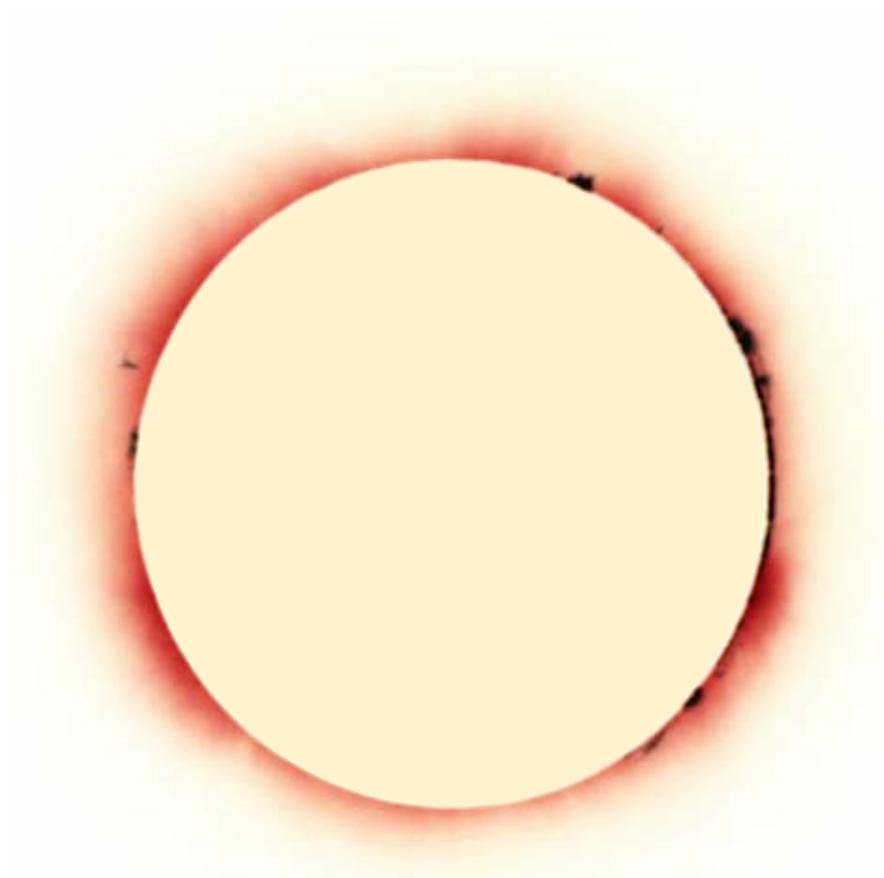
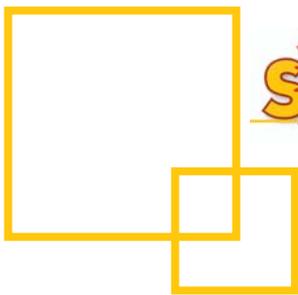


ENERGIA SOLARE

- Sole •
- Radiazione solare •
- Posizione del Sole •
- Energia solare fotovoltaica •

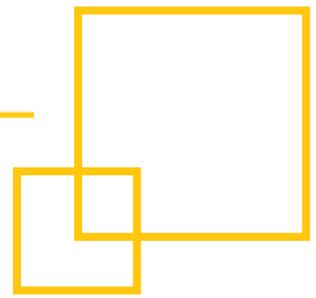




INDICE

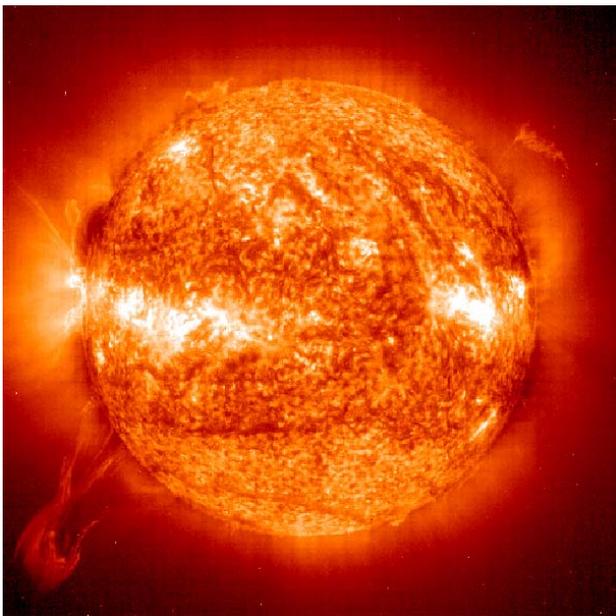
1	Il sole	3
2	La radiazione solare	4
3	Posizione del sole.....	6
4	Sfruttamento energia solare.....	7
5	Energia solare fotovoltaica.....	8
5.1	L'effetto fotovoltaico	8
5.1.1	Un po' di storia.....	8
5.1.2	Un po' di fisica.....	8
5.2	Il pannello fotovoltaico.....	9
5.2.1	Tecnologie costruttive	10
5.2.2	Celle in silicio monocristallino	10
5.2.3	Celle a silicio policristallino.....	10
5.2.4	Pannelli con film in silicio amorfo	11
5.2.5	Prestazioni e rendimenti.....	11
5.2.6	I prodotti in commercio	12
5.3	I sistemi fotovoltaici.....	12

Copyright SOLARTE Italia. Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della presente pubblicazione può essere riprodotta o diffusa senza il permesso scritto di SOLARTE Italia.



1 Il sole

Il sole è la stella centrale del nostro sistema planetario, attorno ad esso ruotano la terra e gli altri otto pianeti conosciuti.



La terra ha un diametro all'equatore di 12757 km contro un diametro del sole di 1391000 km, circa 109 volte maggiore. In termini volumetrici il sole potrebbe contenere la terra oltre un milione di volte!

Eppure il nostro sole, come stella, non è realmente grande: la luminosa stella rossa Betelgeuse ha un diametro di circa 400 volte maggiore rispetto a quello del nostro sole. Il sole non è neppure la stella più luminosa. La stella S. Dorado è circa 500 volte più brillante!

Il fatto sorprendente è che le sue caratteristiche (intensità luminosa, radiazioni emesse, distanza terra-sole, ecc.) sembrerebbero tutte ottimizzate per rendere possibile e confortevole la nostra vita sulla terra.

La massa del sole rappresenta il 99.87% dell'intera massa del sistema solare, con una quantità di materia pari a 2.10^{30} kg. Con ottima approssimazione si può definire quindi come il centro gravitazionale del sistema solare.

La terra compie un'orbita ellittica attorno al sole, la distanza media terra-sole è all'incirca 149.6 milioni di chilometri e varia di circa $\pm 1.7\%$ all'anno. Se la terra fosse solo il 5% più vicina un'imponente surriscaldamento del pianeta si sarebbe verificato già 4 miliardi di anni fa, mentre se fosse solo l'1% più lontana un'imponente glaciazione si sarebbe verificata circa 2 miliardi di anni fa. La luce del sole impiega circa 8 minuti per raggiungere la terra.

Anche il sole si muove, viaggiando a velocità enorme (60000 km/h) attorno alla galassia, con un periodo di rotazione di circa 200 milioni di anni. Inoltre, come gli altri corpi celesti, il sole presenta un moto di rotazione attorno al proprio asse (inclinato di $7^{\circ}15'$ sul piano dell'eclittica).

La velocità angolare del sole varia a seconda della latitudine, cioè ruota più lentamente ai poli che all'equatore. Il periodo di rotazione attorno all'equatore è di circa 27 giorni, mentre ai poli è di circa 32 giorni. Questa insolita rotazione del sole e questi strani rimescolamenti creano all'interno del sole dei campi magnetici che salgono in superficie manifestandosi come "macchie solari" e provocando l'inversione del campo magnetico solare ogni 11 anni.

Il sole è composto principalmente da gas incandescenti. Le altissime temperature presenti al suo interno fanno sì che il gas sia completamente ionizzato, cioè parte degli elettroni sono strappati alle orbite dei rispettivi atomi e si muovono liberamente all'interno del gas. Gli elementi più comuni che lo compongono sono idrogeno (73.46%), elio (24.85%), ossigeno (0.77%), carbonio (0.29%), ferro (0.16%), neon (0.12%), azoto (0.09%), silicio (0.07%), magnesio (0.05%) e zolfo (0.04%).

Al suo interno avvengono reazioni termonucleari a catena ed è per questo assimilabile ad un enorme reattore nucleare, e come tale ha funzionato in modo affidabile per 5 miliardi di anni e continuerà a farlo per ulteriori 5 miliardi di anni.

Le reazioni di fusione che in esso avvengono sono molto complesse, e, semplificando, coinvolgono 4 nuclei atomici di idrogeno che si uniscono per formare 1 nucleo atomico di elio. La massa di

questo ultimo è leggermente minore della somma delle altre e la differenza viene trasformata in energia (secondo la nota formula di Einstein, $E=mc^2$).

Ogni secondo 594 milioni di tonnellate di idrogeno vengono trasformate in 590 milioni di tonnellate di elio, la differenza corrisponde ad una energia di 386 miliardi di miliardi di MJoule, che attraverso una serie di processi radiativi e convettivi viene trasferita sottoforma di calore alla superficie esterna e irradiata in modo uniforme in tutte le direzioni dello spazio.

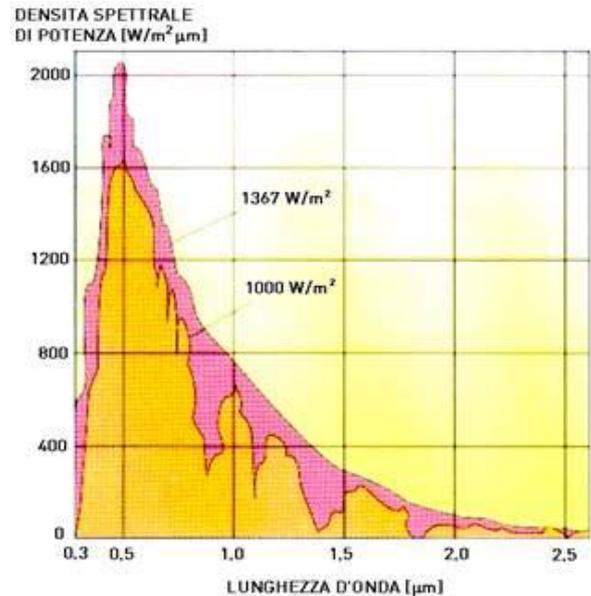
Le riserve di idrogeno nel nucleo non sono però illimitate e la durata di vita di questo processo è di circa 10 miliardi di anni. Poiché l'età attuale del sole è di circa 5 miliardi di anni, tra altri 5 miliardi di anni circa i processi di fusione cesseranno e il sole comincerà a trasformarsi, diventando più freddo e meno luminoso, ovvero una gigante rossa.

Si espanderà sino ad "inghiottire" i pianeti più vicini, dopodiché, terminato il combustibile, rimpicciolirà fino a diventare una nana bianca, ovvero una stella molto calda, piccola, di intensità maggiore, ma destinata a spegnersi lentamente.

2 La radiazione solare

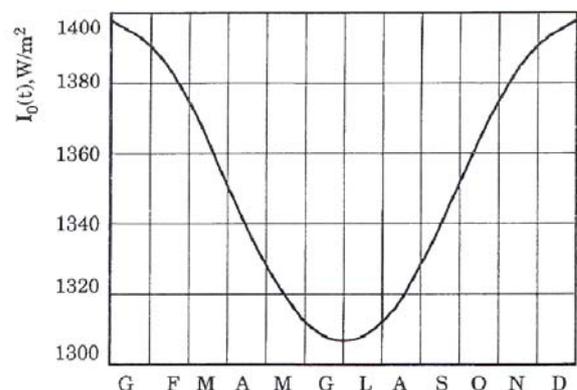
Il sole si comporta come un corpo nero che, alla temperatura di 5780 K (la temperatura esterna del sole), irradia energia nello spazio.

Quasi il 99% della radiazione solare ha lunghezza d'onda compresa tra 0.15 e 4 μm , mentre il massimo di intensità si ha circa a 0.5 μm . La parte compresa tra 0.4 e 0.74 μm occupa la zona visibile dello spettro mentre a sinistra ed a destra di tale fascia si trovano rispettivamente le zone dell'ultravioletto e dell'infrarosso.



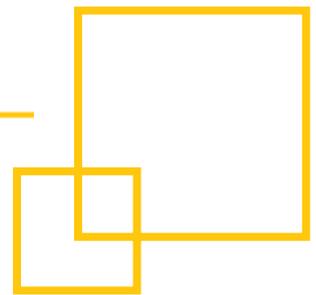
Spettro della radiazione solare

L'intensità della radiazione solare extra atmosferica sulla terra varia con la distanza terra-sole. All'esterno dell'atmosfera terrestre i raggi solari giungono con intensità maggiore durante i mesi di gennaio/dicembre e minore durante i mesi di giugno/luglio.



Andamento annuale della radiazione solare extratmosferica

Questo potrebbe sembrare un controsenso rispetto all'esperienza comune. In realtà le variazioni stagionali della temperatura dipendono poco dalla distanza terra-sole, e molto dall'inclinazione dell'asse terrestre sul piano dell'eclittica (piano dove giace l'orbita della terra attorno al sole), ovvero dall'angolo d'incidenza dei raggi solari sulla terra.



L'orbita della terra attorno al sole è infatti un'ellisse molto poco pronunciata, in pratica assimilabile ad un cerchio, per cui la variazione annua della distanza terra-sole è minima ($\pm 1.7\%$) e alle nostre latitudini la terra è più lontana dal sole durante i mesi estivi, e più vicina durante i mesi invernali.

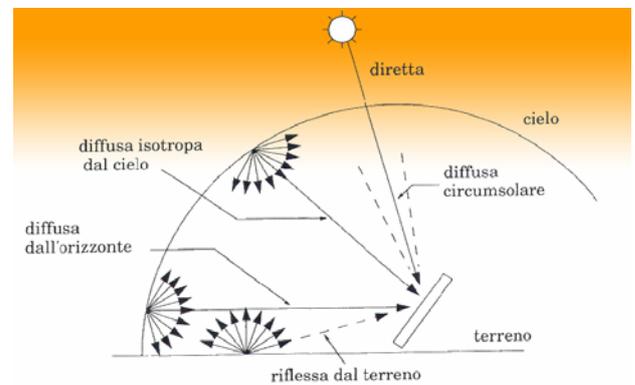
Il valore medio dell'irraggiamento solare extra atmosferico è pari a ca. 1367 W/m^2 , valore noto come costante solare e definito come l'energia media istantanea (potenza) che incide ortogonalmente, nell'unità di tempo, su una superficie unitaria posta al di fuori dell'atmosfera.

L'intensità dell'irraggiamento solare si attenua nel passaggio attraverso l'atmosfera terrestre: una parte di radiazione viene riflessa verso lo spazio, una parte è diffusa in tutte le direzioni dalle molecole dei gas atmosferici e dal vapore acqueo, una parte viene assorbita dalle molecole dell'atmosfera e da queste riemessa come radiazione infrarossa.

La parte di irraggiamento che raggiunge direttamente il suolo costituisce la radiazione diretta mentre la parte rimanente costituisce la radiazione diffusa.

A queste va infine aggiunta la radiazione riflessa o albedo, che rappresenta la percentuale di radiazione diretta e diffusa che viene riflessa dal suolo o dalle superfici circostanti sulla superficie considerata.

L'irraggiamento globale, ottenuto sommando l'irraggiamento diretto, quello diffuso e la componente riflessa, ammonta in condizioni ottimali (cielo chiaro, sereno, mezzogiorno) ad un massimo di 1.0 kW/m^2 , mentre quando il cielo è completamente coperto diminuisce fino a circa 100 W/m^2 .



Componente diretta, diffusa e riflessa dell'irraggiamento solare

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m^2	600 W/m^2	500 W/m^2	400 W/m^2	300 W/m^2	200 W/m^2	100 W/m^2	50 W/m^2
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

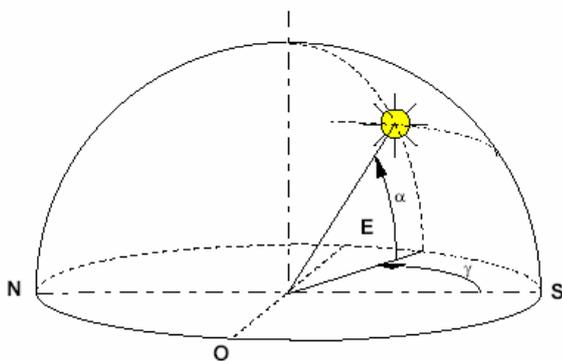
Intensità approssimata della radiazione solare

3 Posizione del sole

Per un osservatore che dalla Terra osservi il cielo, il percorso del Sole sulla volta celeste assume la forma di un arco che varia sia durante il corso dell'anno che con la latitudine del luogo.

Durante il corso dell'anno la durata delle ore di luce ed il percorso del sole subiscono delle modifiche al variare delle stagioni. La durata di luce è massima al solstizio d'estate (21 giugno) giorno in cui, alle ore 12, il sole raggiunge il punto più alto nel cielo nel corso di tutto l'anno; il caso opposto si verifica al solstizio d'inverno (21 dicembre) mentre ai due equinozi di primavera (21 marzo) e di autunno (21 settembre) l'altezza del sole alle 12 è intermedia tra la massima e la minima e le durate del giorno e della notte sono esattamente pari a 12 ore in tutto il globo.

La posizione del sole rispetto ad un punto sulla terra è determinata dall'angolo di altezza solare α e dall'angolo azimutale γ . Il primo è l'angolo verticale che la direzione collimata al sole forma con il piano orizzontale; il secondo è l'angolo orizzontale tra il piano verticale passante per il sole e la direzione del sud, ed è positivo verso est e negativo verso ovest.



Angolo di altezza solare ed angolo azimutale

Questi due angoli dipendono a loro volta dalla declinazione δ , dalla latitudine ϕ e dall'angolo orario ω .

La declinazione δ è l'angolo formato dalla direzione del sole con il piano dell'equatore; varia

durante l'anno da un valore massimo di $-23^{\circ}27'$ in inverno ad un valore di $23^{\circ}27'$ in estate.

La latitudine ϕ è l'angolo formato dalla congiungente il punto di osservazione con il centro della terra e il piano dell'equatore. Essa assume valore 0° all'orizzonte a 90° al polo.

L'angolo orario ω è l'angolo formato dal piano meridiano passante per il sole con il meridiano di riferimento ed assume valori compresi tra -180° e 180° variando di 15° ogni ora.

La posizione del sole in ogni istante dell'anno può essere invece ottenuta dalle seguenti relazioni:

$$\alpha = \arcsin(\sin\delta \cdot \sin\phi + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\omega),$$

$$\gamma = \arcsin \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos\alpha}.$$

Esse consentono di calcolare la posizione del sole conoscendo la latitudine (che caratterizza spazialmente il punto di osservazione), la declinazione (che dipende dal giorno e dal mese in cui si effettua l'osservazione) e l'angolo orario (che dipende dall'ora in cui si effettua l'osservazione).

La declinazione può essere ottenuta con la formula di Cooper:

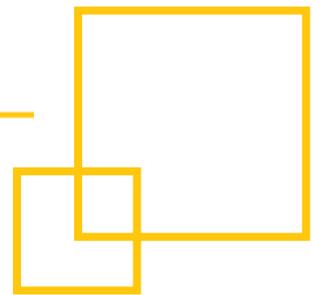
$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + g}{365}\right)$$

in cui g rappresenta i giorni dell'anno trascorsi al 1° gennaio, mentre l'angolo orario è ottenuto con la relazione:

$$\omega = 15 \cdot h_{sol} - 180^{\circ}$$

in cui h_{sol} rappresenta l'ora solare. Questa ultima può essere ottenuta conoscendo l'ora convenzionale e la longitudine del punto di osservazione:

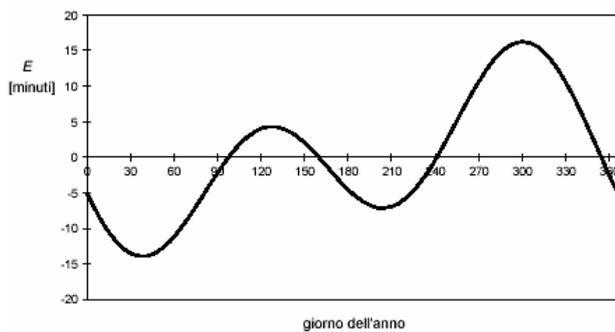
$$h_{sol} = h_{conv} + \frac{E - 4(\lambda_{mr} - \lambda_{oss})}{60}$$



Nella precedente equazione h_{conv} è l'ora data all'orologio, λ_{mr} è la longitudine del meridiano di riferimento, λ_{oss} è la longitudine del punto di osservazione, E rappresenta una correzione, variabile nel corso dell'anno, chiamata *equazione del tempo*.

Il valore di E fluttua poiché la velocità della terra attorno al sole non è costante durante l'anno. Il valore della correzione può essere ricavato dalla seguente relazione:

$$E = -10.1 \cdot \sin\left(360 \frac{2g + 31}{366}\right) - 6.9 \sin\left(360 \frac{g}{366}\right)$$



Equazione del tempo

I valori dell'altezza solare e dell'azimut in qualsiasi periodo dell'anno possono essere facilmente conosciuti utilizzando i diagrammi dei percorsi solari.

Questi sono diagrammi, tracciati per ogni latitudine, in cui sono riportati l'altezza solare e l'azimut nei vari periodi dell'anno. Possono essere in coordinate polari o in coordinate cartesiane. I diagrammi in coordinate cartesiane danno una proiezione verticale del percorso solare così come sarebbe visto da un osservatore posto sulla terra. Sull'asse orizzontale si possono leggere gli azimut mentre su quello verticale le altezze solari. Le traiettorie solari sono tracciate al ventunesimo giorno di ogni mese.

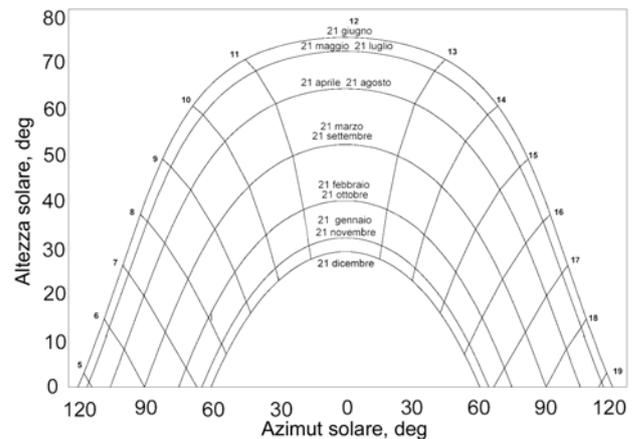
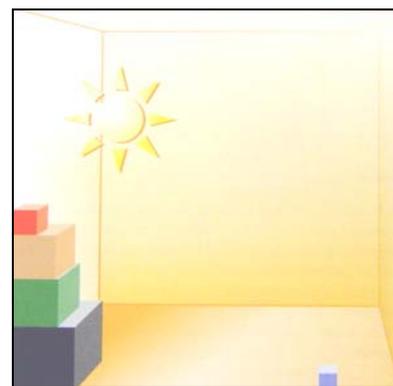


Diagramma dei percorsi solari ($\varphi=38^\circ$)

4 Sfruttamento energia solare

L'energia solare che arriva annualmente sulla terra è la fonte di energia primaria per eccellenza, ha un enorme potenziale di sfruttamento ed eccede di gran lunga le riserve di energia fossile e nucleare.

La domanda mondiale annua di energia è di circa 10 miliardi di TEP e per soddisfarla completamente basterebbe l'energia irradiata dal sole su una superficie quadrata di lato 1000 km. In Italia la domanda annua è di circa 180 milioni di TEP.



Radiazione solare annua paragonata alle riserve disponibili di carbone, petrolio, uranio, gas e alla domanda di energia annuale mondiale



Di quanta solare energia abbiamo bisogno?

5 Energia solare fotovoltaica

In questo paragrafo saranno descritti brevemente le applicazioni solari fotovoltaiche, mentre quelle solari termiche sono affrontate più estesamente in un documento specifico.

5.1 L'effetto fotovoltaico

5.1.1 Un po' di storia

La conversione diretta della radiazione solare in energia elettrica è possibile grazie all'effetto fotovoltaico.

Il termine fotovoltaico viene dal Greco *photos*, che significa luce, e dal nome del fisico italiano Alessandro Volta, da cui derivano anche i termini Volt e voltaggio. Letteralmente sta ad indicare il connubio tra luce ed elettricità.

Tale effetto fu scoperto nel 1839 dal fisico francese Alexandre-Edmond Becquerel mentre conduceva esperimenti su una cella elettrolitica in cui erano immersi due elettrodi di platino.

Nel 1870 fu scoperta la fotoconducibilità del selenio da Heinrich Hertz, e nel 1876, da Smith, Adam e Day, i quali conclusero che dispositivi basati su tale elemento erano in grado di convertire la luce in elettricità con una efficienza compresa fra l'1% e il 2%. In seguito il selenio venne utilizzato nel campo della fotografia, nei dispositivi per la misurazione dell'esposizione. Nel 1883 Charles Fritts formò la prima giunzione, ricoprendo il

semiconduttore selenio con uno strato estremamente sottile di oro.

Si iniziò a pensare di sfruttare l'effetto fotovoltaico come fonte di energia allorché si introdussero materiali con rendimenti migliori del selenio.

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%. In particolare nel 1946 Russel Ohl brevettò le moderne celle solari (US2402662, "Light sensitive device").

Nel 1954, Person, Fuller e Chapin, ottennero la prima cella solare commerciale in silicio monocristallino all'interno dei laboratori Bell.

Oggi, in laboratorio, le celle al silicio ed altri materiali raggiungono quasi il 40% di efficienza.

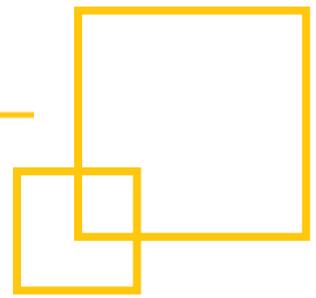
5.1.2 Un po' di fisica

Dal punto di vista fisico l'effetto fotovoltaico consiste nella generazione di forza elettromotrice in seguito all'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche, tra le quali la radiazione luminosa. Può manifestarsi in gas, liquidi e solidi, anche se il suo utilizzo ha riguardato prevalentemente materiali semiconduttori.

L'effetto fotovoltaico si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza di un materiale (generalmente semiconduttore) passa alla banda di conduzione a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico incidente sul materiale. L'assenza dell'elettrone viene chiamata in questo caso lacuna.

L'energia necessaria all'elettrone passare da una banda all'altra deve essere superiore ad un determinato valore minimo (detto "band gap") caratteristico del materiale e corrispondente all'intervallo di energia compreso tra banda di valenza e banda di conduzione.

Nel caso di materiali isolanti, il band gap di energia risulta troppo elevato per poter essere superato, mentre per i materiali conduttori l'energia del *band gap* è piccolissima, quindi a temperatura ambiente c'è una continua creazione e distruzione di coppie elettrone-lacuna. Quando un flusso luminoso investe invece il reticolo cristallino di un semiconduttore, si verifica la liberazione di un certo numero di elettroni (al quale corrisponde un eguale



numero di lacune), attraverso i quali è possibile ottenere un flusso coerente di cariche. Per realizzare ciò è necessario creare un campo elettrico interno alla cella, immettendo un eccesso di atomi caricati positivamente in una parte del semiconduttore ed un eccesso di atomi caricati negativamente nell'altro.

Questo meccanismo si chiama drogaggio del semiconduttore e generalmente viene realizzato inserendo atomi del III gruppo come ad esempio il boro e del V gruppo (fosforo) per ottenere rispettivamente una struttura di tipo p (con un eccesso di lacune) ed una di tipo n (con un eccesso di elettroni). Drogando nelle due maniere due differenti regioni di uno stesso semiconduttore si realizza una giunzione $p-n$: il materiale risulta essere globalmente neutro, però si viene a verificare un flusso di elettroni dalla zona n alla zona p fino al raggiungimento dell'equilibrio elettrostatico, che determina un eccesso di carica positiva nella zona n , un eccesso di elettroni nella zona p e una regione intermedia detta zona di svuotamento. Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo dello spessore di pochi micrometri.

A questo punto, se viene illuminata con fotoni la giunzione dalla parte n , vengono a crearsi delle coppie elettrone-lacuna sia nella zona n che nella zona p . Il campo elettrico interno permette di dividere gli elettroni in eccesso (ottenuti dall'assorbimento dei fotoni da parte del materiale) dalle lacune, e li spinge in direzioni opposte gli uni rispetto agli altri. Gli elettroni, una volta oltrepassata la zona di svuotamento non possono quindi più tornare indietro, perché il campo impedisce loro di invertire la marcia. Connettendo la giunzione con un conduttore esterno, si otterrà un flusso di elettroni che parte dallo strato n , a potenziale maggiore, verso lo strato p , a potenziale minore sin tanto che la cella resta esposta alla luce.

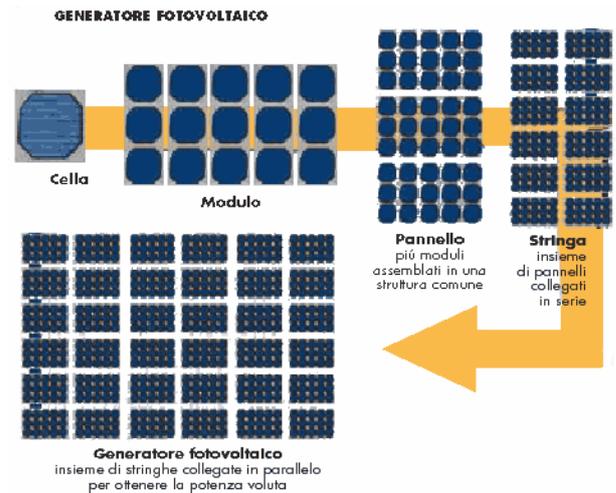
5.2 Il pannello fotovoltaico

Un pannello fotovoltaico è un dispositivo in grado di convertire l'energia solare direttamente in energia elettrica mediante effetto fotovoltaico ed è usato per generare elettricità a partire dalla luce del sole (da non confondere con il pannello solare termico per la produzione di acqua calda).

Il pannello fotovoltaico è costituito da un insieme di moduli fotovoltaici a loro volta costituiti da un insieme di celle. Un insieme di pannelli, collegati

eletticamente in serie, costituiscono una stringa, più stringhe collegate in parallelo costituiscono un campo o generatore fotovoltaico.

Attualmente i pannelli fotovoltaici sono costruiti partendo da semiconduttori al silicio.



Generatore fotovoltaico

La cella fotovoltaica è il componente elementare del sistema ed è costituita da una sottile "fetta" (*wafer*) di un materiale semiconduttore, quasi sempre silicio, (l'elemento più diffuso in natura dopo l'ossigeno) di spessore pari a circa 0.3 mm. Può essere rotonda o quadrata e può avere una superficie compresa tra i 100 e i 225 cm².

Il silicio che costituisce la fetta viene "drogato" mediante l'inserimento su una "faccia" di atomi di boro (drogaggio p) e sull'altra faccia con piccole quantità di fosforo (drogaggio n). Nella zona di contatto tra i due strati a diverso drogaggio si determina un campo elettrico; quando la cella è esposta alla luce, per effetto fotovoltaico, si generano delle cariche elettriche e, se le due facce della cella sono collegate ad un utilizzatore, si avrà un flusso di elettroni sotto forma di corrente elettrica continua.

Una cella fotovoltaica di dimensioni 10x10 cm si comporta come una minuscola batteria, e nelle condizioni di soleggiamento tipiche dell'Italia (1 kW/m²), alla temperatura di 25°C fornisce una corrente di 3 A, con una tensione di 0.5 V e una potenza pari a 1.5 – 1.7 Watt di picco. L'energia elettrica prodotta sarà, ovviamente, proporzionale all'energia solare incidente, che come sappiamo varia nel corso della giornata, al variare della

stagioni, e al variare delle condizioni atmosferiche, ecc.

5.2.1 Tecnologie costruttive

Se si limita l'analisi ai soli modelli commerciali a base silicea, le tecnologie di realizzazione più comuni sono:

- Silicio monocristallino, in cui ogni cella è costituita da un wafer prodotto da un lingotto di silicio purissimo;
- Silicio policristallino, in cui il lingotto è prodotto mediante drogaggio chimico;
- Silicio amorfo, in cui gli atomi silicei vengono depositi chimicamente in forma amorfa, ovvero strutturalmente disorganizzata, sulla superficie di sostegno;
- Silicio microsferico, in cui si impiega silicio policristallino ridotto in sfere del diametro di circa 0.75 mm ingabbiate in un substrato di alluminio;

Di queste, 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.

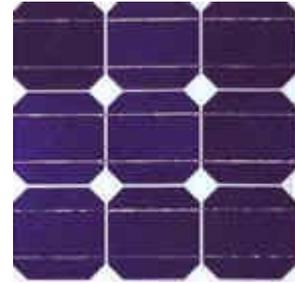
5.2.2 Celle in silicio monocristallino

L'efficienza di queste celle fotovoltaiche è del 12 – 16%. Per la produzione di un pannello da un kWp occorrono 6 – 9 MWh di energia, mentre l'energia prodotta nella vita media (20 anni) da un pannello monocristallino da 1 kWp è 18 – 24 MWh. Quindi circa tre volte l'energia necessaria per la fabbricazione del pannello stesso.

Il costo di un impianto con celle in silicio monocristallino è attualmente di circa 10 – 12000 € al kWp, il costo diminuisce se l'impianto è di taglia maggiore.

Il *wafer* di monocristallo si produce con il metodo Czochralsky, basato sulla cristallizzazione di un "seme" di materiale molto puro, che viene immerso nel silicio liquido e quindi estratto e raffreddato lentamente per ottenere un "lingotto" di monocristallo, che avrà forma cilindrica (da 13 a 30 cm di diametro e 200 cm di lunghezza). Successivamente le celle ottenute affettando questo

cilindro vengono squadrate non completamente, lasciando i caratteristici angoli smussati, a volte anche a forme ottagonali, il colore è uniforme.



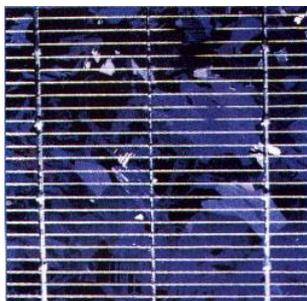
Modulo a 6 celle in silicio monocristallino

I pannelli contenenti celle fotovoltaiche in silicio monocristallino (e policristallino) 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*, 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.

5.2.3 Celle a silicio policristallino

Le celle a silicio policristallino possono avere efficienze del 10 – 13%. Per la produzione di un pannello da un kWp occorrono 4 – 7 MWh di energia, mentre l'energia prodotta nella vita media (20 anni) da un pannello da 1 kWp è 16 – 20 MWh. Il costo di un impianto con celle in silicio policristallino è attualmente di circa 8 – 11000 € al kWp, il costo diminuisce se l'impianto è di taglia maggiore.

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 quadrata e le caratteristiche striature.



Cella in silicio policristallino

5.2.4 Pannelli con film in silicio amorfo

Con l'amorfo, in realtà, non si può parlare di celle, in quanto si tratta di deposizioni di silicio (appunto allo stato amorfo) in film sottili su superfici che possono anche essere ampie.

I moduli in silicio amorfo possono avere efficienze del 4 – 6% quelli monogiunzione e 7 – 10% con le tecnologie a doppia o tripla giunzione che sfruttano una più larga banda dello spettro solare utile.

Per la produzione di un pannello da un kWp occorrono 3 – 5 MWh di energia, mentre l'energia prodotta nella vita media (20 anni) da un pannello da 1 kWp è 10 – 18 MWh secondo la tecnologia adottata.

Il costo di un impianto con celle in silicio policristallino è attualmente di circa 6 – 9000 € al kWp, il costo diminuisce se l'impianto è di taglia maggiore.

Il maggiore vantaggio dei moduli in silicio amorfo è la potenziale versatilità nell'integrazione architettonica dei moduli FV, sia per quanto concerne la forma che le tonalità cromatiche, fino ad ottenere anche superfici semitrasparenti utilizzabili in facciate vetrate.

I pannelli contenenti celle fotovoltaiche in silicio amorfo sono composti da un sottile strato siliceo sigillato tra due strati traslucidi flessibili. Raramente vengono costituite serie o paralleli elettrici, all'interno di un modulo fotovoltaico di questo tipo.

Dati riferiti ad un impianto da 1 KW

	Mono - cristallino	Poli - cristallino	Amorfo
Energia spesa (MW)	6 – 9	5 – 7	3 – 5
E.R.O.E.I*	3 – 5	5 – 7	6 – 10
Superficie (m ²)	6 – 9	8 – 10	11 – 15
Costo (€)	7 – 12000	6 – 10000	5 – 8000

*Considerando una produzione di 1.200 kWh/anno e 20 anni di vita impianto

Attualmente i sistemi fotovoltaici hanno un EROEI (*Energy Return On Energy Investment*) con un minimo di 3 kWh prodotti per ogni kWh speso nella realizzazione del sistema, ed un massimo superiore a 10 kWh resi per kWh di “energia grigia”.

5.2.5 Prestazioni e rendimenti

Le prestazioni dei pannelli fotovoltaici sono suscettibili di variazioni anche sostanziose in base:

- al rendimento dei materiali;
- alla tolleranza di fabbricazione percentuale rispetto ai valori di targa;
- all'intensità luminosa a cui le sue celle sono esposte;
- all'angolazione con cui questa giunge rispetto alla sua superficie;
- alla temperatura di esercizio dei materiali, che tendono ad “affaticarsi” in ambienti caldi;
- alla massa dell'aria in cui lavora.

Per motivi costruttivi, il rendimento dei moduli fotovoltaici è in genere inferiore o uguale al rendimento della loro peggior cella.

Con rendimento si intende la percentuale di energia captata e trasformata rispetto a quella totale giunta sulla superficie del modulo, e può essere considerato un indice di correlazione tra watt erogati e superficie occupata, ferme restando tutte le altre condizioni.

Se nei pannelli ad uso aerospaziale i rendimenti raggiungono anche il 50%, valori medi tipicamente riscontrabili nei prodotti commerciali a base silicea si attestano intorno al

- 14% nei moduli in silicio monocristallino;
- 13% nei moduli in silicio policristallino;
- 10% nei moduli in silicio microsferico;

- 6% nei moduli con celle in silicio amorfo.

Ne consegue che ad esempio a parità di produzione elettrica richiesta, la superficie occupata da un campo fotovoltaico amorfo sarà più che doppia rispetto ad un equivalente campo fotovoltaico cristallino.

A causa del naturale affaticamento dei materiali, le prestazioni di un pannello fotovoltaico comune diminuiscono di circa un punto percentuale su base annua. Per garantire la qualità dei materiali impiegati, è prassi comune che i produttori coprano con un'opportuna garanzia oltre ai difetti di fabbricazione anche il calo di rendimento del pannello nel tempo. La garanzia oggi più comune è del 90% sul nominale per 10 anni e dell'80% sul nominale per 20 anni.

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

5.2.6 I prodotti in commercio

I moduli fotovoltaici in silicio cristallino più comuni hanno dimensioni variabili da 0.5 mq a 1.5 mq, con punte di 2.5 mq 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.

La potenza più comune si aggira intorno ai 150 W_p a 24 V, raggiunti in genere impiegando 72 celle fotovoltaiche. La superficie occupata dai modelli commerciali si aggira in genere intorno ai 7.5 mq/kWp, ovvero sono necessari circa 7.5 metri quadrati di superficie per ospitare pannelli per un totale nominale di 1000 W_p.

I costi al cliente finale variano da 4.00 a 6.00 €/Wp (a gennaio 2006), con aumenti che si attestano intorno 10% su base annua. La causa di questa instabilità di prezzo è da ricercarsi nel profondo squilibrio tra domanda e offerta, che al momento di scrivere sono in rapporto di quasi 10:1. In altre parole, dal 2004 ad oggi la tecnologia e le economie

di scala dei produttori hanno dovuto fare i conti con una domanda di mercato improvvisamente esplosa a livello planetario, a causa sia dell'insicurezza sulle sorti degli altri mercati energetici, sia delle politiche di incentivazione delle fonti rinnovabili da parte di moltissimi governi. A fronte di un incremento della domanda mondiale del 200% da giugno 2004 a giugno 2005, i produttori di silicio hanno risposto con un incremento della produzione di "solo" il 60%. Il rimanente squilibrio ha spinto verso l'alto le quotazioni (il silicio è un materiale quotato in borsa).

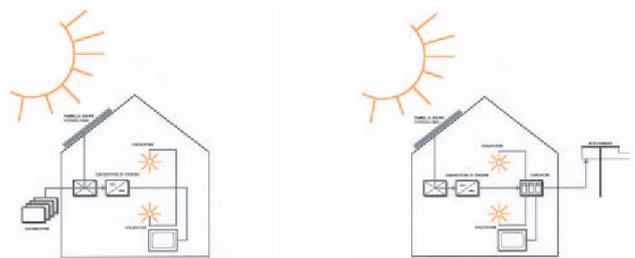
5.3 I sistemi fotovoltaici

Gli impianti fotovoltaici sono dunque sistemi che convertono l'energia solare direttamente in energia elettrica, senza ricorrere alla tecnologia di produzione tradizionale che sfrutta i combustibili fossili.

Le potenze generate da questi dispositivi variano da pochi a diverse decine di Watt, a seconda delle dimensioni e delle tecnologie adottate.

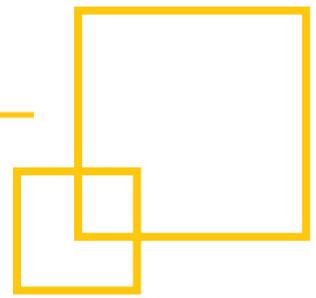
Secondo il tipo di applicazione a cui l'impianto è destinato, le condizioni di installazione, le scelte impiantistiche, il grado di integrazione nella struttura edilizia con cui si interfaccia, si distinguono

- impianti isolati ("*stand alone*", "*isolated*" o "*off-grid*"),
- impianti connessi in rete ("*grid connected*" o "*on-grid*").



Impianto isolato e impianto connesso in rete

Gli impianti "*stand alone*" sono impiegati per utenze che non sono collegate alla rete, e quindi necessitano di opportuni sistemi di accumulo (di solito batterie piombo-acido) per immagazzinare durante le ore di sole energia da utilizzare poi durante la notte o quando il sole è coperto. Questi impianti risultano tecnicamente ed economicamente vantaggiosi nei casi in cui la rete elettrica è assente



o difficilmente raggiungibile. Infatti spesso sostituiscono i gruppi elettrogeni. Sono diffusi soprattutto nei paesi in via di sviluppo per utenze di carattere rurale che le utilizzano anche per il pompaggio dell'acqua.

Attualmente le applicazioni più diffuse servono ad alimentare

- apparecchiature per il pompaggio dell'acqua, soprattutto in agricoltura;
- ripetitori radio, stazioni di rilevamento e trasmissione dati (meteorologici e sismici), apparecchi telefonici;
- apparecchi di refrigerazione, specie per il trasporto medicinali;
- sistemi di illuminazione;
- segnaletica sulle strade, nei porti e negli aeroporti;
- alimentazione dei servizi nei camper;
- impianti pubblicitari, ecc.

In Italia fino ad oggi sono stati realizzati impianti fotovoltaici con potenze unitarie variabili da 350 W a 3 kW per l'alimentazione di utenti isolati (rifugi alpini, parchi nazionali, isole), impianti ibridi fotovoltaico-diesel per l'alimentazione di piccole reti per comunità isolate (80 kW a Vulcano, 70 kW a Stromboli), impianti collegati alla rete di bassa tensione (70 kW ad Adrano, 35 kW a Taranto, 24 kW a Palermo, ecc.) e impianti collegati alla rete di media tensione (3.3 MW nella centrale di Serre, in provincia di Salerno, suddivisa in 10 sottocampi da 330 kW per un totale di circa 45000 moduli su un'area di 70000 m²).

Gli impianti “*grid connected*” sono normalmente utilizzati per fornire energia a una rete elettrica già alimentata da generatori convenzionali e servono ad immettervi altra energia.

L'energia elettrica è prodotta dal generatore fotovoltaico in corrente continua e deve essere resa utilizzabile da parte dell'utenza, che generalmente dispone di apparecchi da alimentare in corrente alternata. A tal fine si accoppia al generatore fotovoltaico un sistema di controllo e condizionamento della potenza, che differisce a seconda del tipo di impianto.

Nel caso di impianti *stand alone* esso è costituito da

- un regolatore di carica degli accumulatori, che garantiscono l'erogazione della potenza elettrica richiesta dal carico, nelle situazioni in cui il fabbisogno supera la produzione e durante le ore notturne;
- un dispositivo di inseguimento del punto di massima potenza o convertitore CC/CC, che ha lo scopo di trarre il massimo della potenza dal generatore, adattando le caratteristiche elettriche dell'energia prodotta a quelle del carico;
- un *inverter* o convertitore CC/CA, che trasforma la corrente prodotta da continua in alternata e include i dispositivi che assicurano il funzionamento in sicurezza dell'impianto.

Nel caso di impianti *grid connected*, gli accumulatori (e dunque il regolatore di carica) sono assenti, poiché è la rete a fornire il surplus di energia eventualmente necessario e ad alimentare l'utenza nelle ore notturne.

In questo tipo di impianti l'*inverter* sovrintende allo scambio con la rete ed è generalmente dotato di opportuni dispositivi che adattano la tensione in uscita alle caratteristiche elettriche richieste dalla rete di distribuzione e controllano la qualità della potenza fornita o immessa in rete (filtraggio delle armoniche e rifasamento).