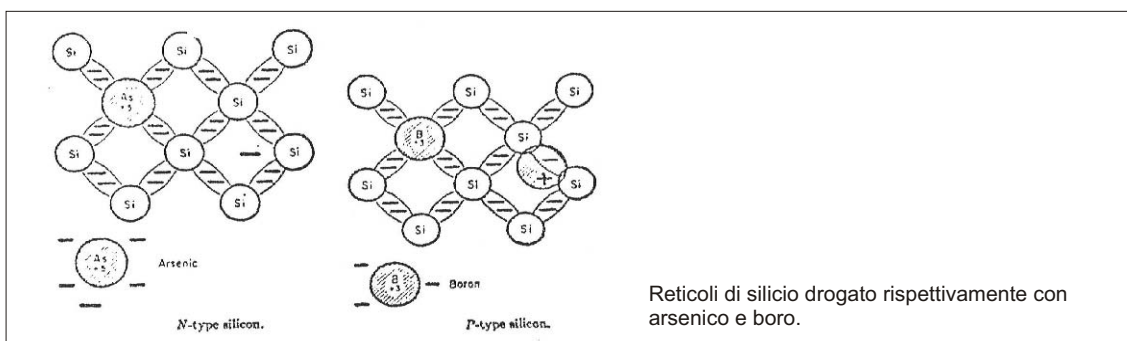
I fotoni del raggio luminoso estraggono gli elettroni del materiale semiconduttore, attivando il processo di fotoconversione. La forza elettromotrice massima ricavabile viene quantificata pari al valore del potenziale di estrazione del materiale. Soltanto i fotoni con energia superiore a  $qV_e$  (in cui  $q$  è la carica dell'elettrone, e  $V_e$  è il potenziale di estrazione) sono in grado di produrre coppie elettrone-lacuna. Poiché l'energia solare è principalmente energia di basso livello, il valore ottimo del potenziale di estrazione si ottiene in corrispondenza di 1 eV. Considerando tutto questo è possibile stabilire che il semiconduttore che si presta meglio alla realizzazione di celle solari è il silicio.

Il numero delle cariche libere generate dall'effetto fotovoltaico dipendono soltanto dal numero di fotoni sulla cella, cioè dalla sua illuminazione e non dal carico esterno applicato. Ciò corrisponde ad avere un generatore che produca una corrente proporzionale alla illuminazione.



La tensione e la corrente di una batteria solare dipendono quindi dal tipo di semiconduttore e dalla geometria della cella; la configurazione delle caratteristiche, quali tensione-corrente, determinano una variazione dell'intensità luminosa, che provoca una variazione della corrente molto maggiore rispetto a quella della tensione.

Il rendimento di una cella solare, si definisce come il rapporto tra la potenza elettrica erogata e la potenza elettromagnetica incidente su di essa, il cui valore massimo viene condizionato da diversi fattori. Una perdita di potenza si può verificare per effetto di riflessione della radiazione incidente, o a causa del fatto che i fotoni con "troppa" energia originano coppie elettrone-lacuna dotate di energia cinetica dissipata in calore e non trasformata in energia elettrica: con irraggiamento solare, il rapporto tra cariche utili e non utili è di circa  $\frac{1}{2}$ . Ancora un'altra causa è legata con l'efficienza di raccolta, dipendente dal numero dei portatori generati per illuminazione che raggiungono e superano la giunzione.



# La radiazione solare.

L'energia solare è l'energia emessa dal Sole con continuità, sotto forma di energia raggiante. L'energia viene irradiata nello spazio sotto forma di radiazione elettromagnetica con una lunghezza d'onda variabile tra 0,2 e 3  $\mu\text{m}$ , di cui lo spettro visibile si colloca fra 0,4  $\mu\text{m}$  dalla parte blu e 0,8  $\mu\text{m}$  dalla parte rossa. Attraverso i dati disponibili sulla distribuzione della radiazione solare oltre l'atmosfera terrestre, è possibile concludere che il 7% è compreso fra 0,2 e 0,4  $\mu\text{m}$  (nell'ultravioletto), il 42% è compreso nella zona visibile fra 0,4 e 0,8  $\mu\text{m}$  e il 51% è compreso nella zona infrarossa fra 0,8 e 3  $\mu\text{m}$ .

La radiazione solare che raggiunge il suolo terrestre viene attenuata dalla diffusione e dall'assorbimento ad opera dell'atmosfera. È possibile quindi dire che il 90% dell'energia solare che raggiunge il suolo è caratterizzata da una lunghezza d'onda pari a  $0,279 < \lambda < 0,5 \mu\text{m}$ , mentre il 25% da una lunghezza d'onda  $\lambda > \lambda_{\text{max}}$ .

Per questo motivo l'energia solare che raggiunge il suolo terrestre non si degrada qualitativamente durante il tragitto dal Sole alla Terra, ma si diluisce, e quindi, può essere convertita quasi interamente in energia utilizzabile.

## Energia irradiata dal sole: aspetti energetici.

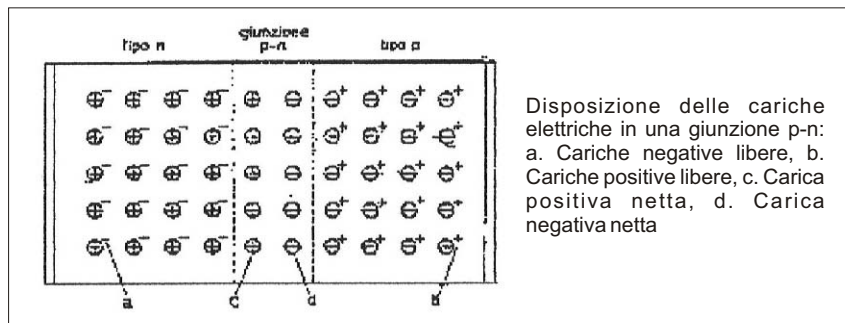
L'energia che raggiunge la superficie della Terra varia con il variare, della latitudine, dell'altezza del suolo, della stagione, dell'ora del giorno, e delle variazioni delle condizioni meteorologiche locali.

In modo più completo è possibile affermare che l'energia irradiata dal Sole raggiunge il suolo terrestre secondo alcune leggi, quali:

- la posizione della Terra rispetto al Sole, che trova espressione fisica nella porzione di terra esposta alla radiazione variabile a ritmo stagionale
  - nell'emisfero boreale durante l'inverno i raggi del sole arrivano con un angolo basso rispetto all'orizzonte e pertanto risultano irradiate con scarsa intensità le superfici orizzontali (tangenti alla superficie della Terra) mentre vengono irradiate intensamente le superfici verticali esposte a Est, Sud, Ovest, in quanto investite secondo angoli vicini a  $90^\circ$ ; tutto questo malgrado la superficie di atmosfera che i raggi debbono attraversare sia maggiore rispetto alla situazione estiva;
  - in funzione alla rotazione della Terra attorno al suo asse, la parte esposta ai raggi solari varia con ritmo giornaliero, od orario: i raggi del mattino e della sera investono le superfici verticali con angoli relativamente efficaci, essendo il Sole basso sull'orizzonte, mentre nelle ore meridiane l'irraggiamento più intenso raggiunge i piani orizzontali.
-

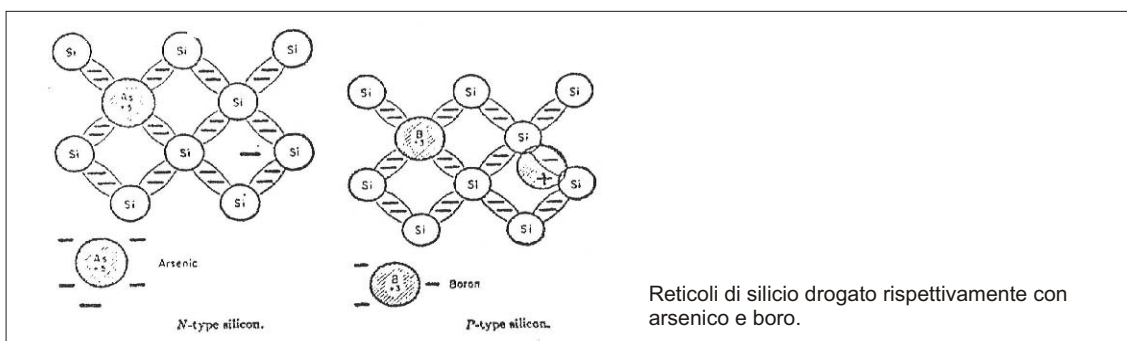
I fotoni del raggio luminoso estraggono gli elettroni del materiale semiconduttore, attivando il processo di fotoconversione. La forza elettromotrice massima ricavabile viene quantificata pari al valore del potenziale di estrazione del materiale. Soltanto i fotoni con energia superiore a  $qV_e$  (in cui  $q$  è la carica dell'elettrone, e  $V_e$  è il potenziale di estrazione) sono in grado di produrre coppie elettrone-lacuna. Poiché l'energia solare è principalmente energia di basso livello, il valore ottimo del potenziale di estrazione si ottiene in corrispondenza di 1 eV. Considerando tutto questo è possibile stabilire che il semiconduttore che si presta meglio alla realizzazione di celle solari è il silicio.

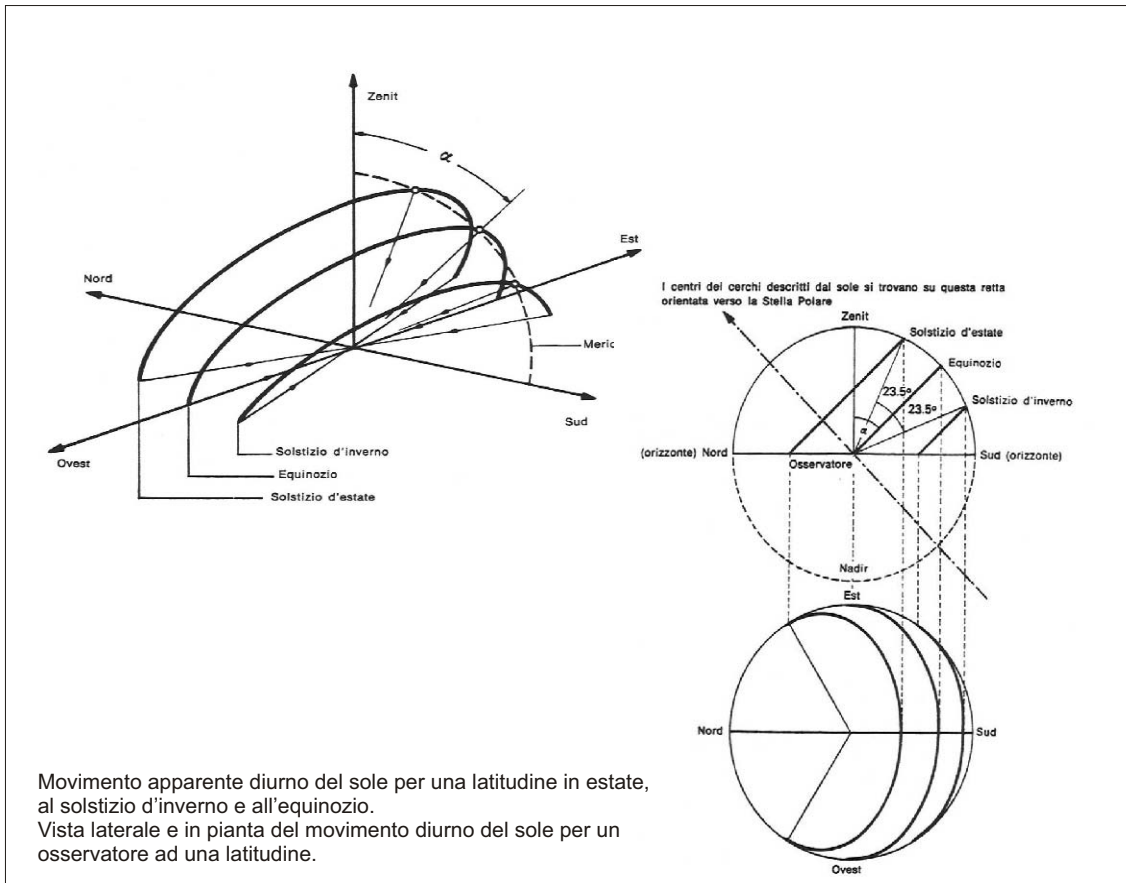
Il numero delle cariche libere generate dall'effetto fotovoltaico dipendono soltanto dal numero di fotoni sulla cella, cioè dalla sua illuminazione e non dal carico esterno applicato. Ciò corrisponde ad avere un generatore che produca una corrente proporzionale alla illuminazione.



La tensione e la corrente di una batteria solare dipendono quindi dal tipo di semiconduttore e dalla geometria della cella; la configurazione delle caratteristiche, quali tensione-corrente, determinano una variazione dell'intensità luminosa, che provoca una variazione della corrente molto maggiore rispetto a quella della tensione.

Il rendimento di una cella solare, si definisce come il rapporto tra la potenza elettrica erogata e la potenza elettromagnetica incidente su di essa, il cui valore massimo viene condizionato da diversi fattori. Una perdita di potenza si può verificare per effetto di riflessione della radiazione incidente, o a causa del fatto che i fotoni con "troppa" energia originano coppie elettrone-lacuna dotate di energia cinetica dissipata in calore e non trasformata in energia elettrica: con irraggiamento solare, il rapporto tra cariche utili e non utili è di circa  $\frac{1}{2}$ . Ancora un'altra causa è legata con l'efficienza di raccolta, dipendente dal numero dei portatori generati per illuminazione che raggiungono e superano la giunzione.





Durante l'attraversamento dell'atmosfera terrestre l'irraggiamento solare subisce effetti diversi. Una parte di esso viene riflessa verso lo spazio, principalmente ad opera delle nubi, un'altra parte viene diffusa in tutte le direzioni dall'incontro con le molecole di azoto, ossigeno, vapore d'acqua, anidride carbonica, ozono, una parte viene assorbita dalle molecole costituenti l'atmosfera, le quali di conseguenza si riscaldano ed emettono radiazione infrarossa, ed infine, una parte raggiunge la superficie della Terra e prende il nome di radiazione diretta.

La somma della radiazione diffusa e della radiazione infrarossa emessa dall'atmosfera in seguito all'assorbimento costituisce la radiazione diffusa.

Soltanto un'aliquota dell'irraggiamento solare raggiunge perciò il suolo terrestre, poiché nell'attraversamento dell'atmosfera esso risulta selettivamente assorbito e disperso.

Dell'energia ricevuta dalla superficie terrestre, una parte viene pertanto assorbita dal terreno, una parte riflessa, una parte rimessa come radiazione infrarossa di lunghezza d'onda  $8,12 \mu\text{m}$ , una parte va dispersa per convezione e una parte contribuisce all'evaporazione superficiale dell'acqua.

È evidente che qualsiasi considerazione sulle relazioni fra l'energia solare e la Terra e sulla possibilità di utilizzare tale energia, è basata sulla conoscenza della distribuzione geografica della intensità della radiazione solare.



# Misurazione della radiazione solare.

I dati sulla radiazione solare sono forniti generalmente dai servizi meteorologici, che controllano regolarmente gli strumenti in modo tale che i dati siano sempre della massima precisione.



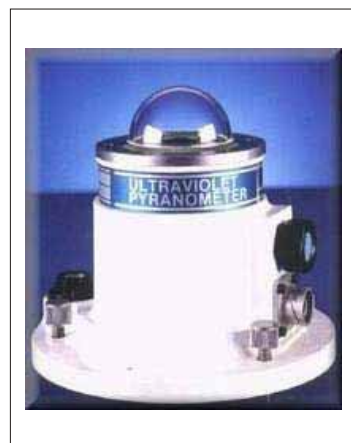
L'apparecchio che misura la durata dell'irraggiamento solare è l'eliografo: questo è sensibile alla radiazione diretta, cioè ai raggi solari visibili.

Lo strumento standard registra la radiazione al di sopra del limite d'illuminazione di  $210 \text{ Wm}^2$ , cioè di un quinto di un massimo possibile. Il limite può variare tra  $70$  e  $280 \text{ Wm}^2$ .

L'irraggiamento totale si registra mediante un apparecchio chiamato piranometro, che riceve l'energia solare proveniente da tutto l'emisfero celeste, vale a dire da un orizzonte in modo da misurare la radiazione incidente su una superficie orizzontale. Lo spettro di lunghezza d'onda misurata si aggira tra  $0,3 \text{ mm}$  e  $3 \text{ mm}$ .

L'apparecchio più comunemente utilizzato è il piranometro di Eppley.

I piranometri in uso hanno una sensibilità tale che la tensione di uscita per l'illuminazione massima è dell'ordine di un millivolt o anche inferiore.



Il terzo tipo di misurazione è quello della radiazione diffusa. Si utilizzano in questo caso piranometri forniti di un dispositivo supplementare che serve da schermo alla radiazione diretta.

La radiazione diretta di misura con il pireliometro: questo strumento comporta un'apertura ridotta e una superficie ricevente che deve essere mantenuta ortogonale ai raggi del sole. L'uso del pireliometro rappresenta un'operazione alquanto delicata e le letture devono essere corrette tenendo conto della temperatura delle diverse parti dell'apparecchio.



Esistono inoltre apparecchi di misura nei quali la termopila è sostituita da una fotopila, la cui sensibilità è molto più elevata e pur mantenendo essi un alto indice di precisione, sono meno costosi.

Per quanto riguarda le esigenze strettamente connesse con i servizi meteorologici. Riguardo cioè alle previsioni del tempo, la misura della radiazione solare non è tra gli elementi più importanti.

La misura più corrente è quella della durata dell'irraggiamento solare.

Esistono formule che permettono di ottenere una valutazione dell'irraggiamento diretto  $S$  partendo dalla radiazione globale, espressa come percentuale  $P$  della massima illuminazione globale possibile (a incidenza normale):

$$\text{per } P > 25\% \quad S = P \times 12,2 \quad 117 \text{Wm}^2$$

$$\text{per } P < 25\% \quad S = 0$$

relazione stabilita da osservazioni sperimentali per diversi climi.

La formula comporta una probabilità di errore che può arrivare fino al 40% e oltre.

Nella maggior parte dei luoghi, a causa della mancanza di una rete sufficientemente fitta di misura della radiazione solare, si può soltanto stimare l'irraggiamento partendo, ad esempio, da dati relativi a località vicine.

A volte per valutare l'irraggiamento solare si usano come dati di base quelli sulla temperatura, le precipitazioni e la nebulosità, che sono più frequentemente a disposizione.

## Valutazioni energetiche.

Nel tragitto attraverso l'atmosfera, la densità di potenza della radiazione solare si riduce da  $1,353 \text{ kW/m}^2$  a valori che possono variare tra 1 e  $0,3 \text{ kW/m}^2$ .

Il valore  $1 \text{ kW/m}^2$  corrisponde al massimo irraggiamento al suolo su superficie orizzontale con Sole allo zenit e atmosfera perfettamente trasparente. Tale valore produce una energia massima  $E$  valutabile mediante la seguente formula:

$$E = 1 \text{ kW} \cdot 0,8 \cdot 8600 \cdot 8/24 \cdot 315/365 \approx 2000 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$$

In cui:

-  $0,8$  = coefficiente di riduzione della densità di potenza mediata sull'arco di 8 ore/giorno

-  $8600$  = numero delle ore in un anno

-  $8/24$  = ore di sole al giorno

-  $315/365$  = giorni di sole all'anno.

Il valore ricavato è un valore limite e tuttavia valido per regioni come Gerusalemme, Texas, Pirenei orientali. Altrove esso è assai minore. Nell'Italia Meridionale e in Sardegna vi sono zone nelle quali l'energia solare incidente raggiunge il valore di  $2000 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$ .



# Sfruttamento dell'energia solare.

Lo sviluppo della moderna tecnologia ha portato allo sfruttamento dell'energia solare in due tipi di applicazione:

- il solare termico, che consiste nella trasformazione dell'energia solare in calore, attraverso un dispositivo denominato collettore solare, tramite il riscaldamento di un fluido (acqua) a bassa temperatura e alla pressione atmosferica. L'acqua viene utilizzata a fini domestici sanitari
- il solare elettrico o fotovoltaico, che consiste nella conversione diretta dell'energia solare in elettricità attraverso un fenomeno fisico-chimico denominato effetto fotovoltaico. Il processo ha come risultato la produzione di energia elettrica.

## Solare termico.

Il pannello solare (o collettore) serve a catturare l'energia che giunge dal sole per produrre acqua calda ad una temperatura che può raggiungere i 60-70 °C. questa viene accumulata in un apposito serbatoio in modo da poter essere utilizzato per gli usi sanitari.

Malgrado le varianti costruttive dei collettori si possono individuare le seguenti parti:

- pannello solare, simile ad un radiatore che permette di trasferire il calore assorbito dal sole all'acqua del serbatoio riscaldandola
- il serbatoio di accumulo dell'acqua riscaldandola con l'aggiunta eventualmente di una pompa per la circolazione forzata dell'acqua
- i collegamenti e tubazioni idrauliche del circuito
- la staffe metalliche di montaggio per la posa in opera.

Le differenze (tecnologiche, di materiali impiegati, di costo, etc) sono originate dall'adattamento della tecnologia alle diverse necessità degli utenti ed anche alle diverse condizioni di installazione e di impiego: sono così disponibili pannelli sottovuoto, pannelli solari vetrati, pannelli vetrati ad aria calda, pannelli scoperti.

## Solare fotovoltaico.

La cella fotovoltaica è l'elemento più elementare capace di operare la conversione, in grado di produrre circa 1/1,5 Watt di potenza quando è investita da una radiazione di 1000 W/m<sup>2</sup> (condizioni standard di irraggiamento). Molte celle assemblate e collegate tra di loro in una unica struttura formano il modulo fotovoltaico. Un modulo fotovoltaico è costituito da 36 celle, ha una superficie di circa mezzo metro quadrato ed eroga, in condizioni ottimali tra 40 e 50 W.

Un insieme di moduli, connessi elettricamente tra loro, formano il campo fotovoltaico che, insieme ad altri componenti meccanici, elettrici ed elettronici, consente di realizzare i sistemi fotovoltaici. Il sistema fotovoltaico nel suo insieme, capta e trasforma la radiazione solare incidente e la rende disponibile per l'utenza sotto forma di energia elettrica.

---

# Le tecnologie.

Le tecnologie disponibili:

- celle fotovoltaiche in silicio monocristallino: il silicio a cristallo singolo, o monocristallino, è ottenuto da un processo detto di melting a partire da cristalli di silicio di elevata purezza che, una volta fusi, vengono fatti solidificare a contatto con un seme di cristallo. Durante il raffreddamento, il silicio gradualmente si solidifica nella forma di un lingotto cilindrico di monocristallo del diametro di 13 , 20 cm, con una lunghezza che può raggiungere i 200 cm. In un momento successivo, il lingotto viene tagliato con speciali seghe a filo, in fettine dette wafers con spessore di 250 , 350 mm
  - celle fotovoltaiche in silicio policristallino: in alternativa al silicio monocristallino, l'industria fotovoltaica utilizza anche il silicio policristallino che ha costi di produzione inferiori e nel quale i cristalli si presentano ancora aggregati tra loro ma con forme e orientamenti differenti. L'affinamento del processo produttivo delle celle di silicio policristallino consente ormai di realizzare celle con prestazioni elettriche solo di poco inferiori rispetto a quelle di silicio monocristallino
  - celle fotovoltaiche in silicio amorfo: è stato il primo e l'unico film antagonista del cristallino per tutti gli anni '80 e '90. Dal lancio sul mercato ad oggi la tecnologia amorfa è quella che ha realizzato i maggiori progressi sviluppando soluzioni sofisticate ed attenuando molti dei suoi problemi tecnologici: a questo proposito, va considerato che proprio negli anni '90 lo sviluppo del cristallino ha avuto un naturale rallentamento dovuto alla necessità delle industrie di recuperare parte degli investimenti di ricerca del decennio precedente. A differenza della tecnologia cristallina nella quale il materiale semiconduttore si presenta solido in forma di wafers con spessore di qualche centinaio di micron, in questo caso la materia attiva può essere ottenuta in forma di gas con il vantaggio di poter essere depositata in strati spessi pochi micron e su di una grande varietà di superfici di appoggio. Il contenuto di silicio rispetto al cristallino è quindi in linea con la limitata disponibilità di materiale attivo ottenuto come scarto dell'industria elettronica che si sta profilando all'orizzonte. Si possono così ottenere film di spessore totale pari a 1-2 millimetri, anche flessibili (per esempio, silicio amorfo depositato su una lastra di 0,5 millimetri di alluminio) e leggerissimi. Purtroppo la natura stessa del silicio amorfo, che non presenta una struttura molecolare definita (a cristalli), limita notevolmente la prestazione elettrica in termini di efficienza che rimane ben al di sotto di quella del cristallino. Rimangono, in oltre da risolvere una serie di problemi legati alla stabilità delle prestazioni nel tempo. L'amorfo perde poco meno del 10% delle prestazioni di potenza dichiarate dal costruttore nelle prime 300-400 ore di esposizione. Questo comporta difficoltà: - nello stabilire a priori le vere prestazioni dell'impianto realizzato dopo il degrado iniziale; - confrontare economicamente, in termini di costi/prezzi dei moduli a watt, l'amorfo con altre scelte a pari potenza acquistata. L'aspetto estetico di questi moduli è decisamente attraente con la possibilità di realizzare moduli flessibili, e quindi prodotti prevalentemente ad uso architettonico o in sostituzione agli elementi edilizi.
  - celle fotovoltaiche a film sottile: sono composte da strati di materiale semiconduttore (non sempre è presente il silicio) depositati generalmente come miscela di gas su supporti a basso costo come vetro, polimero
-

, alluminio che danno consistenza fisica alla miscela. La deposizione di un gas consente l'immediato beneficio di un utilizzo minore di materiale attivo: lo spessore si riduce da 300 micron delle celle cristalline a 4-5 micron di quella a film sottile. Inoltre, il processo produttivo dei film sottili consente una riduzione delle fasi di lavorazione che, oltretutto e a differenza del cristallino, possono essere automatizzate.

- celle CIS (Copper indium Diselenide) e CIGS (Copper Indium Gallium diselenide): queste celle utilizzano substrati di basso costo e processi di produzione facilmente automatizzabili e quindi idonei a produzioni di grandi volumi. Questi prodotti hanno dimostrato affidabilità nell'utilizzo in esterno e stabile efficienza nel tempo. Entrambe le tecnologie hanno dimostrato buone caratteristiche elettriche. I moduli CIS sono già presenti commercialmente. Il CIS viene alla ribalta del mondo fotovoltaico quando nel 1988 la prima cella da laboratorio raggiunge l'11% di efficienza. Nei sette anni di ricerca che seguirono i risultati stentavano ad arrivare e solo alcune soluzioni produttive brillanti a metà degli anni '90 accelerarono lo sviluppo. Il CIGS, e ancora più recentemente il CIGSS (con l'aggiunta di zolfo) è un derivato che consente di aumentare l'efficienza elettrica di conversione. Nonostante la più intuitiva complessità di realizzazione, fortunatamente l'aggiunta di un composto nel mix di produzione ha consentito una maggior flessibilità del processo non gravando sui costi totali. Contrariamente a quanto accade per il silicio amorfo, la stabilità delle prestazioni in esterno del CIS-CIGS è notevole e prove in campo che durano da ormai 7 anni provano che non c'è degrado della potenza. Viceversa lo stato di maturità della tecnologia sul piano della uniformità di produzione (celle o moduli di simili caratteristiche elettriche) è ancora insufficiente. L'ingegneria chimico-fisica dei dispositivi CIS e CIGS è prevista con l'utilizzo di materiali di base piuttosto costosi anche se si ottengono buone prestazioni anche con materiali di qualità intermedia. La peculiarità di poter essere realizzate su substrati anche flessibili le rendono, in prospettiva, attraenti anche per gli usi architettonici.
- celle a film sottile in CdTe (Telloruro di Cadmio): questi moduli sono un'altra nuova tecnologia oramai sulla via della commercializzazione. Linee di produzione sono in allestimento in questi anni negli Stati Uniti, mentre in Giappone già da anni si costruiscono piccole celle che equipaggiano le calcolatrici solari. Il materiale è un semiconduttore con caratteristiche vicine a quelle delle efficienti ma costose celle all'arseniuro di gallio (GaAs) realizzate per le applicazioni spaziali. Il processo costruttivo è tecnologicamente semplice e produce una cella con buone caratteristiche meccaniche di resistenza e reazione agli stress termici. Il processo tipico è definito "sublimazione in spazio chiuso" e permette la costruzione di celle con efficienze maggiori del 15%. La tipica cella CdTe è a quattro strati e tre giunzioni per migliorare le caratteristiche di assorbimento dello spettro solare, ma nonostante questo può essere realizzata con spessori molto ridotti che aiutano a contenere i costi. Sino al 1999 le migliori prestazioni erano state raggiunte con celle caratterizzate da uno strato attivo di soli 3.5 micron, ma attualmente spessori di 5-10 micron sono alla portata delle nuove tecniche di produzione. I primi impianti fotovoltaici formati da moduli prototipo sono apparsi nei campi prova intorno ai primi anni '90. l'efficienza massima ottenuta in laboratorio è stata del 16% su celle di 1 cm<sup>2</sup> e del 10% su moduli prototipo. Per valutare la tecnologia si deve osservare che il record riportato è stato ottenuto parecchi anni or sono e che da allora non è stato più migliorato nonostante l'introduzione di numerosi processi di

- produzione evoluti. Dal punto di vista industriale la tecnologia CdTe “soffre” di un problema che altre nuove tecnologie non hanno: esistono molti metodi di produzione e tutti hanno molto margine di miglioramento. Dagli anni '90 fino ad oggi si è cercato di dare una risposta ad una serie di problemi tecnici che ostacolavano il processo di maturità tecnologica. Da subito si notò come, nonostante buoni risultati di efficienza sulle celle, i moduli formati dall'insieme delle celle fornissero un'efficienza nettamente più bassa. Inoltre, a fronte della facilità di realizzazione di buone celle, si notò come le stesse avessero o eccellente o povera stabilità. La spiegazione, tutt'altro che banale, sembra ancora parzialmente aperta nonostante sia già avanzata la preindustrializzazione del prodotto.



# Le applicazioni del fotovoltaico.

La tecnologia fotovoltaica consente la conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica. La conversione avviene per mezzo di celle fotovoltaiche che devono essere collegate elettricamente tra loro a formare i moduli che dovranno essere orientati quanto più possibile perpendicolarmente alla radiazione solare. I moduli fotovoltaici possono essere usati sia singolarmente (un modulo da 36 celle può caricare una batteria da 12 V) che collegati tra loro in serie e parallelo così da formare stringhe e campi fotovoltaici.

Il motivo per cui la maggior parte dei moduli fotovoltaici commerciali è composta da 36 celle in serie dipende dalle prime applicazioni che vedevano questi dispositivi collegati stabilmente ad accumulatori al piombo al fine di assicurarne un buon stato di carica.

A tutt'oggi, in relazione alle esigenze di applicazioni anche per grandi potenze, l'industria fotovoltaica realizza moduli commerciali di potenza ed area doppia (72 celle, circa 130W).

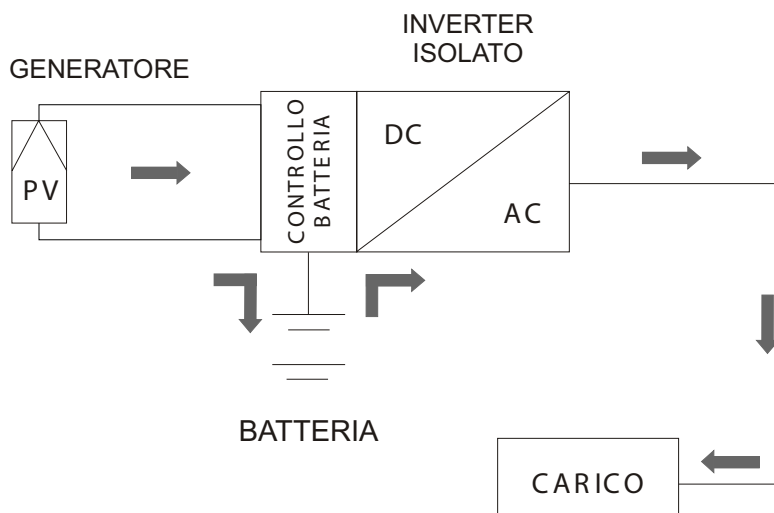
L'energia prodotta da un generatore fotovoltaico viene solo raramente utilizzata direttamente dalle utenze elettriche collegate. In genere, invece, tra produzione e utenza sono interposti dispositivi e circuiti con funzioni elettriche ben precise.

Per compensare l'aleatorietà della fonte solare rispetto alle richieste di un carico elettrico si fa ricorso all'uso di batterie di accumulatori.

Quando poi, infine, è necessario disporre di energia elettrica sotto forma di corrente alternata a 230V monofase o 400V trifase con caratteristiche del tutto analoghe alle forniture in bassa tensione esercitate dalle società distributrici di energia elettrica, l'utilizzo di convertitori statici o inverter è una strada obbligata. In alcuni casi provvedono ad effettuare anche il parallelo delle stringhe fotovoltaiche e ad acquisire dati di funzionamento gestendone la trasmissione verso un computer di controllo.

Va inoltre ricordato che, in alcuni casi, gli impianti fotovoltaici possono interagire con altre fonti energetiche rinnovabili (ad esempio nel caso degli impianti eolico/fotovoltaici) e/o avvalersi di gruppi elettrogeni tradizionali per far fronte a lunghi periodi di maggior consumo e minore produzione.

Le prestazioni, i componenti impiegati e la taglia dei sistemi fotovoltaici dipendono dalle specifiche applicazioni, ma sono in linea di massima raggruppabili in due macro-categorie.





# Tipi di impianto.

L'insieme del generatore fotovoltaico e del sistema di controllo e condizionamento della potenza costituisce l'impianto fotovoltaico. Ne esistono fondamentalmente di due tipi.

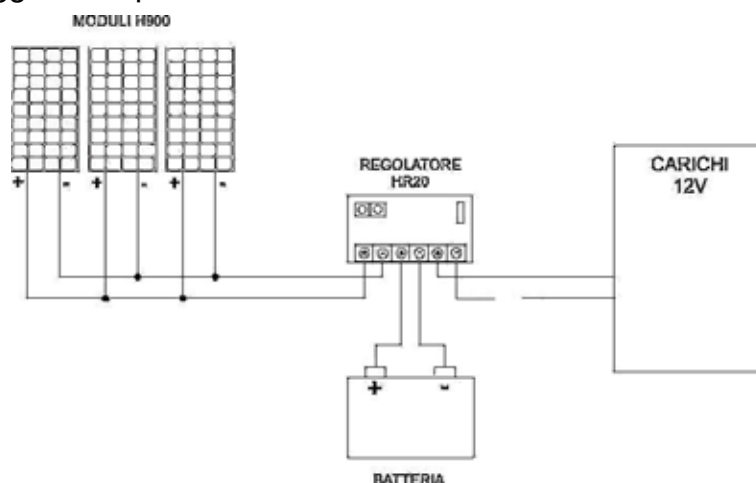
Impianti isolati dalla rete (detti stand-alone o off-grid):

I sistemi autonomi, sono quelli in cui l'energia elettrica che viene prodotta in eccedenza rispetto al carico elettrico, viene accumulata all'interno di batterie, al fine di poter essere utilizzata in momenti di bassa insolazione o di buio. Questo tipo di sistema si applica bene a ripetitori radio, utenze isolate, lampioni fotovoltaici, etc.

- servizio: comprendono quelle applicazioni per carichi di piccola potenza in servizio isolato dalla rete come pompaggio di piccole quantità d'acqua per uso sanitario, alimentazione ripetitori telefonici e radio, carica batteria per imbarcazioni da diporto, camper, ecc.;
- utenze isolate: in genere di tipologia identificabile come domestica con distribuzione dell'energia in corrente continua o, per fabbisogni energetici maggiori, in corrente alternata come rifugi alpini, seconde case, ecc.;
- mini-rete isolate: costituite da impianti con potenza fotovoltaica di qualche decina di kW, distribuzione in alternata spesso trifase e con back-up di un gruppo diesel-elettrico, dedicati all'elettrificazione di villaggi o comunità isolate dalla rete di distribuzione. La presenza del gruppo diesel, che può essere parte integrante della generazione elettrica, fa chiamare questi impianti ibridi.

L'impianto è composto da:

- Moduli Fotovoltaici: raggruppamenti piani di celle, di potenza che va dai 20 ai 100 Watt di picco, erogati nelle condizioni di illuminamento nominale. I pannelli vanno rivolti a sud con un'inclinazione, in gradi, rispetto al piano orizzontale, pari alla latitudine del luogo. Considerando che l'intensità dell'illuminazione solare varia durante il giorno e nel corso dei mesi, si può dire che l'energia media prodotta da un m<sup>2</sup> di pannello è di circa 450 Wattora al giorno
- Inverter: la corrente generata dai pannelli fotovoltaici è di tipo continuo; visto che la maggior parte delle apparecchiature elettriche richiede la corrente alternata si utilizza un dispositivo elettrico, l'inverter, capace di trasformare l'energia elettrica da continua ad alternata
- Sistema d'accumulo dell'energia elettrica: si tratta di un sistema regolazione della carica degli accumulatori necessario per evitare danneggiamenti per difetto o eccesso di carica.





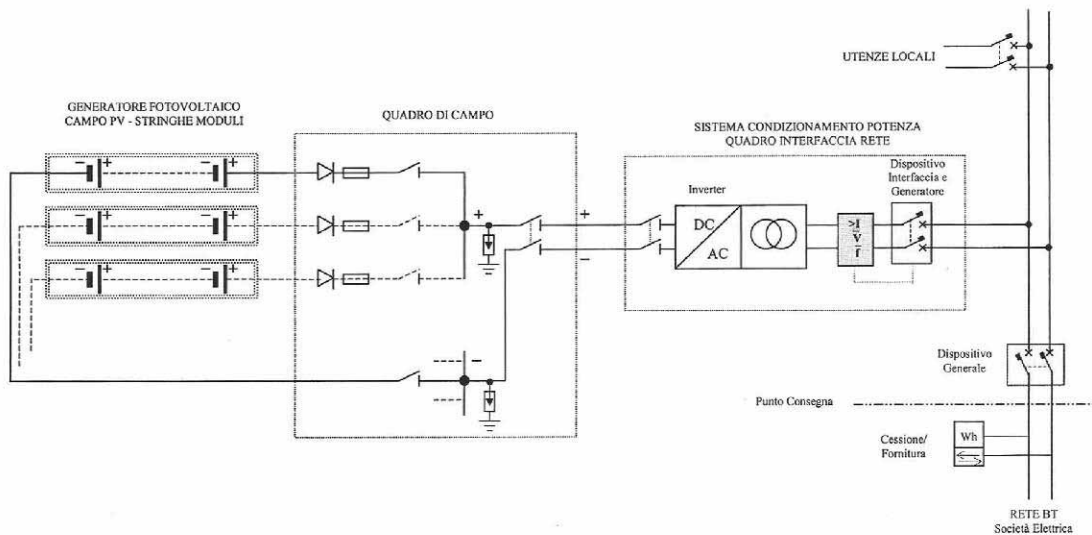
# Tipi di impianto.

Impianti collegati alla rete elettrica (detti grid-connected):

Nei sistemi connessi alla rete, l'energia prodotta viene convertita in corrente elettrica alternata, e nel caso questa non venga utilizzata, viene immessa nella rete elettrica nazionale e contabilizzata con un contatore doppio, in grado di gestire la corrente in entrata e quella in uscita.

- tetti fotovoltaici: impianti di potenza contenuta (qualche kW) che iniettano l'energia prodotta in rete e che sono installati su spazi marginali (come le coperture degli edifici);

- centrali fotovoltaiche. Con potenze installate considerevoli e di taglia modulare in quanto costituite da unità di generazione base (sottocampi) con potenze fino a 500kW.



# Finanziamenti.

In Italia esistono dei programmi in materia di energie alternative.

I più importanti:

- Solare termico
- Tetti fotovoltaici
- Isole minori
- Fonti rinnovabili nelle aree naturali protette
- Efficienza energetica.

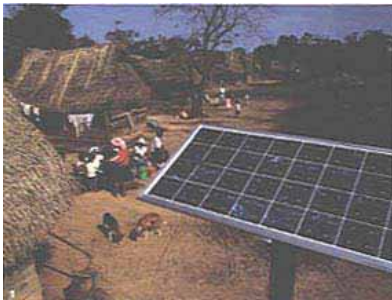
Si può prendere visione dei programmi all'indirizzo internet:

<http://www.minambiente.it>.

# Aspetti ambientali ed architettonici.

I vantaggi e gli svantaggi, di tale sistema possono essere classificati, quali:

- produzione di energia elettrica: energia questa di alto valore che può essere impiegata in modi molto diversi
- assenza di combustibile
- miglioramento dell'ambiente, in quanto non avviene la produzione di rumori, sprechi, emissioni o dispersioni di calore
- modularità dei sistemi, che permette l'installazione di questi in piccole unità, in prossimità al punto di consumo dell'energia
- tecnologia collaudata e matura in uso da 30 anni, e tra le tecnologie energetiche più promettenti del futuro;
- è necessario un utilizzo diffuso negli edifici al fine di dare una produzione significativa di energia
- possibile miglioramento delle condizioni di vita delle popolazioni rurali del Terzo Mondo
- modularità del sistema
- versatilità
- assenza di parti in movimento, che consentono ridotte esigenze di manutenzione
- facilità di integrazione nel contesto urbano.



La tecnologia fotovoltaica si presenta con un alto grado di versatilità e quindi può essere introdotta all'interno di numerosi campi d'applicazione, passando da minisistemi da milliwatt, quali calcolatrici solari, a sistemi di Megawatt, nel caso delle centrali fotovoltaiche, oppure, dall'alimentazione di satelliti nello spazio, a utenze isolate nel deserto.

L'applicazione però, che sembra essere più promettente, è quella dell'integrazione del fotovoltaico negli edifici.

Infatti, i moduli fotovoltaici integrati in un edificio non richiedono spazio addizionale, riducendo quindi costi e utilizzo del suolo, qualora vengano veramente integrati in un edificio, ad esempio una facciata fotovoltaica, gli elementi convenzionali dell'edificio possono essere omessi.



Un inserimento degli elementi ben progettato architettonicamente può migliorare l'aspetto dell'edificio, e allo stesso tempo può rappresentare una caratteristica pregevole, dal punto di vista estetico. Generalmente un edificio con elementi fotovoltaici integrati è immediatamente percepibile, stimolando spesso discussioni e imitazioni.

L'uso di sistemi fotovoltaici in un edificio è un'affermazione molto visibile dell'interesse dei proprietari verso i temi del risparmio energetico e della difesa dell'ambiente.

A questo proposito i moduli fotovoltaici possono essere impiegati per:

- copertura di tetti
- rivestimenti di facciate (in restauro e rinnovo ad esempio)
- elementi montanti e traverse o facciate continue
- elementi di schermatura dal sole quali pensiline poste davanti alle finestrate
- schermatura solare per lucernari
- pensiline per parcheggi
- sistema di alimentazione per apparecchiature isolate
- possono essere presi in considerazione al fine dell'installazione di elementi fotovoltaici, vaniscala, ascensori e pareti senza finestre.

L'integrazione e il rendimento energetico vengono ottimizzati nel momento in cui l'implementazione dei sistemi fotovoltaici è prevista sin dalla fase di progettazione dell'edificio e se è disponibile un'area inclinata e senza ombre.



L'elettricità generata dal fotovoltaico offre più vantaggi dei generatori diesel, delle batterie usa e getta, e perfino della alimentazione convenzionale. Questi benefici rendono il fotovoltaico l'energia scelta in molti e molti casi ogni giorno:

- alta affidabilità
- bassi costi di manutenzione
- benefici ambientali
- modularità
- bassi costi di costruzione.

**Alta affidabilità.**

Le celle fotovoltaiche sono state originariamente sviluppate per l'uso nello spazio, dove la riparazione è estremamente costosa, se non impossibile. Il fotovoltaico alimenta ancora ogni satellite in orbita attorno alla terra in quanto è operativo per lunghi periodi con quasi nessun intervento di manutenzione.

Bassi costi di manutenzione.

Le celle fotovoltaiche utilizzano l'energia solare per produrre elettricità: quindi in questo caso il combustibile è libero. Con parti non movibili, le celle richiedono poca manutenzione. La bassa manutenzione, e i costi effettivi dei sistemi fotovoltaici sono l'ideale per fornire alimentazione alle stazioni di comunicazione in alta montagna, per le boe di navigazione in mare, o per gli edifici lontani dalle linee elettriche.

Benefici ambientali.

Non utilizzando combustibili e non avendo parti movibili, i sistemi fotovoltaici sono puliti e silenziosi. Questo è molto importante dove le alternative principali per ottenere l'elettricità e la luce solo attraverso i generatori diesel e le lanterne a kerosene. Mentre diventiamo più coscienti dei "gas serra" e dei loro effetti nocivi sul pianeta, tra le energie alternative pulite il fotovoltaico è diventato uno dei più importanti.

Modularità.

I sistemi fotovoltaici possono essere costruiti per ogni misura di energia richiesta. In oltre il proprietario di un sistema fotovoltaico può allargare il sistema o spostarlo se le sue esigenze energetiche cambiano. Per esempio, i proprietari di una abitazione possono aggiungere dei moduli con il passare degli anni mentre si sviluppano energia e mezzi finanziari.

Bassi costi di costruzione.

Meno collegamenti significa bassi costi, minor tempo di costruzione e riduzione della burocrazia, specialmente per le aree urbane.

Usi e applicazioni.

Oggi, i generatori solari di elettricità servono la popolazione per la vita quotidiana in molti luoghi isolati e allo stesso tempo nei centri delle nostre grandi città. I sistemi fotovoltaici che vennero usati per la prima volta all'interno di programmi spaziali, sono gli stessi che ora vengono utilizzati per i generatori elettrici per il pompaggio dell'acqua, per l'illuminazione notturna, per l'attivazione di interruttori, carica batterie, e molto altro.

Sono da considerare ancora le coperture dei capannoni industriali che possono essere utilizzate per ospitare generatori fotovoltaici, trattandosi spesso di ampie superfici.

Un caso comune è quello degli shed, o lucernari con la superficie verticale rivolta verso nord, per evitare che la luce solare entrando direttamente provochi effetti di abbagliamento dall'interno. Quando gli shed sono verso sud offrono una superficie che può essere sfruttata per alloggiare moduli fotovoltaici.

L'utilizzo degli elementi fotovoltaici in arredo urbano costituisce una tendenza progettuale sempre più in diffusione, tanto che ai lampioni fotovoltaici vanno affiancandosi innumerevoli altre applicazioni, quali, pensiline, coperture frangisole, insegne commerciali provvisorie, barriere autostradali antirumore.

Ancora progetti di centri urbani, infopoint, chioschi alimentati dal fotovoltaico e posizionati all'ingresso delle città che forniscono informazioni utili sui servizi che la città è in grado di offrire.

---

# Glossario.

Ampère (A) - Unità di misura della corrente elettrica; equivale a un flusso di carica in un conduttore pari ad un Coulomb per secondo.

Ampèrora (Ah) - Quantità di elettricità equivalente all'energia corrispondente al flusso di una corrente di un ampère per un'ora.

Array - V. campo fotovoltaico.

Batterie di accumulatori - Dispositivi capaci di convertire energia elettrica in energia chimica e viceversa. Nella fase di carica vengono utilizzati per immagazzinare l'energia elettrica, che poi sarà restituita, secondo necessità, in fase di scarica. In genere, si utilizzano più accumulatori collegati insieme (batterie di accumulatori).

Campo fotovoltaico - Insieme di moduli fotovoltaici, connessi elettricamente tra loro e installati meccanicamente nella loro sede di funzionamento.

Capacità della batteria - Quantità di elettricità accumulata da una batteria di accumulatori e quindi erogabile dalla stessa ad un determinato regime fino a una tensione prestabilita. Si misura in Ampèrora (Ah).

Capacità nominale - Capacità dichiarata dal costruttore per una certa batteria. La capacità nominale è riferita ad un regime di scarica di 10 ore e alla temperatura di 25°C: viene indicata con il simbolo C10. Si misura in Ampèrora (Ah).

Carico elettrico - Quantità di potenza elettrica istantanea consumata da un qualunque utilizzatore elettrico (W).

Cella fotovoltaica - Elemento base della generazione fotovoltaica, costituita da materiale semiconduttore opportunamente 'drogato' e trattato, che converte la radiazione solare in elettricità.

ChiloWatt (kW) - Multiplo dell'unità di misura della potenza, pari a 1.000 Watt.

ChiloWattora (kWh) - Unità di misura dell'energia. Un chilowattora è l'energia consumata in un'ora da un apparecchio utilizzatore da 1 kW.

Ciclo di vita o durata di una batteria - Valore convenzionale che indica il numero di cicli di carica e scarica che la batteria può effettuare prima di cessare il funzionamento. Esso è di solito accompagnato da limitazioni sulle modalità dei cicli di carica e scarica.

Conversione fotovoltaica - Fenomeno per il quale la luce incidente su un dispositivo elettronico a stato solido (cella fotovoltaica) genera energia elettrica.

Convertitore CA/CC, raddrizzatore - Dispositivo che converte la corrente alternata in continua.

Convertitore CC/CA, inverter - Dispositivo che converte la corrente continua in corrente alternata.

Corrente - Flusso di cariche elettriche in un conduttore tra due punti aventi una differenza di potenziale (tensione). Si misura in A (Ampère).

---

Dispositivo fotovoltaico - Cella, modulo, pannello, stringa o campo fotovoltaico.

Efficienza (in %) - Rapporto tra la potenza (o l'energia) in uscita e la potenza (o l'energia) in ingresso.

Efficienza di conversione di un dispositivo fotovoltaico (in %) - Rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia solare raccolta dal dispositivo fotovoltaico.

Energia - In generale, si misura in J (Joule); quella elettrica che qui interessa si misura in Wh (Wattora) ed equivale all'energia resa disponibile da un dispositivo che eroga un Watt di potenza per un'ora:

- 1 Wh = 3.600 J

- 1 cal = 4,186 J

- 1 Wh = 860 cal

Film sottile - È il prodotto della tecnologia che sfrutta la deposizione di un sottilissimo strato di materiali semiconduttori per la realizzazione della cella fotovoltaica.

Fotovoltaico - Termine composto da "foto", dal greco "luce" e "voltaico", da Alessandro Volta, lo scienziato italiano che fu tra i primi a studiare i fenomeni elettrici.

Generatore fotovoltaico - Generatore elettrico costituito da uno o più moduli - o pannelli, o stringhe - fotovoltaici.

Grid- Rete elettrica di distribuzione.

Inseguitore del punto di massima potenza, MPPT - Apparecchiatura elettronica di interfaccia tra l'utilizzatore e il generatore fotovoltaico, tale che il generatore fotovoltaico "veda" sempre ai suoi capi un carico ottimale per cedere la massima potenza. Al variare delle condizioni esterne (temperatura, irraggiamento) l'inseguitore varia il suo punto di lavoro, in modo da estrarre dal generatore sempre la massima potenza disponibile e cederla al carico.

Inverter - Vedi convertitore CC/CA.

Irraggiamento - Radiazione solare istantanea (quindi una potenza) incidente sull'unità di superficie. Si misura in kW/m<sup>2</sup>. L'irraggiamento rilevabile all'Equatore, a mezzogiorno e in condizioni atmosferiche ottimali, è pari a circa 1.000 W/m<sup>2</sup>.

Maximum Power Point Tracker (MPPT) - Vedi Inseguitore del punto di massima potenza.

Modulo fotovoltaico - Insieme di celle fotovoltaiche collegate tra loro in serie o parallelo, così da ottenere valori di tensione e corrente adatti ai comuni impieghi, come la carica di una batteria. Nel modulo, le celle sono protette dagli agenti atmosferici da un vetro sul lato frontale e da materiali isolanti e plastici sul lato posteriore.

Pannello fotovoltaico - Insieme di più moduli, collegati in serie o in parallelo, in una struttura rigida.



Potenza - È l'energia prodotta nell'unità di tempo. Si misura in  $W = J/s$  ( $W = \text{Watt}$ ;  $J = \text{Joule}$ ;  $s = \text{secondo}$ ). Dal punto di vista elettrico il  $W$  è la potenza sviluppata in un circuito da una corrente di  $1 \text{ A}$  (Ampère) che attraversa una differenza di potenziale di  $1 \text{ V}$  (Volt). La potenza elettrica è quindi data dal prodotto della corrente ( $I$ ) per la tensione ( $V$ ). Multipli del  $W$ :

- chilowatt:  $kW = 10^3 \text{ W}$

- megawatt:  $MW = 10^6 \text{ W}$

- gigawatt:  $GW = 10^9 \text{ W}$

- terawatt:  $TW = 10^{12} \text{ W}$

Potenza di picco ( $W_p$ ) - È la potenza massima prodotta da un dispositivo fotovoltaico in condizioni standard di funzionamento (irraggiamento  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura  $25^\circ\text{C}$ ).

Radiazione solare - Energia elettromagnetica che viene emessa dal sole in seguito ai processi di fusione nucleare che in esso avvengono. La radiazione solare (o energia) al suolo viene misurata in  $\text{kWh/m}^2$ .

Raddrizzatore - Vedi convertitore CA/CC.

Regolatore di carica - Dispositivo che controlla la velocità di ricarica e lo stato di carica delle batterie.

Semiconduttori - Materiali con caratteristiche elettriche intermedie tra quelle dei conduttori e degli isolanti. Tra di essi vi è il silicio.

Silicio - Materiale semiconduttore usato per costruire celle fotovoltaiche.

Silicio amorfo - Tipo di silicio per celle fotovoltaiche che non ha struttura cristallina.

Silicio cristallino - Tipo di silicio a struttura cristallina (monocristallino o policristallino).

Silicio monocristallino - Silicio costituito da un singolo cristallo.

Silicio policristallino - Silicio costituito da più cristalli.

Silicio solare - Silicio, prodotto appositamente per l'industria fotovoltaica o di scarto dell'industria elettronica, avente caratteristiche di purezza sufficienti per la preparazione delle celle solari.

Sistema fotovoltaico - Sistema costituito da moduli fotovoltaici e altri componenti progettato per fornire potenza elettrica a partire dalla radiazione solare.

Sistema fotovoltaico connesso in rete - Sistema fotovoltaico collegato alla rete di distribuzione dell'energia elettrica.

Sistema fotovoltaico grid-connected - Vedi sistema fotovoltaico connesso in rete.

Sistema fotovoltaico isolato - Sistema fotovoltaico non collegato alla rete elettrica di distribuzione.

---

Sistema fotovoltaico stand-alone - Vedi sistema fotovoltaico isolato.

Sottocampo - Collegamento elettrico in parallelo di più stringhe. L'insieme dei sottocampi costituisce il campo fotovoltaico.

Stand-alone - Vedi sistema fotovoltaico isolato o ad isola.

Stringa - Insieme di moduli o pannelli collegati elettricamente in serie per ottenere la tensione di lavoro del campo fotovoltaico.

Tensione - Differenza di potenziale elettrico tra due corpi o tra due punti di un conduttore o di un circuito. Si misura in V (Volt).

Tensione alternata - Tensione tra due punti di un circuito che varia nel tempo con andamento di tipo sinusoidale. È la forma di tensione tipica dei sistemi di distribuzione elettrica, come pure delle utenze domestiche e industriali.

Tensione continua - Tensione tra due punti di un circuito che non varia di segno e di valore al variare del tempo. È la forma di tensione tipica di alcuni sistemi isolati (ferrovie, navi) e degli apparecchi alimentati da batterie.

Tonnellata equivalente di petrolio (Tep) - Unità di misura dell'energia adottata per misurare grandi quantità di questa, ad esempio nei bilanci energetici e nelle valutazioni statistiche. Equivale all'energia sviluppata dalla combustione di una tonnellata di petrolio. Essendo il potere calorifico del petrolio grezzo pari a 41.860 kJ/kg, un tep equivale a  $41.860 \cdot 10^3$  kJ.

Volt (V) - Unità di misura della tensione esistente tra due punti in un campo elettrico. Ai capi di una cella fotovoltaica si stabilisce una tensione di circa 0,5 Volt; circa 17 Volt ai capi di un tipico modulo fotovoltaico (nel punto di massima potenza).

Wafer - Fetta di silicio di spessore variabile da 250-350 mm (millesimi di millimetro) ottenuta dal taglio dei lingotti di silicio prodotti con la fusione del silicio di scarto dell'industria elettronica. Dopo diversi trattamenti il wafer diventa cella fotovoltaica.

Watt (W) - Unità di misura della potenza elettrica. È la potenza sviluppata in un circuito da una corrente di un Ampère che attraversa una differenza di potenziale di un Volt. Equivale a 1/746 di Cavallo Vapore (CV).

Watt di picco (Wp) - Unità di misura usata per indicare la potenza che un dispositivo fotovoltaico può produrre in condizioni standard di funzionamento (irraggiamento 1.000 W/m<sup>2</sup> e temperatura 25°C).

Wattora (Wh) - Unità di misura di energia: equivale ad un Watt per un ora.

---

# Bibliografia.

Appunti e materiali universitari.

Impieghi dell'energia solare Prof. Ing. Aurelio C. Robotti, edizioni UTET, 1976.

Elettricità dal sole Wolfgang Palz, edizione Tecniche Nuove, 1981.

La corretta realizzazione degli impianti fotovoltaici Giorgio Rodolfi, edizione Il Rostro, 2000.

Renewable Energy World, Review Issue (rivista).

Enel Green Power - [www.enelgreenpower.com](http://www.enelgreenpower.com)

[www.nrel.gov/ncpv/](http://www.nrel.gov/ncpv/)

[www.soltechitalia.com/impianto-mid.htm](http://www.soltechitalia.com/impianto-mid.htm)

Ministero dell'Ambiente - [www.minambiente.it](http://www.minambiente.it)

---