
**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SEDE DI CESENA
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA E DELLE
TELECOMUNICAZIONI**

TITOLO DELL'ELABORATO

**Sistemi di conversione energetica
ibridi termo-fotovoltaici**

Elaborato in
Elettronica L_B

Relatore:
Prof. Claudio Fiegna

Presentata da:
Michela Nuzziello

Sessione III°
Anno Accademico 2010/2011

Indice:

Introduzione	1
---------------------------	----------

Capitolo 1: Energia solare, conversione elettrica e termica.....	5
-------------------------------------------------------------------------	----------

FOTOVOLTAICO

1.1 Introduzione al fotovoltaico	5
1.2 Radiazione solare.....	6
1.3 Aspetto chimico alla base della cella fotovoltaica	10
1.4 Effetto fotoelettrico.....	12
1.5 Funzionamento cella fotovoltaica alla luce solare	
1.5.1 Funzionamento	14
1.5.2 Efficienza.....	19
1.6 Caratteristiche elettriche della cella fotovoltaica	22
1.7 Composizione sistema fotovoltaico	
1.7.1 Composizione della cella	25
1.7.2 Composizione modulo	26
1.7.3 Celle e moduli di ultima generazione e ulteriori applicazioni	35
1.7.4 Sistemi fotovoltaici	38

SOLARE TERMICO

1.8 Introduzione al solare termico e collettore solare	
1.8.1 Introduzione al solare termico	42
1.8.2 Generico collettore solare termico.....	42
1.9 Solare termico a basse temperature	
1.9.1 Applicazioni.....	43
1.9.2 Tipologie di collettori solari	44
1.9.3 Sistema solare-termico	52
1.10 Solare termico a medie o alte temperature (o termodinamico)	59

Capitolo 2: Conversione combinata elettrica e termica	63
--------------------------------------------------------------------	-----------

2.1 Introduzione e funzionamento tecnologia ibrida termo-fotovoltaica	63
2.2 Situazione attuale tecnologia termo-fotovoltaica.....	66
2.3 Descrizione moduli ibridi in commercio	67
2.4 Sistemi ibridi termo-fotovoltaici	75

Capitolo 3: Studio teorico dei limiti di conversione.....	79
3.1 Energia solare e densità spettrale di potenza	79
3.2 Energia elettrica idealmente recuperata mediante un modulo fotovoltaico.....	81
3.3 Energia termica dissipata da un modulo fotovoltaico	85
3.4 Indice percentuale di potenza termica recuperabile	87
3.5 Conclusioni.....	88
 Bibliografia	 91

Introduzione:

Sono all'ordine del giorno le tematiche legate al risparmio energetico: minor spreco, minor consumo e minor inquinamento, che assumono oggi un significato molto importante.

Si pensi che in Italia, nell'anno 2010, l'energia utilizzata era derivata per la maggior parte da fonti fossili: gas naturale, carbone e prodotti petroliferi; circa il 57,6% del totale. Inoltre, buona parte del fabbisogno energetico nazionale era stato importato.

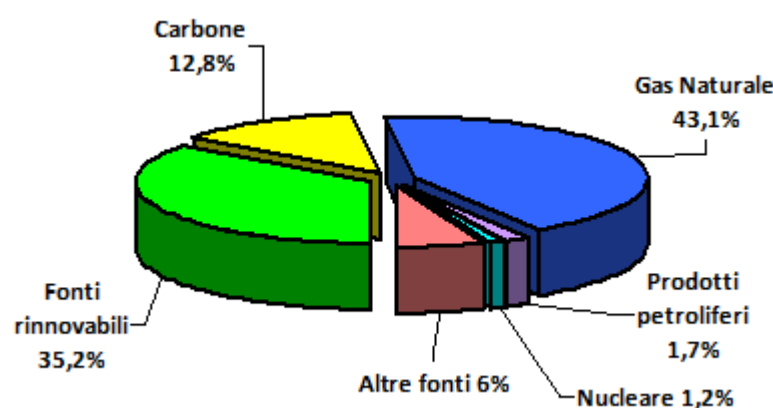


Figura 1: Composizione del mix medio nazionale utilizzato per la produzione dell'energia elettrica immessa nel sistema elettrico italiano nel 2010 (come pubblicato dal GSE in data 5 settembre 2011 ai sensi del decreto MSE del 31/07/2009).

Considerando che, ad eccezione delle fonti rinnovabili, gran parte delle materie prime necessarie per ottenere energia non sono reperibili in Italia, da questo grafico emerge la scarsa indipendenza energetica nazionale e la tendenza allo sfruttamento di fonti fossili. Purtroppo però l'utilizzo di queste fonti di energia mette fortemente in pericolo la salute dei cittadini che vivono nei pressi degli stabilimenti, e più in generale produce ogni tipo di inquinamento che va a discapito della salute di tutti.

- **Inquinamento atmosferico:** produzione su vasta scala di gas serra tra cui anidride carbonica (CO_2), metano (CH_4), ossidi nitrosi, perfluorocarburi, esafluoruro di zolfo e altri; il 98% della CO_2 prodotta deriva dall'impiego di combustibili fossili, mentre il metano deriva dai processi estrattivi dei combustibili fossili e dall'agricoltura. Come dice il nome, questi gas sono responsabili del

tristemente famoso “effetto serra”. Questo fenomeno, sempre esistito, fa sì che la terra sia circa 30°C più calda di quanto non sarebbe in assenza di questi gas. Però, nel corso degli ultimi secoli, lo sfruttamento indiscriminato dei combustibili fossili ha generato una quantità di gas serra tale da alterare la composizione chimica dell’atmosfera, provocando un aumento della temperatura terrestre, che causerà profondi mutamenti del clima a livello planetario. Vengono inoltre immessi in atmosfera altri prodotti gassosi della combustione: ossidi di azoto e zolfo, idrocarburi incombusti, metalli pesanti, polveri ed elementi radioattivi. Queste sostanze causano alla popolazione esposta disturbi all’apparato respiratorio, problemi cardio-vascolari, tumori ed, essendo alcune di queste sostanze cancerogene, leucemie.

- **Inquinamento dell’acqua:** è causato per la maggior parte da perdite di petrolio grezzo durante il trasporto e l’estrazione (si ricordano innumerevoli incidenti di petroliere, con la perdita di decine di milioni di tonnellate di petrolio e altrettanti disastri avvenuti in piattaforme petrolifere ed oleodotti), emissioni di liquidi di scarico a temperature molto diverse da quella ambientale (provenienti dai sistemi di raffreddamento degli impianti termoelettrici) e fuoriuscite accidentali di sostanze nocive e a volte radioattive. In questi casi le conseguenze per l’ambiente e per l’uomo sono incalcolabili.
- **Inquinamento del suolo:** dispersione accidentale nell’ambiente di sostanze inquinanti, tra cui anche materiali radioattivi, che permangono a lungo nel terreno e permeano nelle falde acquifere.

Ci sarebbe molto altro da dire sugli effetti nocivi per l’uomo e per l’ambiente causati dalle fonti di energia che bruciano materiali fossili. Per esempio: la formazione del buco nell’ozono (un’area dell’atmosfera priva della barriera che ci protegge dai raggi ultravioletti provenienti dal sole, molto dannosi per l’uomo), piogge acide (dovute all’anidride solforosa derivata dalla combustione di prodotti petroliferi e del carbone), danneggiamento della superficie terrestre a causa di trivellazioni, miniere a cielo aperto e discariche. Ormai l’importanza di preservare il territorio è

ben nota a tutti, ma pochi fanno veramente qualcosa per risolvere il problema. Solo la carenza di queste risorse ed il derivante aumento del prezzo hanno spinto l'uomo a cercare soluzioni alternative, tutt'ora poco utilizzate nonostante gli innumerevoli pregi.

Un aiuto concreto per la salute dell'ambiente e dell'umanità, da sommarsi all'attenzione di tutti verso il minor spreco, viene dalle fonti alternative di produzione dell'energia come ad esempio i sistemi fotovoltaici e solari-termici, eolici, geotermici ed idroelettrici che sfruttano rispettivamente l'energia del sole, del vento, del calore, del terreno e dell'acqua. Ognuna di esse ha specifici campi di impiego e propri vantaggi e svantaggi.

Delle fonti alternative sopracitate sarà presa in esame l'energia solare, spiegando il funzionamento e le tipologie dei sistemi più importanti con cui può essere sfruttata: fotovoltaici e solari-termici; verrà trattata più nel dettaglio la tecnologia fotovoltaica. Questa tecnologia, al giorno d'oggi, desta grande interesse, in quanto può aiutare a ridurre la dipendenza dai combustibili fossili ed al contempo può rafforzare la sicurezza energetica italiana attraverso una fonte di energia pulita e disponibile ovunque.

Si parla spesso del fotovoltaico come di una tecnologia "sostenibile" per la produzione di energia elettrica, riferendosi unicamente al tasso nullo d'inquinamento durante il funzionamento dell'impianto, ma questo termine ha un significato molto più ampio. Esso, infatti, include concetti quali: efficienza nella gestione delle risorse, processi di produzione sostenibili, nonché processi sostenibili di recupero e riciclaggio dei moduli fotovoltaici quando si rompono o smettono di funzionare (di solito non prima di 25 anni di operatività). A questo ha pensato il settore globale del fotovoltaico istituendo una propria associazione chiamata PV CYCLE che ha lo scopo di rendere il settore stesso doppiamente verde, attraverso il riciclaggio dei prodotti giunti al termine del proprio ciclo di vita.

Per questi motivi il fotovoltaico costituisce un'opzione energetica di primaria importanza tra le fonti rinnovabili. Si pensi ad esempio che con un sistema fotovoltaico delle dimensioni di Toscana, Marche e Umbria si potrebbe soddisfare il fabbisogno mondiale di energia riducendo più che drasticamente le emissioni inquinanti.

Di seguito verrà spiegato il funzionamento di un sistema fotovoltaico e di uno solare termico, e si tratterà la loro possibile integrazione per aumentare la quantità di energia solare che si riesce a sfruttare.

Capitolo 1: Energia solare, conversione elettrica e termica

Come già accennato nell'introduzione, di seguito si tratteranno i due più importanti sistemi che sfruttano l'energia del sole: sistema fotovoltaico e solare termico. Il loro funzionamento verrà chiarito in seguito, ma risulta importante fare a priori una distinzione.

- I **sistemi fotovoltaici**, di qualsiasi genere e tipo, sfruttano l'energia derivante dal sole per produrre direttamente energia elettrica.
- I **sistemi solari-termici** sfruttano il calore del sole per produrre energia termica, ossia per scaldare un fluido o un gas.

Da questa è poi possibile ricavare successivamente anche energia elettrica, che quindi si potrà definire come ricavata indirettamente dal calore del sole.

FOTOVOLTAICO

1.1 Introduzione al fotovoltaico

In questo capitolo verrà spiegato il funzionamento di una cella fotovoltaica e dei sistemi fotovoltaici da essa derivati. Per fare ciò è necessario innanzitutto chiarire che cos'è.

La cella fotovoltaica (Figura 2) è l'elemento che sta alla base dell'omonima tecnologia. Questo dispositivo è difatti in grado di convertire l'energia solare (l'energia trasportata dai raggi provenienti dal sole) in energia elettrica, fornendo in uscita un certo quantitativo di tensione e corrente.



Figura 2: Cella Fotovoltaica

Scendendo più nel dettaglio, una tipica cella fotovoltaica è composta da un sottile wafer di Silicio (che può essere amorfo, monocristallino o policristallino) di uno spessore compreso tra i 0,25 e i 0,35 millimetri.

Essa è generalmente di forma quadrata con una superficie di circa 100 mm², 125 mm², 150 mm² o 156 mm².

Una cella fotovoltaica che si trova in condizioni di insolazione standard (Standard Test Conditions: radiazione incidente 1000 W/m² con temperatura cella 25°C) produce una tensione di circa 0,5 V (prelevabile mediante degli elettrodi) e una corrente di 3 A. Questa cella produrrà quindi una potenza di 1,5 W.

1.2 Radiazione solare

Come noto, la radiazione solare è l'energia elettromagnetica che viene emessa dal sole in seguito ai processi di fusione nucleare, che avvengono in esso.

Parte di questa energia raggiunge la Terra, con velocità di propagazione pari a circa 3×10^8 m/s ($c=300'000$ Km/s), con una certa frequenza (ν) e lunghezza d'onda (λ), come si può notare in Figura 3.

Queste tre grandezze sono legate dalla seguente relazione: $c = \lambda * \nu$.

Infatti in Figura 3 viene anche mostrato come al crescere della frequenza (ν) cala la lunghezza d'onda (λ).

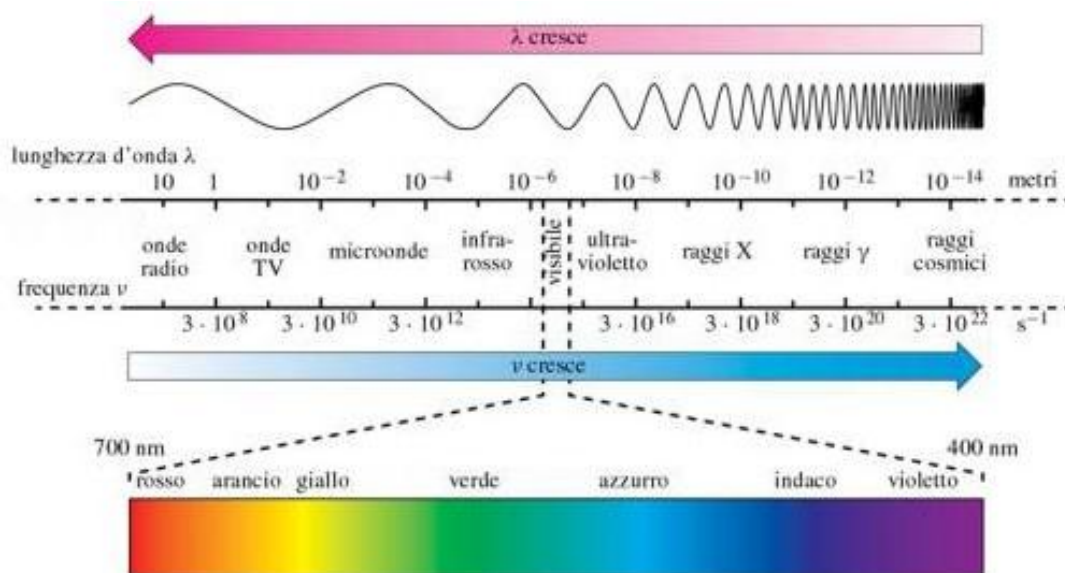


Figura 3: Caratteristiche della radiazione solare

La quota di radiazione solare, avente lunghezza d'onda compresa tra i 380nm e i 760nm circa, è visibile all'occhio umano sotto forma di luce (onda elettromagnetica) ed è proprio parte della radiazione di questa banda ad essere utilizzata dalla cella fotovoltaica.

La luce proveniente dal sole raggiunge la terra in circa 8 minuti. Essa può essere pensata come un moto di particelle elementari dette fotoni. L'energia generata dal sole si manifesta quindi come un flusso continuo di fotoni (di varia energia) che raggiunge la terra portando con se un'energia complessiva pari a $1,353 \text{ kW/m}^2$ (costante solare) nei pressi dell'atmosfera, standard AM0.

La quantità di questa energia che raggiunge effettivamente il suolo è influenzata da molti fattori, tra cui: altitudine, latitudine, longitudine, condizioni atmosferiche, stagione, orario, inquinamento dell'aria (polveri e CO_2 presenti), percentuale di vapore acqueo.

Gli ultimi due fattori aumentano l'assorbimento di energia da parte dell'atmosfera, diminuendone quindi la quantità che giunge al suolo.

Si può dunque constatare che nell'attraversare l'atmosfera terrestre la radiazione solare viene frammentata in più componenti. Parte di essa viene assorbita dall'atmosfera, parte viene riflessa nello spazio, parte arriva al suolo con un certo angolo di incidenza e parte si diffonde nell'atmosfera.

Tenendo conto di questi fattori viene quindi ipotizzato che la radiazione totale al suolo, in una giornata serena, col sole allo zenit (circa mezzogiorno), sia pari a circa 1 kW/m^2 .



Figura 4: Radiazione solare in Italia

In Figura 4 è indicata, con la gradazione di colori dal blu al rosso, la somma delle radiazioni solari medie annue dal 04/2004 al 03/2010. La scala va da 1100 kWh/m² (in blu) a 1850 kWh/m² (in rosso).

In Figura 5 è raffigurato lo spettro della radiazione solare. La linea arancione rappresenta la radiazione solare appena fuori dall'atmosfera, mentre quella in nero indica la radiazione solare al livello del mare. Sono anche specificati gli intervalli di frequenze ove la luce è visibile e quale colore viene percepito dall'occhio umano per quella frequenza.

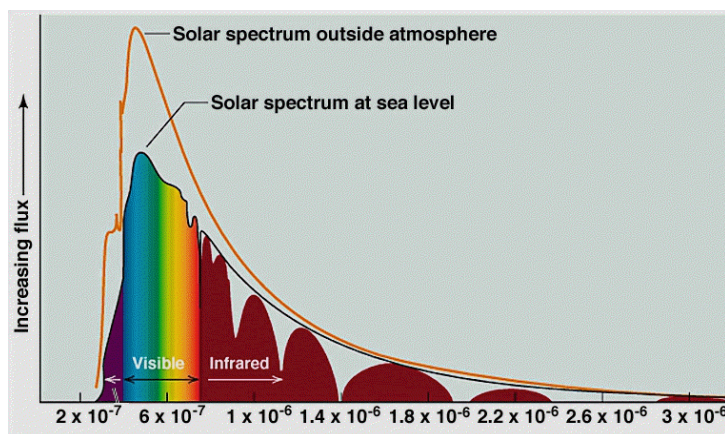


Figura 5: Spettro della radiazione solare

Per la precisione, non è possibile graficare il vero spettro della radiazione solare, poiché esso varia di continuo. Nascono così vari standard che permettono di quantificare la radiazione solare (o meglio densità spettrale di potenza irradiata dal sole) per fissate condizioni operative.

Lo standard più comunemente usato, per fornire i dati ad uso terrestre, è l'AM1.5, dove AM sta per Air Mass, che rappresenta la quantità di atmosfera che la luce deve attraversare per raggiungere il suolo.

Esso fissa come Irradianza (Potenza che giunge a terra su m^2), per lo standard ASTM G173, un valore di $I=1000,4 \text{ W/m}^2$ molto simile al valore medio sopracitato, per un angolo d'incidenza di 48.2° dallo zenit (Figura 6).

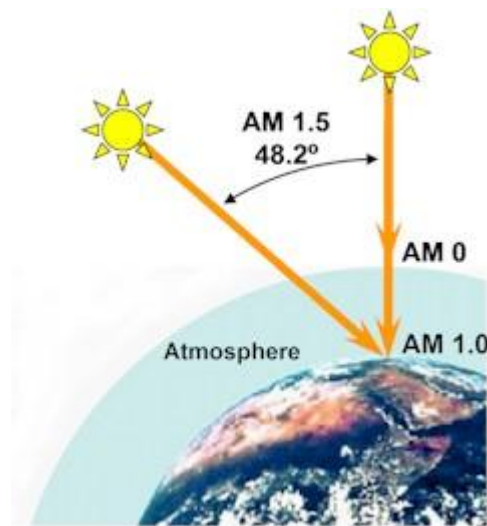


Figura 6: Angolo considerato per l'irradiazione standard AM1.5

Di seguito verrà sempre considerato lo standard AM1.5 come riferimento.

1.3 Aspetto chimico alla base della cella fotovoltaica

Per poter capire come la cella trasforma la radiazione solare in energia elettrica bisogna conoscerne con esattezza la struttura atomica.

La cella fotovoltaica è costituita da un sottile strato di un materiale semiconduttore, solitamente viene utilizzato il silicio (elemento del quarto gruppo della tavola degli elementi).

Innanzitutto è bene chiarire l'importanza di utilizzare un materiale semiconduttore piuttosto che un isolante o un conduttore.

Richiamando il modello atomico di Bohr si ricorda che gli elettroni presenti nell'ultimo orbitale sono quelli che si distaccano dall'atomo con più facilità e quindi con minor dispendio di energia. Questo orbitale viene chiamato di valenza, che nella teoria a bande (livelli energetici) prenderà il nome di banda di valenza.

E' quindi da quest'ultima banda che si distaccano gli elettroni per passare in banda di conduzione.

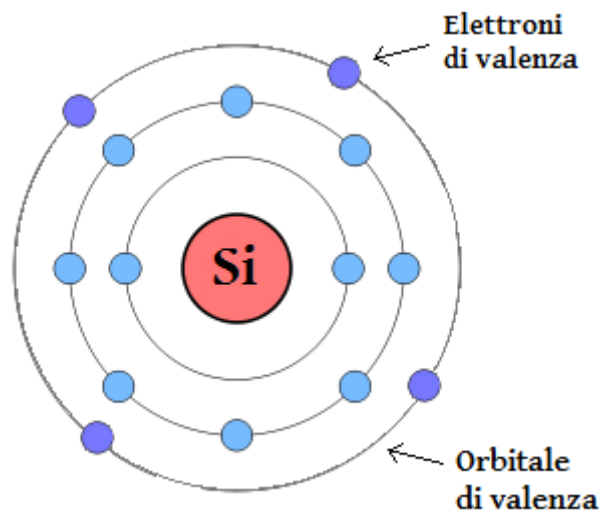
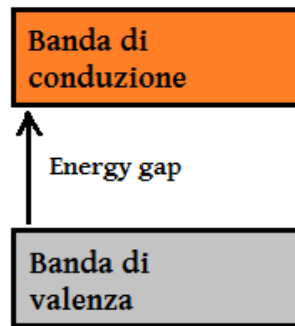


Figura 7: Atomo di silicio

Perché ciò avvenga è necessario che all'elettrone venga fornita un'energia superiore a quella del gap (distanza) che separa le due bande.

Come dice il nome, la banda di conduzione è quella responsabile della conduzione di elettricità. Gli elettroni che vi si trovano saranno quindi liberi di muoversi per creare un flusso di corrente.



E' proprio questo gap energetico che differenzia i vari tipi di materiali. Come chiarisce la Figura 8 i materiali isolanti (detti anche dielettrici) hanno un Energy gap molto ampio e sarà quindi molto dispendioso far passare un elettrone in banda di conduzione. Avviene invece l'opposto nei materiali conduttori ove il gap è molto piccolo.

I semiconduttori sono una via di mezzo molto apprezzata, poiché non hanno una differenza di energia E_g difficilmente superabile (come negli isolanti) ma hanno comunque un buon gap (a differenza dei conduttori) il quale può essere superato semplicemente sfruttando la luce del sole, come vedremo nel sottocapitolo 1.4.



Figura 8: Energy gap = differenza di energia

Un semiconduttore molto usato è il silicio, che presenta un Energy gap di circa 1,12 eV (1Volt moltiplicato per la carica dell'elettrone), che verrà quindi preso ad esempio nei prossimi sottocapitoli.

1.4 Effetto fotoelettrico

Un qualsiasi atomo di silicio, come si può notare in figura 6, presenta 14 elettroni totali di cui 4 nell'orbitale di valenza, ovvero in banda di valenza. Questo significa che sono presenti 4 elettroni che eventualmente possono passare dalla banda di valenza a quella di conduzione, ove diventano liberi di muoversi.

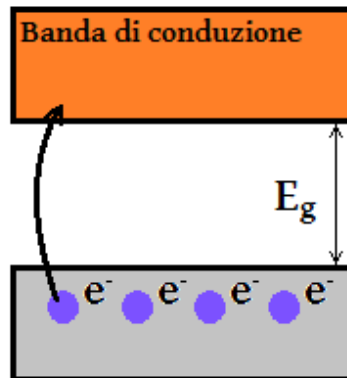


Figura 9: Un elettrone passa dalla banda di valenza a quella di conduzione.

Si pensi ora di esporre uno di questi atomi ai raggi solari (flusso di fotoni). Quando un fotone raggiunge l'atomo viene da esso assorbito e se possiede energia uguale o superiore all'energia che separa le due bande, valenza e conduzione, un elettrone salta da una banda all'altra, Figura 9.

Questo fenomeno viene chiamato **effetto fotoelettrico**.

Bisogna però chiarire a quanto ammontano queste energie.

Un fotone ha energia pari a:

$$E_{\text{fotone}} = h \cdot \nu \text{ [eV]}$$

Dove h è la costante di Planck ($h \approx 6.6261 \times 10^{-34} \text{ Js}$) e ν è la frequenza del fotone, che può essere ricavata come $\nu = c(\text{velocità della luce}) / \lambda(\text{lunghezza d'onda})$.

Mentre la differenza di energia tra le due bande dipende dall'elemento. Per il Silicio questo gap di energia vale: $E_g = 1,12 \text{ [eV]}$
(che corrisponde ad una lunghezza d'onda di $\lambda = 1,15 \text{ nm}$).

Si può quindi affermare che se $E_{\text{fotone}} \geq E_g$ si verifica l'**effetto fotoelettrico**, ovvero un elettrone acquisisce energia sufficiente per passare dalle banda di valenza a quella di conduzione. In banda di valenza al posto dell'elettrone che si è spostato rimarrà un buco vuoto, questa mancanza viene chiamata lacuna (hole).

E' implicito in questo ragionamento che i fotoni con energia troppo scarsa, detti sottosoglia, non provocano questo fenomeno in quanto non soddisfano la condizione.

Mentre non è specificato cosa succede ai fotoni con energia molto maggiore di quella del gap, detti fotoni energetici: $E_{\text{fotone}} \gg E_g$ Essi hanno energia sufficiente ad innescare il processo, ma ne hanno molta di più di quella necessaria, si verifica quindi un salto molto più ampio della distanza tra le due bande. L'elettrone che si trova in questa situazione tende a decadere verso lo stato più basso della banda di conduzione, rilasciando energia sotto forma di vibrazioni reticolari che macroscopicamente si traducono in emissione di calore, Figura 10.

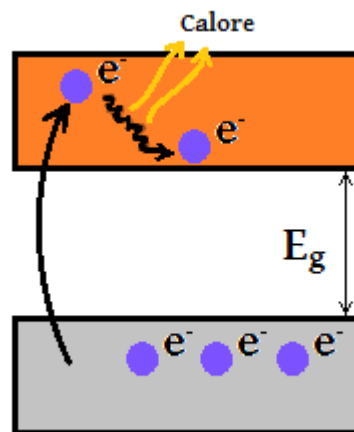


Figura 10: Conseguenze dell'assorbimento di un fotone energetico.

Un punto fondamentale di questa tesi consiste proprio nell'integrare un sistema fotovoltaico con un sistema termico, capace di catturare questo calore in eccesso, che nei sistemi tradizionali va normalmente perso e quindi sprecato.

1.5 Funzionamento cella fotovoltaica alla luce solare

1.5.1 Funzionamento

Si pensi ora, più in generale, ad un sottile strato di Silicio, invece che ad un singolo atomo. Questa porzione di materiale semiconduttore è formata da un reticolo di atomi dello stesso elemento. Come si nota in Figura 10, ciascuno di essi possiede 4 elettroni in banda di valenza (puntini neri) che vanno a formare il legame tra atomi adiacenti.

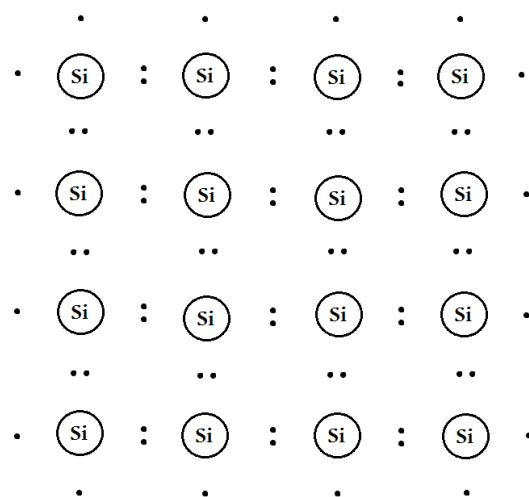


Figura 11: Reticolo di atomi di Silicio.

Quando un raggio di luce solare investe la superficie dello strato di silicio, questo flusso di fotoni viene assorbito dagli atomi appartenenti al reticolo. Come visto nel sottocapitolo 1.4, se i fotoni hanno energia sufficiente si verifica l'effetto fotoelettrico. Quindi, in ognuno di questi atomi, un elettrone passa in banda di conduzione con la conseguente creazione di tantissimi elettroni liberi (che si possono pensare come cariche di segno negativo) e altrettante lacune (cariche positive) Figura 12.

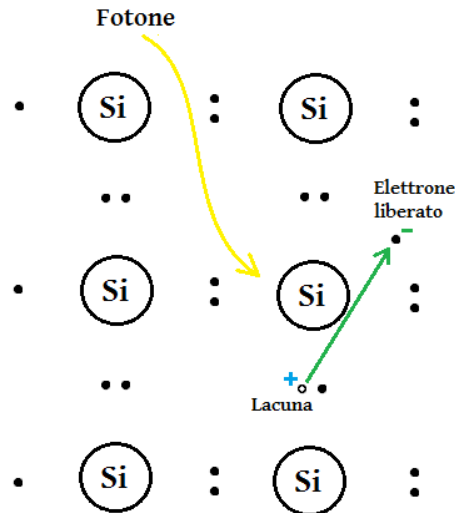


Figura 12: L'assorbimento del fotone libera un elettrone formando di conseguenza una lacuna

Questi elettroni liberi che sono disponibili per la conduzione, tendono però a muoversi in modo incostante e disordinato, senza seguire una direzione ben precisa. Per poterli sfruttare al fine di generare effettivamente una corrente elettrica, è necessario creare una differenza di potenziale che spinga gli elettroni a fluire in una direzione privilegiata. Perché ciò avvenga, vengono introdotti all'interno del reticolo cristallino alcuni atomi di un altro elemento (1 atomo ogni 10^4 - 10^7 atomi di Si) che sono in grado di mutare profondamente le proprietà elettriche del semiconduttore. Questa operazione viene chiamata “drogaggio” e verrà compiuta in due diversi modi (drogaggio di tipo “p” ed di tipo “n”) su due strati separati di silicio, per instaurare una differenza di potenziale tra gli stessi.

Il **drogaggio di tipo “n”** consiste nell’inserire, nel reticolo di silicio, atomi del quinto gruppo che hanno cinque elettroni in banda di valenza; questa operazione aumenta il numero di elettroni liberi in quanto solo quattro di essi instaurano un legame con gli atomi di silicio adiacenti, mentre un elettrone rimane privo di vincoli e quindi libero di circolare, Figura 13.

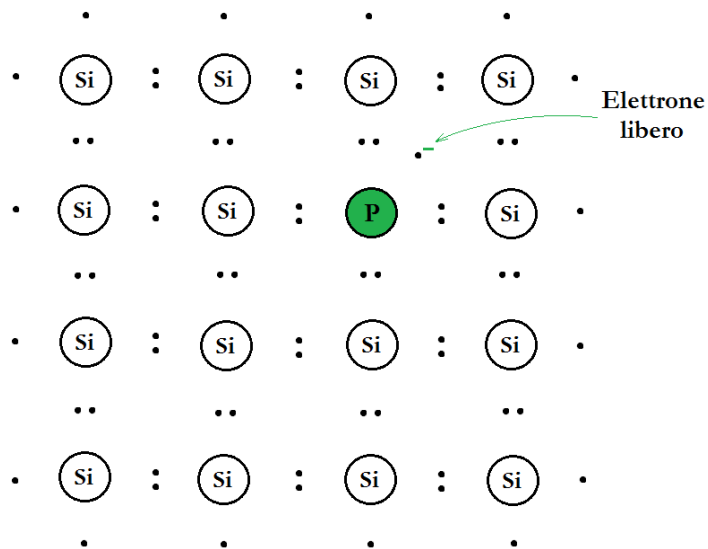


Figura 13: Per esempio viene inserito un atomo di fosforo, quattro elettroni di valenza formano legami con il silicio, mentre uno rimane libero.

Nel **drogaggio di tipo “p”** invece si utilizzano atomi del terzo gruppo che hanno solo tre elettroni in banda di valenza; in questo modo si aumenta la concentrazione di lacune, in quanto i tre elettroni vanno a formare un legame con tre atomi di silicio adiacenti mentre nel legame col quarto atomo nelle vicinanze rimane invece una mancanza, chiamata lacuna.

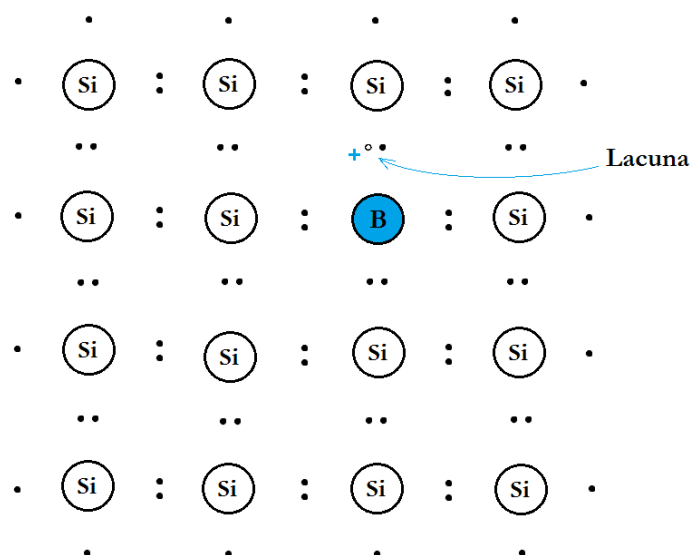


Figura 142: Per esempio viene inserito un atomo di boro, tutti e tre i suoi elettroni di valenza formano i legami con gli atomi di silicio, che però sono quattro, quindi in un legame si viene a creare una lacuna.

Si pensi ora ad una cella fotovoltaica un po' più completa, essa è composta da due strati di semiconduttore, uno trattato col drogaggio di tipo n (regione n) ed uno con quello di tipo p (regione p), posti uno accanto all'altro. Questa combinazione viene chiamata giunzione p-n.

Appena le due sezioni vengono a contatto si verifica un fenomeno, detto di Diffusione, che spinge gli elementi di una moltitudine a fuggire da essa. Quindi gli elettroni liberi, molto abbondanti nella regione n, tendono a spostarsi verso la regione p, ricca di lacune, riempiendone i primi strati. Si viene così a creare una zona di svuotamento, non più neutra a causa delle cariche che si sono spostate.

Gli elettroni, posizionatisi nella zona a drogaggio p, formano una area di carica negativa e, lasciando libera una porzione della zona a drogaggio n, creano in essa una regione carica positivamente (Figura 15).

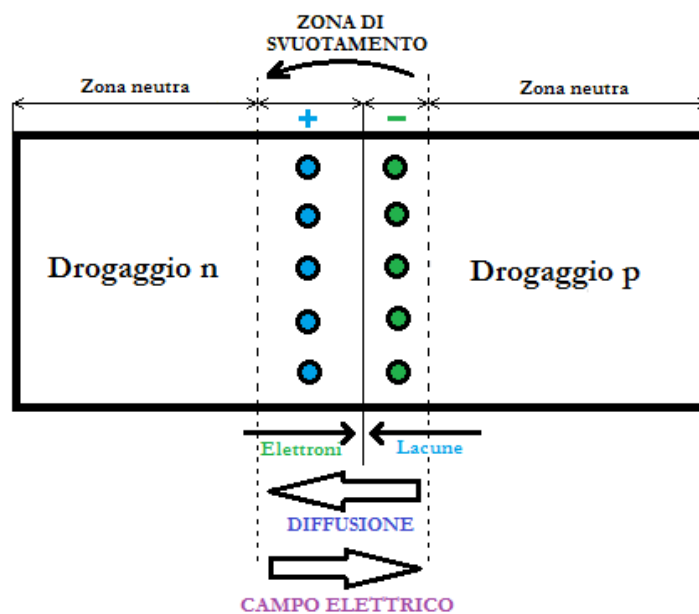


Figura 15: Il fenomeno di diffusione può essere inteso come diretto nel senso della freccia in figura poiché considerato per convenzione positivo e gli elettroni che si spostano danno un contributo di segno negativo.

Questo fenomeno si arresta da solo poiché man mano che la zona carica va allargandosi si crea un campo elettrico che va dalle cariche positive verso le negative (come in Figura 15), dando quindi contributo opposto a quello della diffusione. Ad un certo punto i due effetti si pareggiano creando una situazione di equilibrio.

Mettendo insieme quanto già detto si arriva al funzionamento di una cella fotovoltaica ideale completa, composta da una giunzione p-n con la zona n e p collegate tra loro mediante un circuito esterno a cui verrà collegato il carico.

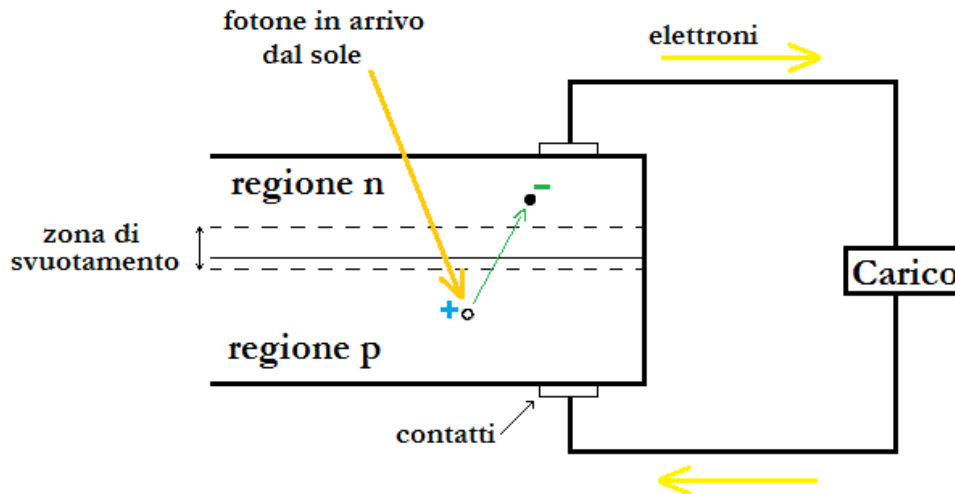


Figura 3: Caso di funzionamento cella fotovoltaica.

La cella fotovoltaica viene posta alla luce del sole e quindi su di essa arriva un flusso di fotoni di diversa energia. Si consideri per ora un singolo fotone di energia sufficiente a innescare l'effetto fotoelettrico.

Il fotone che giunge sulla superficie della giunzione p-n viene assorbito da un atomo di Silicio che produce una coppia elettrone-lacuna. L'elettrone, libero di muoversi, può prendere però una qualsiasi direzione in modo completamente aleatorio. Se questo elettrone si è liberato nella regione p e per caso si dirige verso la regione n (caso mostrato in Figura 16) allora attraversa la zona svuotata e giunge in quest'ultima regione aumentandone la concentrazione di elettroni in banda di conduzione. Si capisce però che questa condizione, che si verifica raramente, impone grossi limiti al processo. E' infatti preferibile che il fotone irradi la zona di svuotamento in cui è presente il campo elettrico, generato dalla giunzione (Figura 17), che spingerà gli elettroni verso la regione n. Perché ciò avvenga nella maggioranza dei casi, si drogherà poco la zona p in modo che la regione di carica svuotata ad essa relativa risulti molto ampia.

Una buona parte dei fotoni giunti sulla giunzione avrà dato così luogo allo stesso risultato, aumentando notevolmente il numero di elettroni liberi nella regione n. Tutti questi elettroni in eccesso vengono attratti verso le lacune della zona p a cui sono collegati direttamente mediante il circuito elettrico (senza dover quindi riattraversare la regione di svuotamento). Si crea così

un flusso di elettroni sul filo conduttore che da luogo ad una corrente tanto maggiore quanto maggiore la quantità di luce incidente.

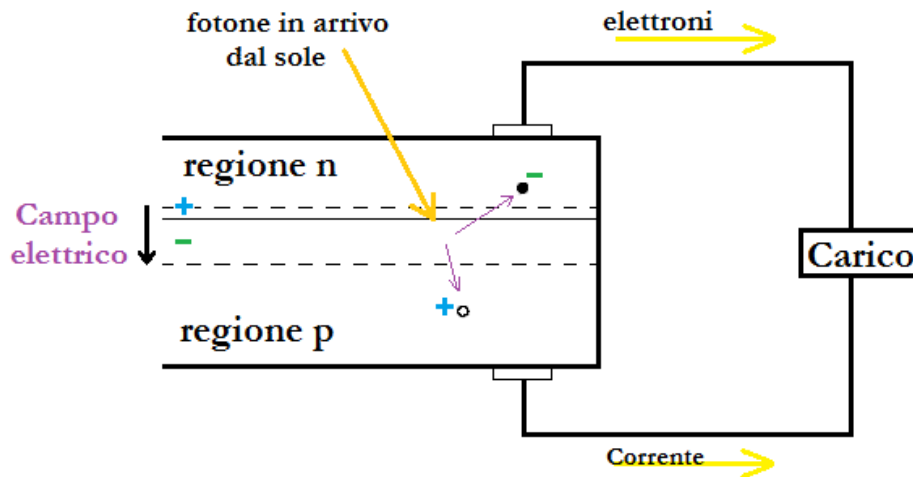


Figura 4: Funzionamento nel caso ottimale. Il fotone crea una coppia elettrone-lacuna all'interno della zona di svuotamento relativa alla regione p. Il campo elettrico ivi presente spinge l'elettrone verso la zona n e la lacuna verso la zona p. La moltitudine di elettroni presenti nella regione n fluisce lungo il filo conduttore creando una corrente, presa convenzionalmente con segno positivo e quindi nel verso opposto a quello degli elettroni che sono carichi negativamente.

1.5.2 Efficienza

A questo punto risulta importante introdurre il concetto di efficienza di conversione di una cella fotovoltaica, che indica la percentuale di energia luminosa che viene trasformata in energia elettrica disponibile.

$$\text{Efficienza}_{\text{CELLA}} = \frac{(P_{\text{CELLA}}/\text{Area}) [\text{W/m}]}{P_{\text{LUCE}} [\text{W/m}]}$$

Idealmente questo valore potrebbe essere considerato come 100%, ma purtroppo a causa di imperfezioni del materiale e non idealità, questa percentuale risulta molto inferiore nella pratica.

Per celle commerciali l'efficienza è in genere compresa tra il 6% (per quelle realizzate con silicio amorfo) e il 17% (per quelle al silicio monocristallino). La ricerca però sta compiendo passi da gigante ed esistono prototipi che superano l'efficienza del 30%. Difatti è stato recentemente progettato dagli scienziati del dipartimento di energia degli Stati Uniti, un pannello fotovoltaico che raggiunge il 40,8% di efficienza, utilizzando la tecnologia di celle a tripla giunzione. Inoltre, un istituto di ricerca tedesco ha creato una cella che raggiunge un'efficienza del 41,1%

mediante la tecnologia tripla giunzione combinata con la concentrazione solare.

Per semplicità si considereranno di seguito sempre celle di base, a singola giunzione.

Le cause principali di inefficienza nella conversione dell'energia luminosa in energia elettrica sono:

- Fotoni con energia sotto soglia: come già detto non tutti i fotoni posseggono un'energia sufficiente ad innescare l'effetto fotoelettrico e quindi quest'ultimi non danno contributo ai fini della conversione dell'energia solare in elettricità.
- Eccesso di energia dei fotoni: alcuni fotoni, al contrario dei precedenti, posseggono troppa energia, come visto nel sottocapitolo 1.4 l'energia in eccesso viene dissipata in calore all'interno della cella.
- Riflessione: una piccola quantità di fotoni non riesce a penetrare all'interno della cella ma viene riflesso verso l'esterno.
- Effetto di shunt: a causa di difetti ed impurità dello strato di silicio possono venirsi a creare percorsi di corrente alternativi al filo conduttore. Presentando questi percorsi una resistenza (R_{sh}) non infinita, parte della corrente potrebbe filtrare in essi invece che alimentare il carico sul percorso voluto.
- Conversione di Eg in energia elettrica: Il voltaggio a circuito aperto che può essere ottenuto è limitato dall'entità della barriera di potenziale presente nella giunzione p-n. Si può quindi ottenere al massimo il valore dell'energy gap del semiconduttore utilizzato.
- Ricombinazione: come accennato in precedenza non tutte le coppie elettrone-lacuna vengono spinte nella giusta direzione dal campo elettrico, una parte si ricombina all'interno della cella.
- Perdite resistive: la corrente generata è soggetta a perdite ohmiche dovute alla presenza di resistenze parassite in serie (R_s), dovute alle connessioni elettriche.

In Figura 18 viene mostrata una quantificazione percentuale, approssimativa, di queste perdite.

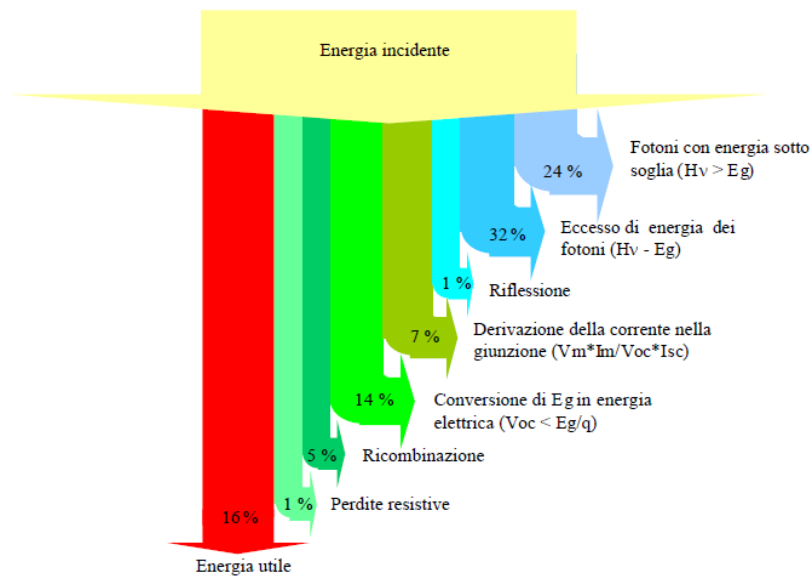


Figura 18: Principali cause di inefficienza.

Anche l'aumento di temperatura della cella fotovoltaica riduce l'efficienza. E' stato stimato che quest'indice cala dello 0,35-0,45% all'aumentare di ogni grado Celsius.

Inoltre, essendo l'efficienza un parametro dipendente dalla potenza incidente della luce, sarà influenzato anche da tutte le variabili che incidono sulla quantità di potenza che arriva sulla cella.

1.6 Caratteristiche elettriche della cella fotovoltaica

Volendo schematizzare il funzionamento della cella si penserà alla giunzione p-n come a un diodo, che permette il passaggio di corrente in un'unica direzione.

In quest'ottica l'effetto fotoelettrico e di conseguenza il circuito equivalente della cella, può essere graficato come segue in Figura 19.

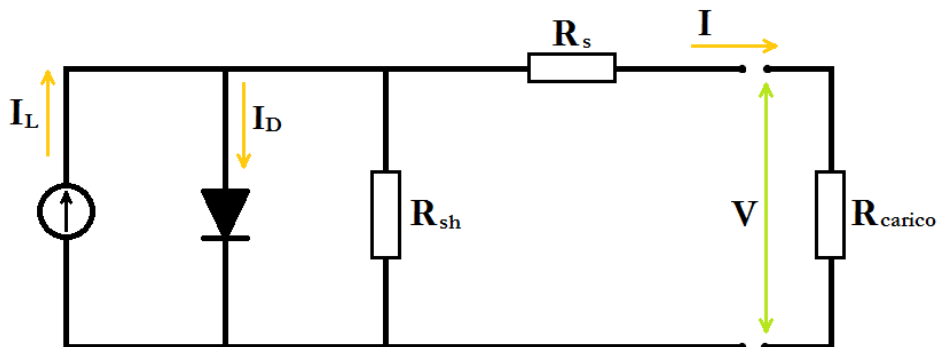


Figura 19: Circuito equivalente della cella fotovoltaica.

Sapendo che:

I_L è la corrente fotogenerata, ovvero la corrente che viene generata dalla luce solare;

q è la carica dell'elettrone e corrisponde a $1,6 \times 10^{-19}$ C;

k è la costante di Boltzmann che vale $1,3806505 \times 10^{-23}$ J/K;

T è la temperatura assoluta in kelvin;

N è il fattore di idealità;

R_{sh} è detta resistenza in parallelo o di shunt, essa rappresenta quelle perdite dovute a tutte le correnti di dispersione (leakage) che si hanno all'interno della cella;

V è la tensione nella cella;

R_s è la resistenza dovuta ai contributi parassiti legati alle connessioni elettriche, rappresenta l'insieme delle resistenze dovute sia al materiale proprio della cella che ai contatti;

I_D è la corrente che riesce ad attraversare la giunzione della cella;

I_0 è la corrente inversa di saturazione del diodo, è una costante che dipende dalle caratteristiche dei due semi-conduttori che formano la giunzione e dalla temperatura;

L'equazione della cella sarà:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V + R_s I)}{N k T}} - 1 \right)$$

Sulla base di questi elementi si ottiene la curva caratteristica I-V, Figura 20.

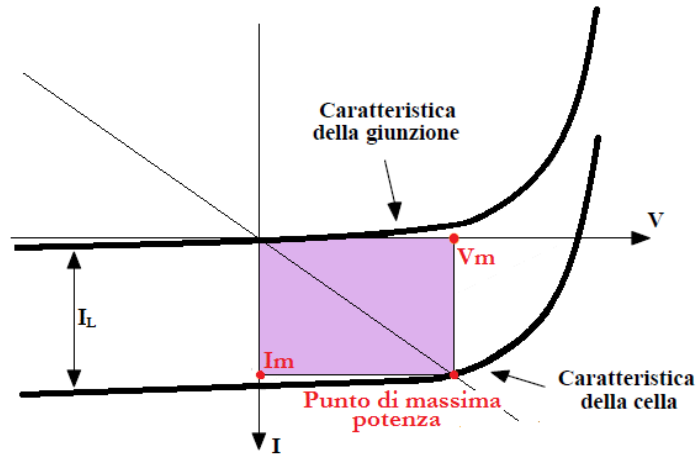


Figura 20: Caratteristica I-V cella fotovoltaica

Dal circuito equivalente emerge che il comportamento di una cella fotovoltaica illuminata dal sole è analogo a quello di un diodo in parallelo ad un generatore di corrente e quindi graficamente la caratteristica I-V della cella risulta pari a quella di un diodo traslata però verticalmente di una quantità pari alla corrente fotogenerata I_L .

Come si può notare in Figura 20 la corrente, posta sull'asse delle ordinate, è rivolta verso il basso, questo perché è stato scelto per convenzione che la corrente sia positiva. Difatti questo grafico viene spesso disegnato girato nel seguente modo (Figura 21), anche perché solo in questo quadrante la cella è effettivamente attiva.

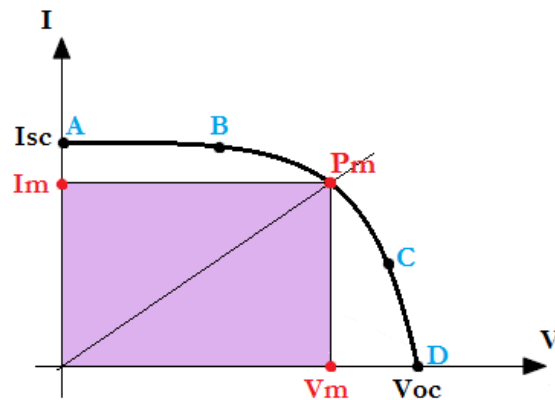


Figura 21: Caratteristica I-V con regioni di funzionamento

La curva viene divisa in tre aree che contraddistinguono tre diverse regioni di funzionamento:

AB: la cella si comporta in maniera simile ad un generatore ideale di corrente;

CD: la cella si comporta in maniera simile ad un generatore ideale di tensione;

BC: tipica zona di funzionamento della cella, è in questa zona che si trova il punto di massima potenza.

La corrente nel punto A (I_L) è la stessa che circolerebbe nel caso in cui la cella fotovoltaica fosse chiusa su un cortocircuito, per questo prende il nome di corrente di cortocircuito (I_{sc}).

La tensione nel punto D è la tensione che si avrebbe ai morsetti della cella in assenza di carico, viene quindi detta tensione a circuito aperto (V_{oc}).

Scegliendo un carico opportuno sarà possibile far lavorare la cella nelle condizioni di massima potenza (P_m).

Come già detto alla fine del sottocapitolo 1.5, la quantità di luce che raggiunge la superficie della cella (Irraggiamento o P_{LUCE}) e la temperatura a cui questa si trova, influenzano notevolmente il suo andamento caratteristico. In Figura 22 sono proposti due grafici che illustrano come questi parametri influiscono sul funzionamento complessivo.

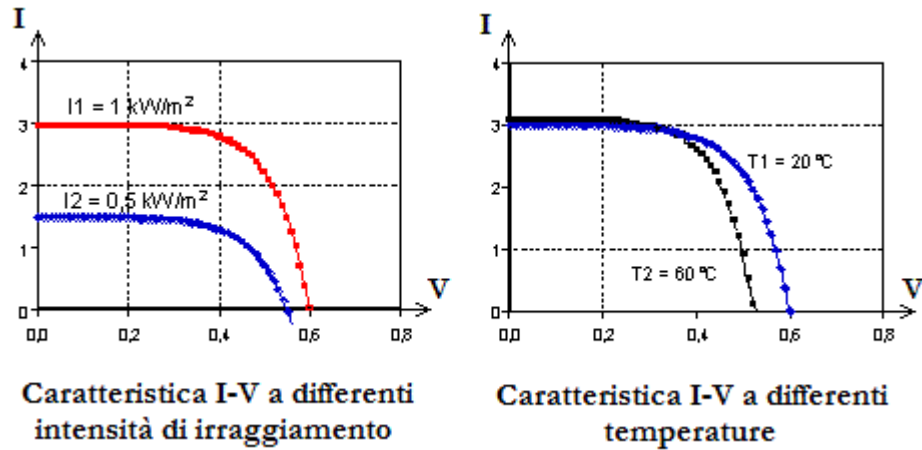


Figura 22: Caratteristiche I-V di una cella fotovoltaica al varie condizioni di irraggiamento solare e temperatura.

1.7 Composizione sistema fotovoltaico

1.7.1 Composizione cella fotovoltaica

Innanzitutto è doveroso precisare da cosa è realmente composta una singola cella fotovoltaica (versione meno schematica di Figura 16 e 17).

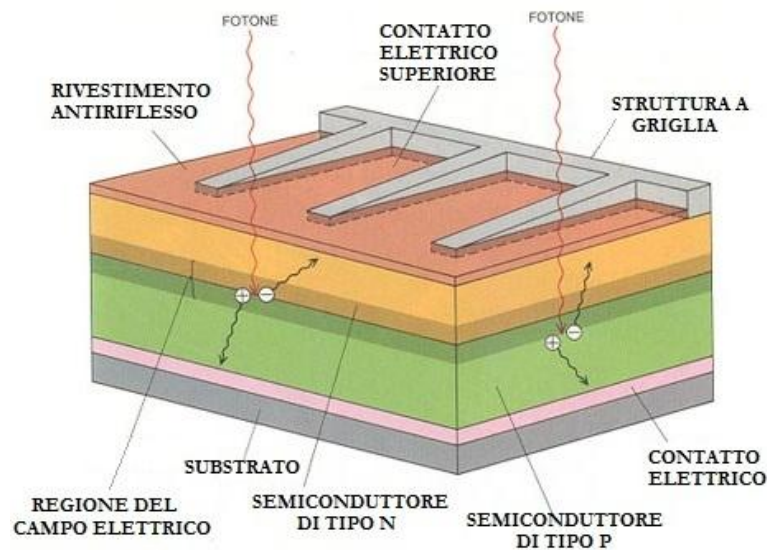


Figura 53: Cella fotovoltaica

Come si può vedere in Figura 23 essa viene realizzata sovrapponendo vari strati orizzontalmente. Sopra ad una lamina di metallo, che farà da contatto

inferiore, viene adagiato il primo strato di materiale semiconduttore (trattato col drogaggio di tipo p), vi viene poi posto sopra il secondo strato di tipo n, in modo da formare la giunzione p-n vista in precedenza. Come contatto superiore (detto anche contatto frontale) viene posta una griglia metallica con filamenti non più larghi di $120\mu\text{m}$, che avrà il compito di raccogliere gli elettroni lasciando però la superficie della cella il più possibile scoperta. Infatti, la forma e la grandezza di questa griglia rappresenta il compromesso tra un buon contatto elettrico e la trasparenza della superficie, in modo che si possano raccogliere più fotoni possibili minimizzando l'effetto ombra.

La cella è poi completata da un rivestimento antiriflesso sulla sommità (il cui scopo si chiarirà in seguito) ed è posta su un substrato che funge da base d'appoggio.

Si sono viste, nel sottocapitolo 1.5, le principali cause di inefficienza di una cella fotovoltaica. Alcune di esse vengono in buona parte attenuate adottando, sulla tipologia di cella appena vista, una serie di accorgimenti.

- Per ridurre le perdite per riflessione si possono applicare uno o più strati antiriflesso, ad esempio di SiO_2 , TiO_2 o di SiN (nitruro di silicio, che conferisce il tipico aspetto bluastrato), sulla sommità della cella. Questi strati fungeranno anche da protezione contro gli agenti esterni. Un altro contributo positivo può essere dato lavorando la superficie della cella in modo tale da consentire ai fotoni di entrare con più angoli di incidenza; i fotoni rimarranno per più tempo nella giunzione p-n, aumentando la probabilità di assorbimento.
- Le perdite dovute alla ricombinazione degli elettroni possono essere ridotte innanzitutto grazie all'utilizzo di materiali di buona qualità, ad esempio utilizzando Silicio monocristallino a grado di purezza elettronico (impurità al massimo ogni 10^7 parti di Silicio, si indica con EG-Si). Un'altra importante accortezza richiede che lo spessore dello strato n venga realizzato di $0,1-0,2\ \mu\text{m}$ in modo da far penetrare l'onda elettromagnetica (luce) fino allo strato voluto. Si è stimato che i fotoni penetrano in media di $0,3\ \mu\text{m}$, in questo modo verranno assorbiti nella zona di svuotamento ove è presente il campo elettrico che li spinge nella direzione voluta (Figura 17).
- Come già detto in precedenza, è possibile minimizzare l'effetto ombra, e quindi massimizzare la quantità di fotoni che arrivano sulla

giunzione, creando un contatto frontale a griglia con i filamenti molto sottili. Alcune tecnologie consentono, ad oggi, di utilizzare filamenti ultra sottili della larghezza di 20-30 μm .

1.7.2 Composizione modulo fotovoltaico

La cella fotovoltaica è l'elemento che sta alla base dell'omonima tecnologia, ma da sola fornisce valori di tensione e corrente molto limitati in confronto a quelli necessari per far funzionare buona parte degli apparecchi utilizzatori. Inoltre, così composta, è estremamente fragile e non è elettricamente isolata. Per queste ragioni vengono assemblate più celle, collegate tra loro in serie e/o parallelo, che vanno a costituire un'unica struttura chiamata: modulo fotovoltaico.

In passato, il modulo veniva a sua volta preassemblato meccanicamente allo scopo di creare un pannello, ma con l'aumentare delle dimensioni dei moduli questa pratica è caduta in disuso. Perciò dal modulo si passa direttamente alla stringa.

A seconda della tensione richiesta dall'utilizzatore, vengono interconnessi più moduli, in serie o parallelo, che vanno a formare una stringa. A loro volta, più stringhe collegate in parallelo formano il generatore fotovoltaico (Figura 24).



Figura 24: Collegando 36 celle (o multipli) si forma un modulo fotovoltaico, che a sua volta crea una stringa, che compone il generatore fotovoltaico.

Verrà trattato in particolare il modulo, in quanto stringa e generatore sono da esso derivati.

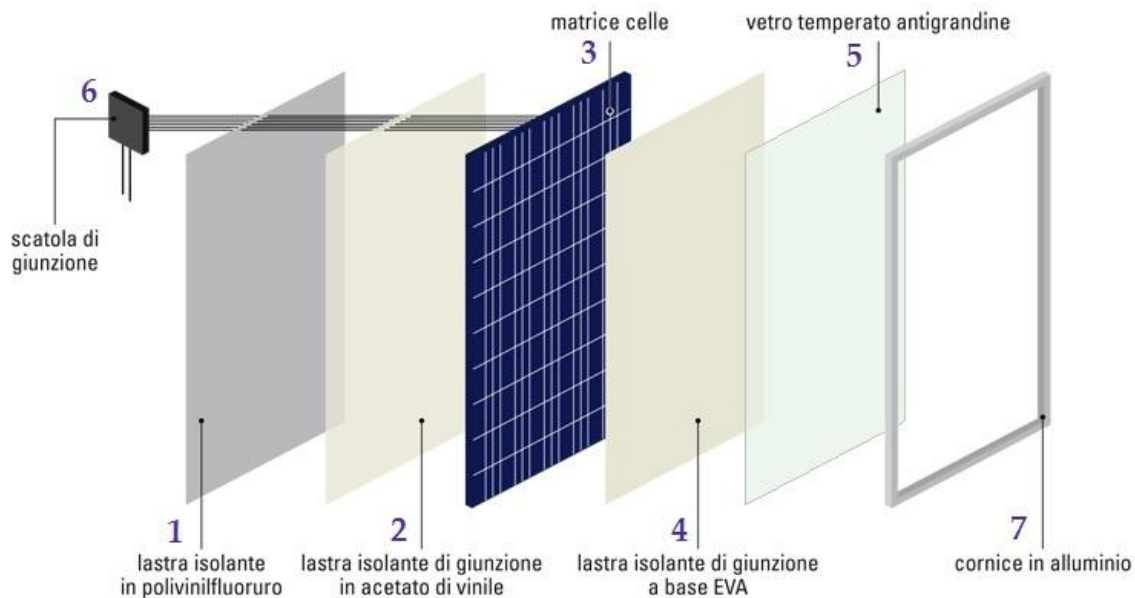


Figura 25: Composizione modulo fotovoltaico

Come si vede in Figura 25, un modulo fotovoltaico standard è composto dalla sovrapposizione di vari strati ed è completato da contatti elettrici e supporti meccanici:

1. Superficie posteriore di supporto: come dice il nome, questa lastra viene utilizzata come supporto per gli strati superiori, perciò deve essere di un materiale isolante e con scarso coefficiente di dilatazione termica. Viene solitamente usato o vetro temprato o teldar. Il teldar è un film-UV di polivinilfluoruro (PVF). Questo polimero, che offre una protezione a lungo termine contro gli agenti atmosferici, è anche resistente ai raggi UV ed alla maggior parte dei composti chimici. Fa da barriera contro l'umidità, fornisce un eccellente isolamento elettrico ed al contempo ha buona resistenza e durata. Inoltre brucia molto lentamente ed ha una bassa permeabilità ai vapori.
2. Strato isolante di giunzione: è una lastra isolante in acetato viniletilenico (E.V.A.). Questo materiale dielettrico è in grado di garantire il contatto tra il primo strato e la matrice delle celle eliminando gli eventuali interstizi ed isolando elettricamente la parete.

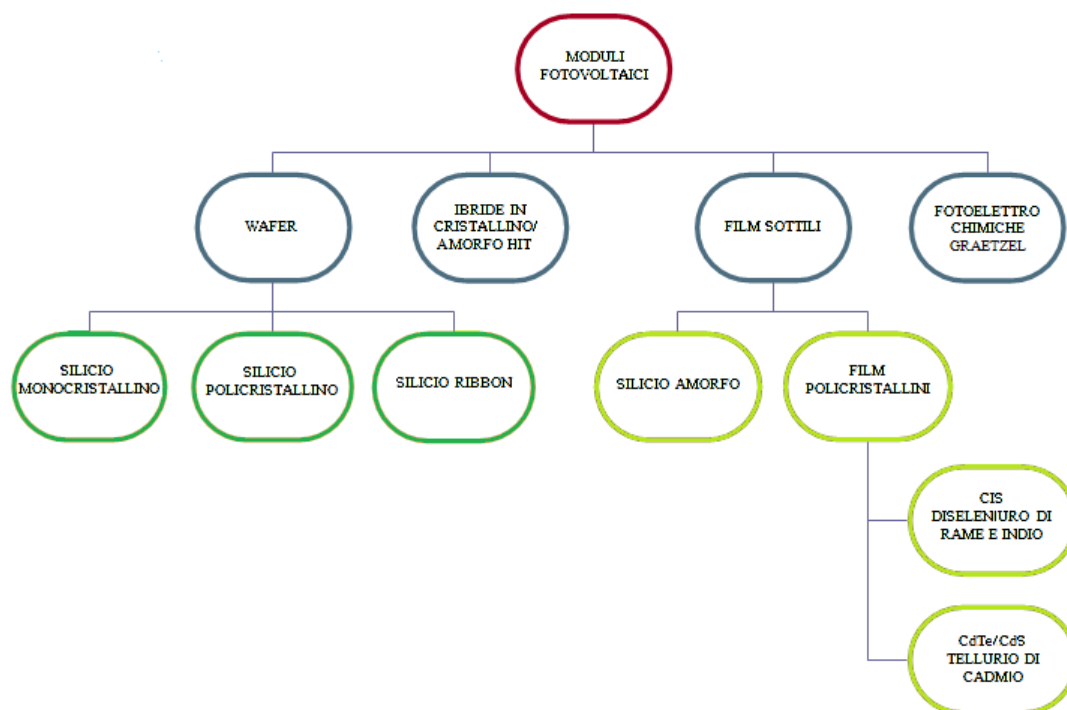
3. Matrice del modulo: questa matrice è composta da 36 celle fotovoltaiche, o multipli, interconnesse opportunamente tra loro. Per creare un modulo fotovoltaico da 36 celle, esse vengono collegate in serie tramite dei “nastrini”, sottilissime connessioni elettriche. Se invece si vogliono realizzare moduli da 72 celle o altri multipli, si collegano in parallelo due o più stringhe da 36 celle in serie.
4. Strato isolante di giunzione: si pone un altro strato di acetato vinilileno, analogo al secondo e con la stessa funzione di collante inerte.
5. Protezione meccanica anteriore: sulla faccia del modulo, illuminata dalla luce del sole, viene posta una lastra di vetro temprato. Questo strato ha lo scopo di proteggere la matrice di celle, e tutti gli strati che sovrasta, dagli agenti esterni e garantire la massima trasparenza alle radiazioni solari.
6. Scatola di giunzione: fissata alla parte posteriore del modulo si trova la scatola di giunzione. Essa consiste in una morsettiera ove sono fissati i collegamenti elettrici finali dei nastrini, ai capi dei quali si legge la differenza di potenziale del modulo fotovoltaico (per esempio, in un modulo composto da 36 celle la differenza di potenziale vale 18Volt). In questa scatola vengono anche collocati i diodi di by-pass, che hanno l'importante funzione di impedire che nelle celle possa circolare un'eventuale corrente inversa, la quale può creare grossi danni. Questa corrente può essere causata dall'ombreggiamento di alcune celle che, a causa di questo, si spengono diminuendo la conducibilità elettrica di tutta la serie. Le celle ombreggiate rallentano quindi il passaggio di corrente e diventando esse stesse un carico per le celle ancora in funzionamento, assorbendo parte dell'energia prodotta da quest'ultime. Inserendo in parallelo, ad ogni tot celle in serie, un diodo si diminuiranno drasticamente gli effetti negativi dell'ombreggiamento, poiché la corrente eviterà le celle ombreggiate passando invece dal percorso alternativo, a impedenza più bassa, messo a disposizione dal diodo che ne obbliga il passaggio nell'unico verso consentito. Per contenere i costi e

semplificare il processo produttivo è stato scelto di porre un diodo di by-pass ogni 12,18 o 20 celle in serie.

7. Supporto meccanico: una volta sovrapposti tutti gli strati precedenti, essi vengono fissati in una cornice di alluminio mediante del sigillante. In questo modo sarà più facile inserire successivamente i moduli nelle strutture di sostegno che hanno il compito di sorreggerli ed orientarli opportunamente verso il sole.

Risulta importante aggiungere che, anche nell'assemblaggio delle stringhe, vengono posti i diodi di by-pass per contrastare l'effetto di ombreggiamento dei moduli. Senza il loro utilizzo, in presenza di un singolo modulo ombreggiato, l'intera corrente dell'impianto verrebbe determinata da quello. Quindi, nelle stringhe di moduli collegati in parallelo, viene solitamente inserito un diodo di by-pass per ogni modulo.

Si vedano ora le principali tipologie di celle solari fotovoltaiche con cui si può realizzare un modulo:



Wafer in silicio monocristallino (m-Si)

Queste celle si presentano di forma ottagonale, diametro di 10-12 cm e spessore 0,2÷0,3 mm, sono di colore blu scuro uniforme. Sono costruite a partire da lingotti cilindrici di silicio monocristallino del diametro di 13-20cm con il grado maggiore di purezza, usato solitamente per la produzione di componentistica elettronica, silicio “EG-Si” (grado elettronico) che presenta impurità ogni 10^{-8} - 10^{-9} . Essendo queste celle ricavate tagliando i lingotti, risulterà impossibile realizzarle senza sprecare materiale, ma grazie all’alto grado di purezza garantiscono però prestazioni in termini di efficienza molto alte. Si raggiunge infatti un’efficienza dal 14 al 17% molto stabile ed affidabile. L’alta complessità e lo spreco di materiale rendono però queste celle costose.

Wafer in silicio policristallino (p-Si)

Queste celle sono nate come riciclaggio degli scarti di lavorazione della produzione di componentistica elettronica e delle celle in silicio monocristallino. Il materiale di scarto viene rifuso per ottenere una lastra cristallina compatta che sarà semplice da tagliare della forma desiderata. Infatti il vantaggio di queste celle risiede nella facilità con cui è possibile crearle di forme adatte ad essere unite per comporre un modulo, senza scarti di materiale e col minor spreco di spazio. Vengono solitamente tagliate di forma quadrata con lato di 15cm e spessore di circa 0,2 mm; il colore blu cangiante è dovuto alla struttura non omogenea del silicio policristallino. Essendoci pochissimo spreco di materiale, riutilizzando addirittura materiali di scarto e risultando più semplice la fabbricazione, queste celle sono più economiche di quelle viste in precedenza; ma tutto ciò va a scapito del grado di purezza del Silicio (che risulta più sensibile alle impurità) e quindi diminuisce anche l’efficienza, che per questo tipo di celle si aggirerà dal 13 al 16%.

Wafer in Silicio ribbon

Sono molto simili alle celle di silicio policristallino ma invece di tagliare una lamina piana, con il conseguente spreco di una piccola parte di materiale, il silicio viene fuso e fatto colare direttamente in stampi di strati piani della misura e forma desiderata. Però il rendimento è ancor più basso, 12-15%.

Film sottili in silicio amorfo

Questa tecnologia consiste nella deposizione di uno strato sottilissimo di silicio cristallino (1-2 μ m) in modo continuo su una vasta gamma di superfici d'appoggio, anche trasparenti e flessibili. Si vengono così ad ottenere film di uno spessore totale pari a 1-2 mm. Tutto questo comporta svariati vantaggi: forte risparmio di materiale pregiato, costi finali sensibilmente ridotti e adattabilità su ogni superficie (potrà infatti essere usato come materiale di rivestimento per coperture ed altre integrazioni architettoniche). Inoltre possiede un energy gap (E_g) maggiore rispetto a quello del silicio cristallino (1,7 invece che 1,12 eV), questo rende il silicio amorfo più efficiente nell'assorbire la parte di radiazione solare visibile all'occhio umano, ma fallisce nell'assorbire la parte infrarossa.

L'efficienza risulta di molto inferiore, dal 4 al 6%, ed ha scarsa stabilità col passare del tempo. Perde il 20% delle prestazioni di potenza nominali durante i primi anni di funzionamento; questo fatto costringe a un sovradimensionamento della superficie installata in modo da raggiungere la produzione di energia richiesta anche a distanza di svariati anni.

Film sottili policristallini CIS

Il materiale semiconduttore utilizzato in questo tipo di celle è il diseleniuro di rame e indio. In alcuni casi viene inserito anche il gallio e/o lo zolfo, tali celle prenderanno il nome di CIGS. Questi materiali, al contrario del silicio amorfo, hanno il vantaggio di essere molto stabili nel tempo, in quanto non subiscono alcun degrado a seguito dell'esposizione al sole; e posseggono un'efficienza molto più alta, fino all'12%.

Inoltre, è stata testata la loro affidabilità per utilizzi esterni, però bisogna tenere in conto che sono sensibili al calore e all'umidità, di conseguenza dovranno essere ben sigillati. Non è da tralasciare il fatto che il selenio è un elemento tossico, ma le modeste quantità presenti rendono questo svantaggio secondario.

Il processo di produzione delle celle CIS è facilmente automatizzabile, grazie a questo, esse dovrebbero raggiungere costi di produzione inferiori a quelli delle celle in silicio cristallino. Inoltre, esse posseggono il vantaggio comune a tutti i film, potendo essere realizzate su substrati flessibili sono adattabili a svariati utilizzi architettonici.

Film sottili policristallini CdTe CdS

Queste celle sono formate da uno strato di tellurio di cadmio (CdTe) che possiede un'energy gap di circa 1,45 eV, ottimale per l'assorbimento della luce solare; e da uno strato di solfuro di cadmio (CdS) che assorbe solo una piccola frazione di radiazione solare e lascia che la restante raggiunga lo strato CdTe.

Questi materiali hanno buone caratteristiche meccaniche e sono resistenti a variazioni di temperatura; e la possibilità di realizzare queste celle con strati sottilissimi di materiale aiuta a contenere i costi. Si raggiunge così un'efficienza del 10%; però non è da trascurare la tossicità del cadmio e la non provata stabilità.

Celle ibride in cristallino/amorfo (HIT)

Sono costituite dalla deposizione di uno strato in silicio amorfo su uno di silicio monocristallino ad alta efficienza, in modo da creare una sezione perfettamente simmetrica che consente la generazione di corrente attraverso l'esposizione di entrambi i lati. L'efficienza di queste celle raggiunge il 17% e la loro conformazione le rende adatte a particolari applicazioni architettoniche.

Celle fotoelettrochimiche di Graetzel

Queste celle sono nate dall'idea di riprodurre il processo di fotosintesi delle piante. Uno strato di metallo (ossido di titanio) fa da accettore di elettroni ed una soluzione di colorante (molecole organiche) servirà come fonte di elettroni. Il colorante, eccitato dalla luce del sole, trasferisce elettroni al titanio che li assorbe generando una corrente elettrica.

Per incrementare l'efficienza di queste celle, inizialmente molto bassa, si è in seguito scelto di sostituire i coloranti standard, rutenio e iodio, con porfirina e cobalto. Questa combinazione, che assume colore verde, permette di aumentare l'assorbimento dei fotoni e, di conseguenza, lo scambio di elettroni tra colorante e ossido di titanio. Si è così giunti ad un'efficienza di oltre il 12 %.

Le celle Graetzel hanno un vasto campo di applicabilità, grazie all'utilizzo di supporti flessibili e sottili, ed i costi di produzioni rimangono comunque abbastanza contenuti.

Tuttavia i coloranti usati si degradano facilmente se esposti al calore o a luce ultravioletta.

Nelle precedenti tecnologie realizzative di moduli fotovoltaici non è mai comparso l'utilizzo dell'arseniuro di gallio, materiale semiconduttore dalle innumerevoli qualità. Questo prodotto, molto usato in applicazioni aeree spaziali, risulta troppo costoso per l'utilizzo terrestre, dove il problema di peso e spazio utilizzato è di secondaria importanza. Come già accennato, di seguito verranno trattate argomentazioni legate ad applicazioni terrestri e di conseguenza l'utilizzo dell'arseniuro di gallio verrà tralasciato.

1.7.3 Celle e moduli di ultima generazione e ulteriori applicazioni

Finora si sono considerate, per convenzione, sempre celle fotovoltaiche e moduli “di base” (standard) e ne sono quindi state espresse le efficienze senza tener conto dell’ eventuale applicazione di tecnologie atte migliorarne le prestazioni. Di seguito saranno spiegate tre tecniche che possono aumentare l’efficienza di celle e moduli:

1. Cella multigiunzione: quest’importante tecnologia, ormai consolidata, consiste nel sovrapporre due o più giunzioni per ogni singola cella. Le celle, così create, prenderanno il nome di celle a giunzione multipla ed avranno un’efficienza molto maggiore rispetto a quelle comuni.

L’idea è quella di sovrapporre tre strati di materiali semiconduttori diversi tra loro, in modo che ciascuno di essi assorba un particolare intervallo di energia solare che viene tralasciato dagli altri due. Così facendo la banda di energia che la cella è in grado di catturare risulta molto più ampia e si evita di sprecare la parte di energia in eccesso rispetto al valore dell’energy gap del materiale. In Figura 26 si può vedere un esempio di cella multigiunzione.



Figura 26: Esempio cella multigiunzione.

Si nota facilmente che, perché questa tecnologia abbia successo, è indispensabile che gli strati siano molto sottili in modo da permettere alla luce di giungere fino all’ultima giunzione; i tre semiconduttori vengono quindi depositati con la tecnica a film sottile, in modo da creare uno strato di materiale sufficientemente sottile.

2. Moduli a concentrazione: questa tecnica consiste nell'utilizzo della concentrazione ottica di luce solare mediante superfici riflettenti di basso costo; questi collettori ottici incanalano i fotoni sulle celle fotovoltaiche che potranno essere quindi fortemente ridotte in numero. In questo modo sarà possibile aumentare la quantità di energia prodotta diminuendo il numero di celle fotovoltaiche e quindi il costo del modulo.



Figura 27: Moduli a concentrazione solare

Come si può vedere in Figura 27, questi moduli presentano un sistema di movimento che sposta i collettori in modo di far arrivare i raggi solari sempre nell'area di accettazione ottica del concentratore. Questo sistema permette di individuare in ogni momento il massimo flusso di radiazione solare, garantendo quindi la maggior produzione di energia elettrica. Bisogna però precisare che i collettori non sono in grado di concentrare la componente diffusa della radiazione solare, ed avendo parti meccaniche in movimento si pone il problema sull'affidabilità dell'impianto, che per essere competitivo dovrebbe raggiungere almeno i 20 anni di operatività.

3. Inseguitori solari: come si vedrà di seguito i moduli fotovoltaici vengono fissati ad una struttura meccanica di sostegno. Questa struttura può essere ad inclinazione fissa, ad inseguimento su un solo asse o ad inseguimento totale.

La struttura ad inclinazione fissa non ha parti meccaniche in movimento e quindi non presenta gli svantaggi ad esse associati, ma l'efficienza del modulo così fissato è molto ridotta, in quanto non

viene sfruttata al massimo la luce del sole durante l'arco della giornata e durante l'intero anno.

Nei sistemi di sostegno ad inseguimento con un solo asse variabile, i moduli vengono fatti ruotare lungo un'asse orizzontale. Catturano quindi buona parte della potenza prodotta dal sole durante la giornata, ma non possono tener conto anche dello spostamento del percorso del sole durante l'anno; come avviene invece nelle strutture di sostegno ad inseguimento totale. Quest'ultime prevedono sia l'asse orizzontale mobile sia il verticale.

Migliore è l'inseguimento al percorso del sole maggiore sarà l'efficienza del sistema, ma le ultime due tecniche presentano le problematiche sopracitate legate a sistemi aventi parti meccaniche in movimento.

Si può aggiungere che una nuova frontiera delle strutture ad inclinazione fissa è l'integrazione architettonica del pannello stesso. Esistono infatti pannelli che si integrano negli edifici sostituendosi ad: intonaci di finitura, coperture, vetrate, frangisole, lucernai e tegole (Figura 28). Il vantaggio risiede nel fatto che non è necessario creare spazio addizionale, ma si sfrutta quello già esistente, e non sono necessarie vere e proprie strutture di sostegno.



Figura 28: Esempi di integrazione architettonica di moduli e celle fotovoltaiche.

1.7.4 Sistemi fotovoltaici

Si è visto come vengono realizzate celle e moduli, ma un sistema fotovoltaico non è composto solo da questi elementi. Generalmente esso è formato da: un generatore fotovoltaico (uno o più moduli o stringhe), una struttura di sostegno (a cui sono fissati i moduli), un sistema di controllo e condizionamento della potenza (che gestisce l'energia elettrica creata dal generatore) e varie connessioni elettriche.

Per proseguire più nel dettaglio è necessario fare la distinzione tra due grandi categorie di sistemi:

- Sistemi collegati alla rete (grid-connected)
- Sistemi isolati (stand-alone)

Sistemi collegati alla rete (grid-connected)

Quando un sistema fotovoltaico connesso alla rete locale è in funzione, genera un certo quantitativo di energia elettrica che verrà misurata in KWh (Kilo Watt ora). L'utente sfrutta una parte dell'energia prodotta dal suo impianto e quella in eccesso viene ceduta alla rete locale. Viceversa, nel caso in cui l'utente necessita di elettricità quando l'impianto non è in funzione, la rete locale gli fornirà l'energia di cui ha bisogno.

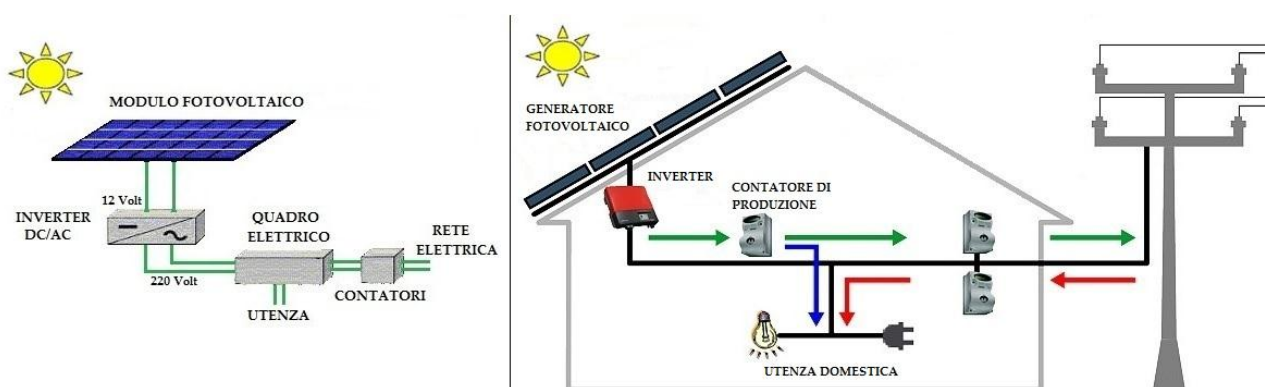


Figura 29: Possibili schemi d'impianto, di sistemi interconnessi alla rete.

Nella figura a destra le frecce verdi indicano l'energia prodotta ed immessa nella rete; la freccia blu indica l'energia prodotta ed utilizzata direttamente per l'utenza domestica; le frecce rosse indicano l'energia prelevata dalla rete nei periodi di inattività dell'impianto.

Come si può vedere in Figura 29, questo tipo di sistema prevede:

- ☛ Una struttura di sostegno dei moduli, può essere: ad inclinazione fissa, ad inseguimento su un solo asse o ad inseguimento totale.

- ✚ Un inverter, ha lo scopo di trasformare la corrente continua (Direct Current), fornita dal modulo, in corrente alternata (Alternative Current), tipo di corrente di cui necessita la maggioranza degli apparecchi ad uso domestico. Questo dispositivo svolge inoltre la funzione di comando e regolazione, per ottimizzare la resa energetica (BOS, Balance Of Sistem), realizza quindi l'adattamento in potenza, effettuando l'inseguimento del punto di massima potenza.
- ✚ Un quadro elettrico, necessario per gestire l'energia di cui fruirà l'utente finale, a cui è direttamente connesso.
- ✚ Due contatori, uno necessario per il conteggio dell'energia in surplus, ceduta dal sistema alla rete locale, e l'altro che conteggia quanta energia elettrica viene richiesta dall'utente in periodi in cui l'impianto non è in funzione.

Da quanto detto finora risultano evidenti alcuni vantaggi. Innanzi tutto in caso il sistema fotovoltaico non sia in funzione o non fornisca un'energia sufficiente si può contare sulla rete locale per l'energia mancante.

In secondo luogo non sono necessarie batterie per immagazzinare l'energia, la rete stessa fa da accumulatore prendendo l'energia in eccesso.

Sistemi isolati (stand-alone)

In un sistema isolato, detto anche autonomo, l'energia prodotta alimenta un carico elettrico (utilizzatore). La parte di energia elettrica in eccesso, fornita dai moduli durante le ore diurne, viene accumulata in apposite batterie. L'energia così immagazzinata viene rilasciata per fornire all'utente l'elettricità di cui ha bisogno nei momenti in cui il generatore fotovoltaico non è in funzione.

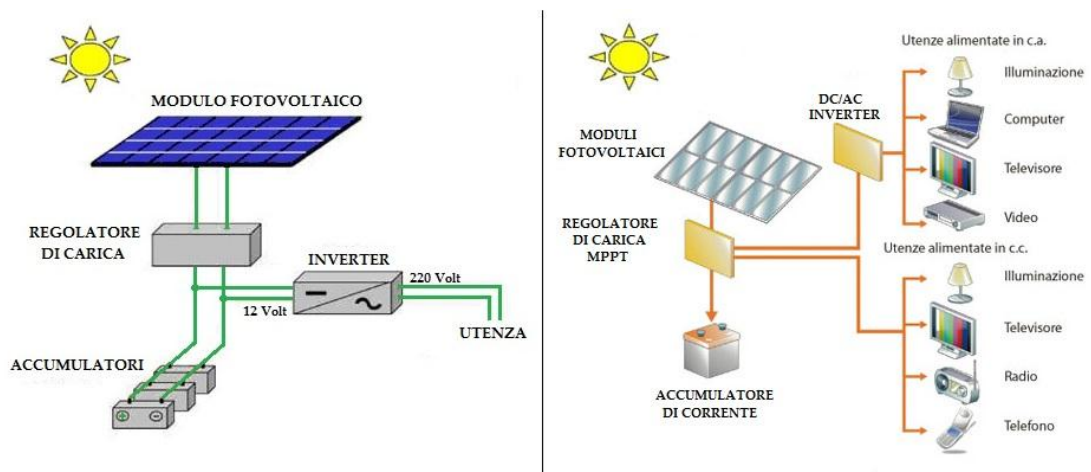


Figura 30: Possibili schemi d'impianto, di sistemi isolati.

Come si può vedere in Figura 30, questa tipologia di sistema fotovoltaico prevede:

- ✚ Una struttura di sostegno dei moduli, può essere: ad inclinazione fissa, ad inseguimento su un solo asse o ad inseguimento totale.
- ✚ Un regolatore di carica, che svolge due importanti funzioni. Innanzi tutto si occupa di ottimizzare la resa energetica delle celle fotovoltaiche ed inoltre ha il compito di preservare gli accumulatori da possibili eccessi di carica, ad opera del generatore fotovoltaico, e da eccessi di scarica, dovuti all'utente. Gestisce la carica delle batterie in funzione delle loro caratteristiche, in modo da aumentarne al massimo la durata nel tempo, che può superare i 10 anni.
- ✚ Batterie di accumulo, dette anche accumulatori, servono ad immagazzinare l'energia in eccesso e a cederla quando richiesto. Queste batterie devono avere delle particolari caratteristiche per svolgere bene la loro mansione: lunga durata a regimi variabili, elevata efficienza di carica/scarica, affidabilità, bassa corrente di aut scarica, limitate esigenze di manutenzione. La scelta del tipo di batteria e della capacità totale è molto importante per la durata della batteria stessa.
- ✚ Un inverter, che, come nei sistemi connessi alla rete, ha lo scopo di trasformare la corrente continua (Direct Current), fornita dal generatore fotovoltaico, in corrente alternata (Alternative Current), tipo di corrente di cui necessita la maggioranza degli apparecchi ad uso domestico.

La necessità di utilizzare delle batterie di accumulo rende il sistema isolato un po' più oneroso rispetto al sistema connesso alla rete, mentre le manutenzioni da effettuare sono praticamente le stesse. Questa soluzione risulta ideale nei casi in cui l'allacciamento alla rete sia troppo caro o illogico. Difatti l'uso di questi sistemi sostituisce l'utilizzo della normale rete elettrica.

Sistemi misti

Si è pensato anche di realizzare sistemi misti (UPS), utili in alcune applicazioni specifiche. L'energia prodotta viene in parte accumulata localmente in batterie ed in parte ceduta alla rete. Questa tipologia di sistemi possiede un vantaggio in comune con i sistemi connessi alla rete, che possono richiedere energia al momento del bisogno, ad esempio di notte quando i moduli fotovoltaici non sono in funzione. Inoltre in caso di caduta (black out) della rete, questi impianti possono continuare a funzionare in modo autonomo.

SOLARE TERMICO

1.8 Introduzione al solare termico e collettore solare

1.8.1 Introduzione al solare termico

Nel sottocapitolo 1.2 si è visto come la radiazione solare giunge sulla terra e di seguito è stato spiegato come il sistema fotovoltaico è in grado di catturare questa energia e trasformarla in energia elettrica. Il sistema solare-termico, invece, sfrutta la componente termica dell'energia solare, ovvero quella che il sole cede normalmente ai corpi che illumina, per generare energia termica.

Esistono diverse tecniche per usufruire dell'energia termica solare, esse verranno suddivise in tre importanti categorie di impianti:

- Impianti termici a basse temperature, fino a 120°C;
- Impianti termici a medie temperature, circa 500°C;
- Impianti termici ad alte temperature (termodinamici), circa 1000°C;

Di ciascuno di questi verrà trattato successivamente il campo di utilizzo e lo scopo finale; ma bisogna precisare che tutti i tipi di impianti si basano su collettori (o pannelli) solari.

Questi dispositivi hanno il compito di assorbire il più possibile l'energia solare e di trasformarla in calore (energia termica).

1.8.2 Generico collettore solare termico

Esistono svariate tipologie di collettori, ciascuna con caratteristiche differenti a seconda dell'utilizzo che si vuole farne, ma il principio di funzionamento è lo stesso per tutte. Si tratta di far circolare un liquido (o in alcuni casi aria) all'interno di tubature che vengono poste a contatto con una lamina di un materiale dipinto di nero, che farà da assorbitore termico. Per le leggi della termodinamica, un corpo a temperatura superiore cede calore ad un altro che si trova a temperatura inferiore, perciò il sole scalda la lamina che si trova a temperatura decisamente più bassa, il colore scuro di quest'ultima aumenta questo effetto, contribuendo a captare e trattenere meglio e più a lungo il calore derivante dai raggi solari. L'assorbitore

termico a sua volta cede calore alle tubature, scaldando il liquido che circola al loro interno. In alcuni casi si tratta di acqua e verrà utilizzata direttamente, in altri si tratta di una soluzione antigelo che, una volta scaldata, potrà essere utilizzata per cedere calore all'ambiente o per scaldare acqua a scopo sanitario. Nel caso degli impianti termici a media-alta temperatura nelle condutture sarà presente dell'aria che farà muovere delle turbine per generare corrente elettrica. Tutto ciò si vedrà più approfonditamente nei prossimi capitoli.

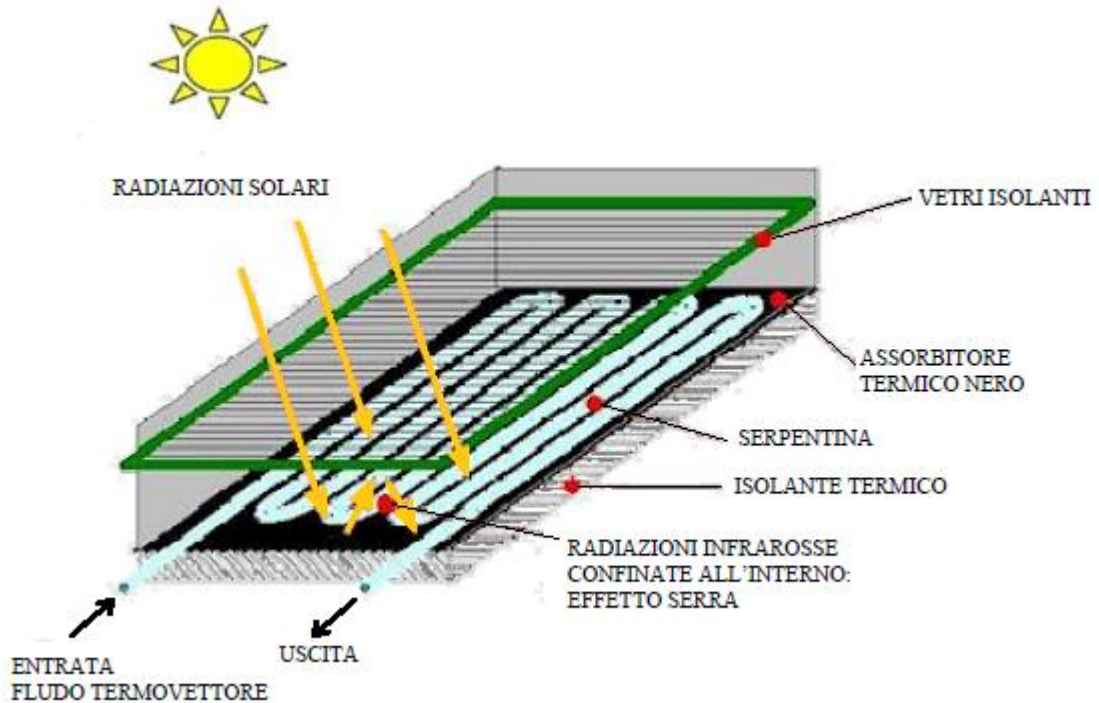


Figura 31: Generico collettore solare termico.

1.9 Solare termico a basse temperature

1.9.1 Applicazioni

Questa tipologia di impianti viene di seguito trattata più nel dettaglio rispetto alle successive, in quanto risulta essere la soluzione più adottata alle latitudini italiane.

Mediante questa tecnologia si può ottenere:

- Riscaldamento dell'acqua calda sanitaria ad uso domestico, alberghiero e ospedaliero;
- Riscaldamento dell'acqua delle docce (stabilimenti balneari, campeggi, ecc.);
- Riscaldamento o preriscaldamento degli ambienti;
- Riscaldamento dell'acqua per processi a bassa temperatura;
- Essiccazione di prodotti agro-alimentari;
- Raffrescamento degli ambienti;
- Cottura di cibi;
- Sterilizzazione;

Come visto in precedenza, il collettore solare termico è il dispositivo che sta alla base dell'omonima tecnologia. Ne esistono di svariati tipi per i diversi utilizzi; ma in generale un pannello solare può scaldare tra i 40 ed i 300 litri d'acqua, ad una temperatura compresa tra i 45 e i 60°C, in una giornata, a seconda dell'efficienza che varia con le condizioni climatiche e con la tipo di collettore tra il 30 e l'80%.

1.9.2 Tipologie di collettori solari

Si vedano ora le principali tipologie di pannelli solari termici:

- **Collettori a piastra (o piani)**

I collettori piani sono termicamente isolati e coperti da un vetro protettivo che può essere di due tipi: selettivo o non selettivo.

In entrambi i casi questo vetro isola termicamente (riduce le perdite per convezione), protegge da pioggia, vento e grandine, sopporta temperature molto rigide e lascia passare le radiazioni solari sotto forma di luce. In più il vetro selettivo fa sì che passino i raggi solari ma ha il vantaggio di diventare opaco ai raggi infrarossi provenienti dall'assorbitore, che vengono quindi riflessi verso l'interno. In questo modo il calore viene intrappolato all'interno del collettore generando l'effetto serra, che consente alla lamina, e di conseguenza al liquido nelle tubature, di assorbire più calore possibile (Figura 31).

L'assorbitore di calore è una piastra captante realizzata con materiali buoni conduttori di calore, come rame, alluminio e acciaio. Essa è

dotata di una serie di canalizzazioni all'interno delle quali scorre il liquido ed è trattata con vernici di colore scuro. Per aumentarne ulteriormente le prestazioni vengono utilizzate vernici speciali, dette selettive, che consentono di trattenere maggiormente il calore. Per evitare perdite di energia termica, dalla parete di appoggio e dai lati del pannello, esso viene isolato con strati di materiale coibentante (Figura 32).

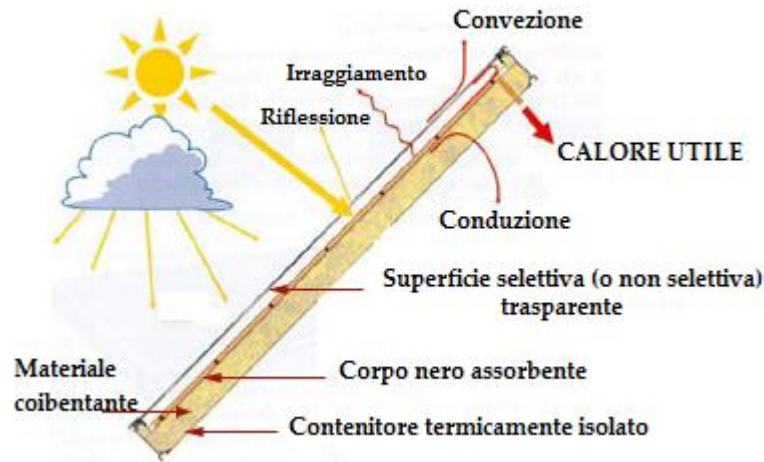


Figura 32: collettore solare piano.

Un robusto contenitore racchiude il pannello consentendone il trasportarlo, ed è inoltre dotato di appositi ganci che ne permette il fissaggio alle strutture di supporto.

I collettori di questo tipo sono semplici da costruire, si distinguono quindi per un ottimo rapporto qualità prezzo/prestazione. Hanno, infatti, una buona durata di vita, almeno 20 anni, e sono in grado di fornire acqua calda dai 30 ai 60°C fino a 10 mesi l'anno. Quelli realizzati con materiali selettivi sono un po' più costosi ma producono acqua calda tutto l'anno.

- Collettori sottovuoto

I collettori sottovuoto sono stati pensati per ridurre drasticamente il problema delle perdite di calore dovute a convezione e conduzione. Questi pannelli sono composti da un certo numero di tubi in vetro speciale (vetro al borosilicato), al cui interno viene posto l'assorbitore e la conduttura, sottovuoto.

E' stato scelto di porre il tubo sottovuoto in quanto il vuoto (vacuum) è un ottimo isolamento termico e perciò anche ad alte temperature le

perdite di calore risultano minime. Questa soluzione ha già così prestazioni notevoli, utilizzando poi superfici selettive e una lastra riflettente a specchio (che ha lo scopo di concentrare i raggi solari sui tubi di vetro), l'efficienza risulta del 15% superiore ai migliori collettori piani. Questa tecnologia è difatti in grado di fornire acqua calda, fino a 100°C.

I collettori sottovuoto riescono a sfruttare una buona parte di radiazione solare anche con angoli di incidenza molto bassi, per questo richiedono una minore superficie espositiva, e sono inoltre capaci di trattenere il calore accumulato in condizioni atmosferiche molto rigide, garantendo prestazioni elevate e costanti durante l'anno. Per questi motivi sono indicati per zone ad insolazione medio-bassa o con condizioni climatiche particolarmente rigide d'inverno.

Questa tecnologia, che risulta essere quella con efficienza maggiore, è però molto costosa ed inoltre, anche se la durata di vita di un collettore medio supera i 20 anni esso inizia a perdere il vuoto poco dopo i 10 anni, diminuendo notevolmente le prestazioni.

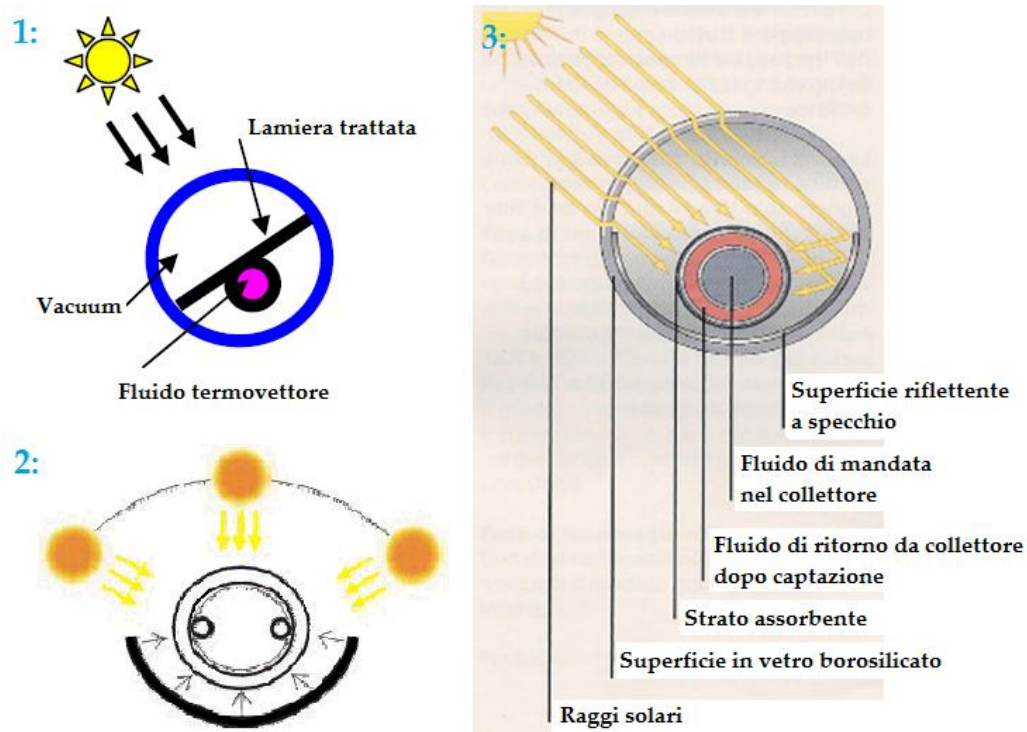


Figura 33: I collettori sottovuoto possono essere realizzati in diversi modi.

Nella prima figura si può vedere un collettore di base, senza superficie riflettente.

Al contrario, nella seconda e nella terza immagine questa superficie è presente ed è rispettivamente, fuori e dentro. La seconda immagine mostra inoltre come questi collettori riescano a sfruttare le radiazioni solari anche con angoli di incidenza molto bassi.

- Collettori monoblocco (o ad accumulo)

I collettori ad accumulo rappresentano una soluzione più semplice ed immediata seppur con scarse capacità. Vengono chiamati monoblocco in quanto sono composti da un serbatoio in acciaio inox posto direttamente alla luce del sole, solitamente integrato con uno o più collettori piani, e già così rappresentano un circuito termico completo, in quanto possono essere collegati direttamente all'acqua fredda e calda, senza l'ausilio di scambiatori di calore e pompe.



Figura 34: Collettore monoblocco con collettore piano integrato.

Il serbatoio, che può essere dipinto di nero per aumentare la quantità di calore che riesce a catturare e trattenere, viene isolato termicamente e ricoperto da una lastra di materiale trasparente termoisolante.

Questi collettori possono essere eventualmente collegati ad una caldaia a gas ausiliaria, che entra automaticamente in funzione quando la temperatura scende al di sotto di quella richiesta dall'utenza.

Rispetto alle soluzioni precedenti questa tipologia è molto semplice da costruire e di conseguenza ha un costo più modesto. Inoltre questi pannelli sono compatti, maneggevoli, occupano poco spazio e possono essere installati senza la supervisione di tecnici specializzati. Purtroppo l'utilizzo di questo dispositivo è limitato alla sola produzione di acqua calda sanitaria. A questo vincolo si somma lo svantaggio legato al facile raffreddamento del collettore durante le ore notturne e nelle giornate con scarsa illuminazione solare. Per questo vengono sfruttati solo durante i mesi più caldi.

Esistono però dei collettori ad accumulo con resistenza elettrica, in alternativa all'ausilio di una caldaia a gas, che permettono di ottenere

acqua calda anche nelle giornate fredde o con scarsa insolazione (Figura 35).

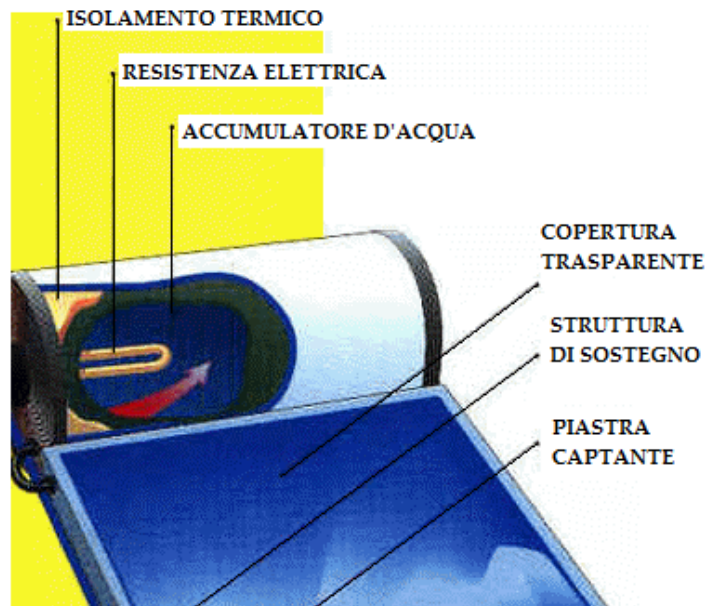


Figura 35: Collettore monoblocco con resistenza.

- Collettori sferici

I collettori sferici rappresentano una soluzione termosolare creata per ridurre al minimo l'impatto estetico causato dai collettori monoblocco (Figura 36). Sono della stessa categoria, ma risultano meno invasivi in quanto è tutto racchiuso all'interno della sfera. Il serbatoio viene il posto al centro e la superficie esterna fa da collettore piano integrato.



Figura 36: Collettore solare sferico.

In Figura 37 è rappresentata una possibile realizzazione di collettore sferico. I primi strati di questa struttura sono molto simili a quelli di un collettore piano selettivo, si prosegue con un buon isolamento termico realizzato con un'imbottitura in poliuretano, per giungere al serbatoio

che potrà essere collegato ad un pozzetto mediante il quale avviene lo scambio di acqua.

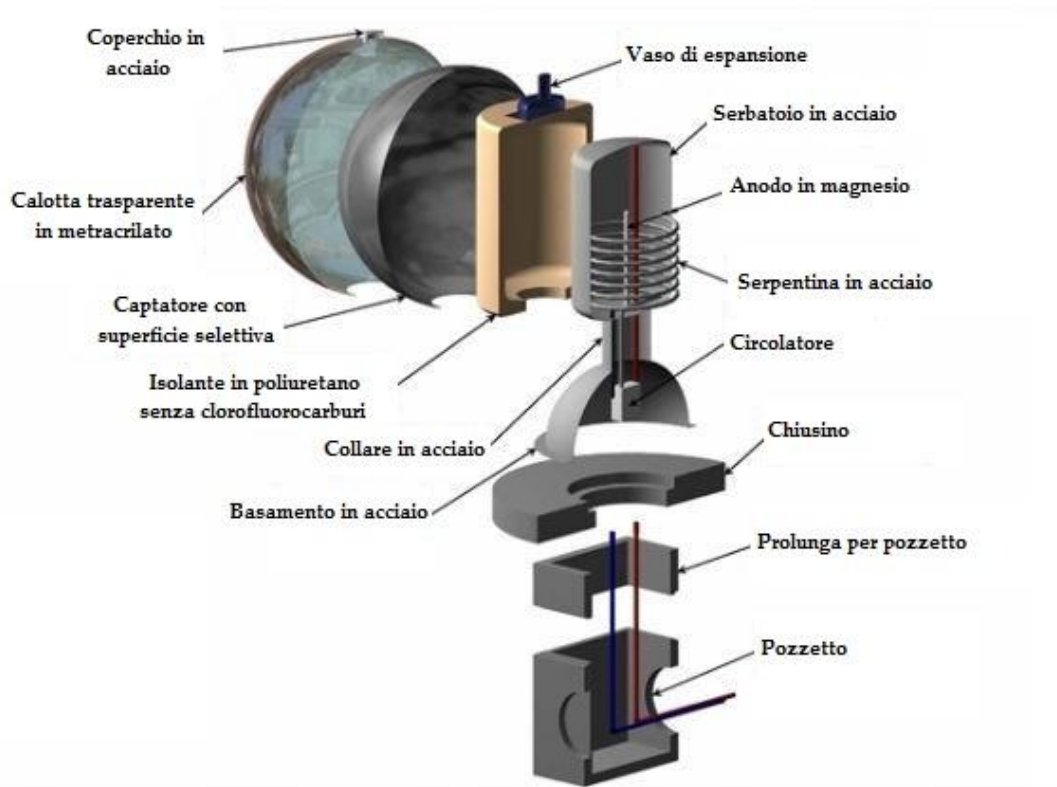


Figura 37: Possibile struttura di collettore sferico.

- Collettori non vetrati (o scoperti)

I collettori non vetrati vengono detti scoperti in quanto sono privi del vetro di protezione, presente normalmente nelle altre tipologie di pannelli.

L'acqua da riscaldare attraversa direttamente il collettore, evitando quindi le complicazioni e i costi legati alla necessità di utilizzare scambiatori di calore e pompe.

In questi pannelli, la piastra che fa da assorbitore di calore, viene realizzata con un metallo trattato in modo da essere selettivo, o con un materiale sintetico, come PVC, neoprene o polipropilene. In ogni caso la superficie viene resa scura per massimizzare l'energia termica catturata e le tubature vengono saldate o pressate sull'assorbitore stesso.

La semplicità strutturale di questi collettori li rende poco costosi ed essendo l'installazione molto semplice non richiede personale

specializzato. Possono essere montati su tetti piani o a falde e la loro durata di vita è stimata intorno ai 30 anni.

Questi pannelli riescono a fornire acqua a temperature tra i 10 e i 40°C in funzione della temperatura esterna e del modello. Essi sono però soggetti a elevate perdite di calore per convezione, hanno infatti un'efficienza molto scarsa, sono quindi adatti ad essere sfruttati solo con alte temperature esterne. Per questo il loro utilizzo è limitato durante la stagione estiva.

Per ridurre le perdite di calore è possibile adottare una protezione contro il vento, che non sarà costosa come il vetro e il materiale per l'isolamento termico, ma contribuirà ad aumentare il rendimento.

I collettori non vetrati risultano, in definitiva, utili per scopi stagionali, come: stabilimenti balneari, alberghi, campeggi, ecc. Quelli realizzati in PVC o neoprene, meno costosi, sopportano una tensione massima di 1atm, sono quindi adatti solo al riscaldamento di piscine.



Figura 38: Collettori solari non vetrati.

- Collettori ad aria

I collettori ad aria risultano molto simili ai pannelli vetrati ma hanno come fluido termovettore l'aria anziché l'acqua, che verrà fatta circolare o fra vetro e assorbitore oppure fra l'assorbitore e il fondo isolante del pannello.

L'aria ha però un più basso coefficiente di scambio termico rispetto all'acqua, ovvero scambia calore con più difficoltà. L'assorbitore viene perciò costruito in modo da produrre un percorso lento e tortuoso per

d'aria, in modo da assicurare una sua maggior permanenza all'interno del pannello. Questo dovrebbe garantire il massimo riscaldamento dell'aria ad opera dell'energia termica del sole.

Una particolare tipologia di collettore ad aria sono i pannelli di rivestimento. Essi vengono usati come normale rivestimento delle pareti di tamponamento (che servono a proteggere dalle infiltrazioni d'aria ed acqua) negli edifici di qualsiasi genere. Questa particolare tipologia di collettore non viene chiuso dal solito strato di vetro, viene invece posta una superficie esterna metallica che funge da assorbitore e che scalda l'aria che passa al suo interno, a volte tramite microfratture. Fluendo tra pannello e parete l'aria si riscalda e può poi essere immessa nell'ambiente tramite un apposito sistema di aspirazione (solitamente alimentato da celle fotovoltaiche integrate nell'impianto); contribuisce così al riscaldamento e al ricambio d'aria degli ambienti serviti.

Nei mesi estivi contrasta l'innalzamento delle temperature, in quanto impedisce alla radiazione solare di colpire direttamente la pareti perimetrali dell'edificio.

Ad impianto di ventilazione spento, l'aria più fresca entra dai fori più bassi e per moto convettivo naturale, spinge quella più calda ad uscire da quelli più alti, creando così un flusso continuo che contribuisce a non far aumentare la temperatura delle pareti.



Figura 39: Possibili tipologie di collettori ad aria.

- Altri generatori solari termici

Esistono molti modi di sfruttare l'energia solare a basse temperature, si sono visti svariati tipi di collettori, ma le soluzioni che seguono sfruttano ancor più direttamente la radiazione solare; non possono perciò essere definiti “pannelli solari termici” e verranno quindi chiamati, più in generale, generatori solari.

Un generatore solare termico può essere utilizzato per la cottura di cibi o per la sterilizzazione dell'acqua mediante bollitura. Si tratta di un forno realizzato con un concentratore solare ad altissimo rendimento che può raggiungere temperature fino ai 250°C. Il suo utilizzo potrebbe essere ottimale in comunità isolate.

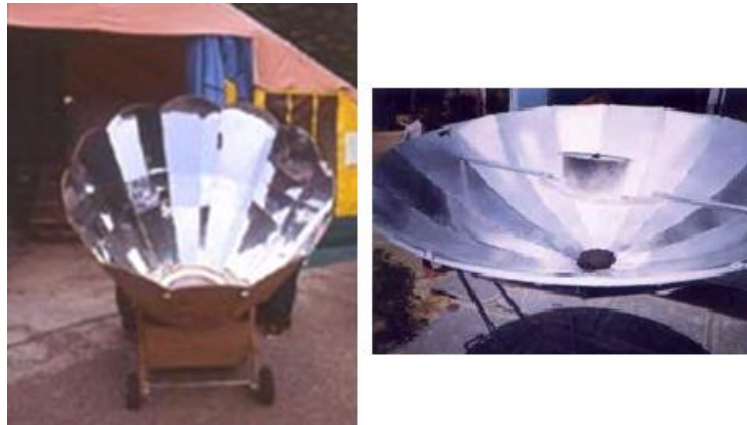


Figura 40: Altri tipi di generatori solari termici.

1.9.3 Sistema solare-termico

Un sistema solare termico nella sua interezza varia a seconda dell'utilizzo che si vuole farne e in base al tipo di collettore utilizzato. Si vedranno quindi di seguito tutti i possibili dispositivi che lo compongono:

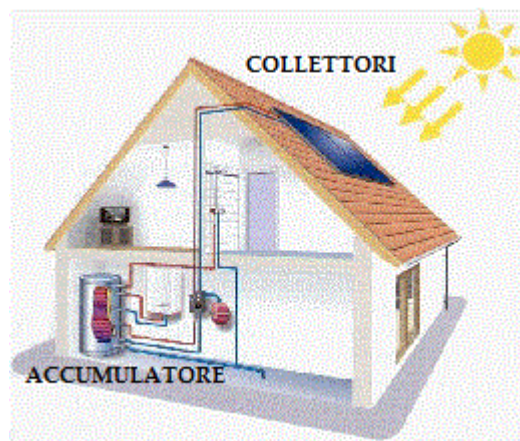


Figura 41: Generico impianto solare termico per abitazione residenziale.

- ✚ Fluido termovettore, è la sostanza che attraversa il collettore con lo scopo di accumulare e trasportare il calore proveniente dal sole (energia termica), che verrà successivamente immagazzinato per futuri utilizzi o, in alcuni casi, sfruttato direttamente.

Solitamente viene scelta una sostanza in forma liquida da far circolare all'interno delle condutture, in quanto possiede migliori proprietà termiche rispetto all'aria, che viene impiegata solo in particolari situazioni.

Come liquido termovettore vengono utilizzate soluzioni antigelo (non tossiche) a base di glicolo propilenico, ma a seconda delle applicazioni possono essere usati anche semplicemente acqua o soluzioni saline.

Nelle tipologie d'impianto in cui è necessario l'utilizzo di acqua nelle tubature è importante prevenire il congelamento mediante soluzioni antigelo; in quanto se le temperature sono tanto rigide da far ghiacciare il liquido, questi dilatandosi causerebbe grossi danni sia al collettore che a tutto l'impianto idraulico.


- ✚ Collettori solari termici, si sono già visti nel dettaglio nelle pagine precedenti, ma non è mai stato chiarito in che modo questi devono essere posti nell'impianto. Come si può vedere in Figura 41, essi vengono spesso fissati sui tetti delle abitazioni, ma sono possibili molte altre soluzioni impiantistiche. E' però importante scegliere una postazione non ombreggiata e preferibilmente rivolta verso Sud (in questo modo sarà esposta al sole per il numero massimo di ore giornaliere) con una tolleranza di deviazione verso Est o Ovest di 30° , con inclinazione di circa $35-40^\circ$ rispetto al piano orizzontale. La struttura di sostegno a cui vengono fissati i collettori sarà differente a seconda della soluzione progettata. Queste semplici norme vengono seguite anche per il posizionamento dei moduli fotovoltaici.
- ✚ Circuito solare (o impianto idraulico), rappresenta il collegamento tra collettore solare termico e serbatoio. In pratica consiste in una serie di tubature per il trasporto di acqua da e verso il collettore, che sarà integrato con pompe e valvole di vario genere. Per motivi di costo questi tubi non presentano un buon isolamento termico, si cerca quindi di limitare al massimo la lunghezza del circuito per ridurre al minimo le perdite di calore. Bisogna però tener conto dell'eventuale corrosività di alcuni liquidi termovettori nella scelta delle tubature in modo da evitare di danneggiare il circuito solare.

Si vedano ora quali componenti completano il circuito idraulico e quale è il loro scopo:

- Pompa, viene utilizzata solo nei circuiti a circolazione forzata, che si vedranno in seguito. Ha lo scopo di trasportare il fluido dai collettori all'accumulatore e viceversa.
- Valvola di sicurezza, è l'ultimo dispositivo di sicurezza di circuito idraulico chiuso. In caso di sovratensione, causata da un guasto o da troppo elevate temperature, la valvola di sicurezza si apre facendo uscire il fluido in eccesso; che potrà essere recuperato mediante un recipiente in modo da poterlo reinserire nelle circuito solare.
- Vaso di espansione, serve a proteggere l'impianto da eventuali oscillazioni di pressione.

In funzione all'irraggiamento solare, il fluido termovettore si scalda in maniera discontinua e si dovrebbero quindi avere continue variazioni di volume. Il volume è però costante in quanto le tubature non sono in grado di dilatarsi e restringersi, ne seguono quindi continui aumenti e diminuzioni di pressione. La pressione all'interno delle tubature deve essere mantenuta costante per ovviare ad eventuali problemi ad essa legati. Il vaso di espansione ha perciò il compito di assorbire le dilatazioni del liquido e ricede lo stesso volume all'impianto quando il fluido si raffredda.

- Valvola di spurgo dell'aria manuale, serve per eliminare l'aria contenuta nel circuito idraulico durante il suo riempimento. Deve essere posta nel punto più alto dell'impianto.

 Accumulatore, può essere di vari tipi, ma in generale consiste in un serbatoio in cui viene immagazzinato il calore proveniente dai collettori solari termici, con cui scalda l'acqua, che verrà rilasciata quando l'utente la richiede.

L'accumulatore permette di mantenere l'impianto operativo anche quando i collettori non sono attivi, come nelle ore notturne, ed elimina le fluttuazioni di temperatura dell'acqua causate da transienti (ombreggiamenti transitori, come ad esempio le nubi).

Per garantire alle utenze acqua calda, anche in caso di cattivo tempo prolungato e in inverno, l'accumulatore fa da scaldacqua (boiler),

utilizzando un'altra fonte di energia come corrente elettrica, gas, legna. All'impianto solare termico viene quindi spesso affiancato un altro impianto o l'allacciamento alla rete locale di gas o luce, in questo caso l'impianto potrà essere definito ibrido.

Le dimensioni dell'accumulatore sono generalmente più grandi di quelle di un boiler tradizionale, in questo modo si garantisce una maggior autonomia di acqua calda. Per case monofamiliari, ad esempio, la capacità di questo serbatoio sarà di circa 300-500 litri, ma la scelta deve essere molto accurata in quanto ci sono importanti fattori da tenere in considerazione per garantire un buon funzionamento dell'impianto. L'attenzione nel dimensionamento della portata d'acqua verte su due eventuali problemi contrapposti: se la quantità d'acqua è troppo grande rispetto alla superficie dei collettori, allora l'energia solare non sarà sufficiente a riscaldarla fino alla temperatura voluta; d'altra parte, se l'accumulatore è troppo piccolo il liquido raggiunge ben presto la temperatura massima di esercizio e sarà necessario raffreddare l'accumulatore, mettendolo in azione di notte o utilizzando acqua fredda potabile, causando un'inutile spreco.

Si veda ora, più nel dettaglio come viene immagazzinata l'energia termica all'interno dell'accumulatore.

Innanzitutto per ridurre le perdite di calore del serbatoio tutti gli allacciamenti idraulici vengono realizzati con un risvolto verso il basso di lunghezza minima di 20 cm, in modo da impedire la circolazione di correnti parassite di fluido caldo. Un altro accorgimento molto importante riguarda la stratificazione della temperatura. Infatti l'accumulatore viene costruito alto e snello in modo da favorire il processo naturale che spinge il fluido caldo a stare verso l'alto e quello freddo a stare verso il basso. Il liquido da far circolare nei collettori viene quindi prelevato dal fondo del serbatoio e quello già scaldato viene invece immesso più in alto, possibilmente all'altezza a cui si trova il fluido a quella stessa temperatura. In questo modo si evita di mescolare il liquido già scaldato con quello ancora freddo che si trova sul fondo, riducendo così buona parte delle perdite di calore.

Per entrare ulteriormente nel dettaglio bisogna fare una distinzione tra i vari tipi di accumulatori che sono differenti a seconda dello scopo finale del sistema completo.

- Accumulatore a serbatoio, per questa tipologia nei collettori circola dell'acqua che una volta scaldata viene immessa direttamente nel serbatoio per essere poi sfruttata su richiesta. Di solito viene utilizzato in sistemi a circolazione naturale che forniscono acqua calda per docce esterne o altre applicazioni secondarie.
- Accumulatore a scambiatore di calore, in questo caso il fluido che circola nei collettori è diverso dall'acqua e bisognerà quindi tenerlo separato dall'impianto idraulico per l'acqua calda sanitaria. Viene perciò utilizzato uno scambiatore di calore che preleva il calore dal liquido proveniente dai collettori per cederlo all'acqua che si trova all'interno dell'accumulatore.

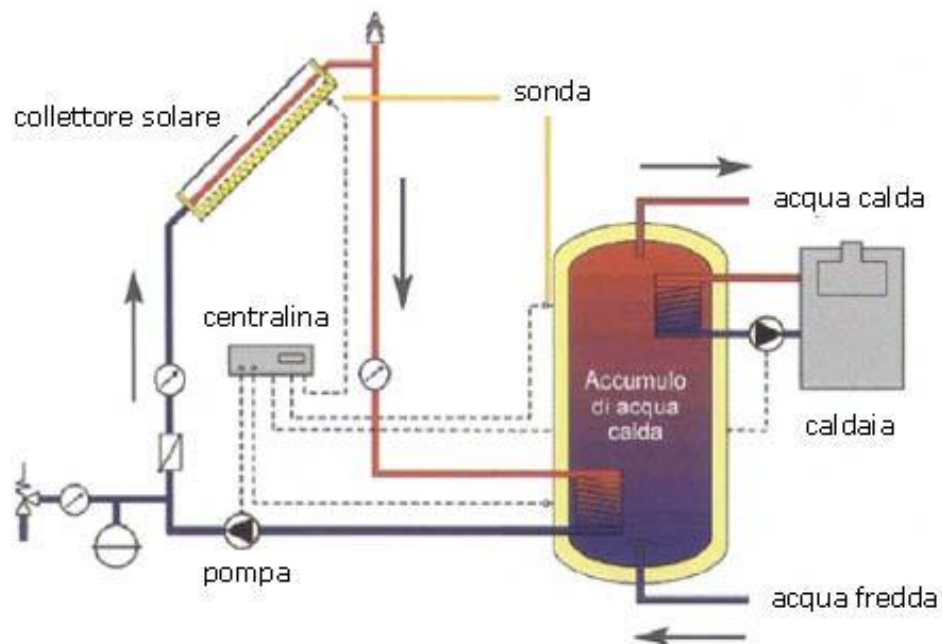


Figura 42: Accumulatore a scambiatore di calore.

Dentro il serbatoio c'è l'acqua ad uso sanitario che viene scaldata dal fluido termoconvettore attraverso uno scambiatore di calore.

- Accumulatore combinato, viene utilizzato negli impianti in cui si vuole ottenere sia acqua calda sanitaria che il riscaldamento dell'ambiente.

Perché questo sia possibile esso è composto da due recipienti interni al serbatoio principale: il più grande contiene l'acqua per il riscaldamento della casa, il più piccolo contiene l'acqua ad uso sanitario.

- ✚ Sistema di regolazione, è composto da alcune sonde che verificano se la temperatura dei collettori è maggiore di quella del serbatoio. In questo caso il regolatore dell'impianto mette in funzione la pompa di circolazione del circuito solare, che porta quindi fluido ai collettori. Questo sistema ha inoltre il compito di impedire il surriscaldamento dell'impianto. Se alla sera l'accumulatore ha raggiunto temperature troppo alte il regolatore mette in funzione la pompa in modo da ottenere una diminuzione di temperatura grazie al raffreddamento notturno. Il regolatore disattiverà poi la pompa una volta che la temperatura si è abbassata fino al livello desiderato.

A questo punto si può procedere nel vedere i tipi di sistemi solari termici. Essi si possono suddividere in quattro grandi categorie a seconda del tipo di circuito solare e della circolazione utilizzata.

Il circuito solare può essere detto “aperto”, se come fluido termovettore viene utilizzata l'acqua che viene poi inviata all'utilizzatore per diversi scopi. L'acqua deve quindi essere reimpressa ogni volta che viene sfruttata in quanto si ha un circuito unico. Viene invece detto circuito “chiuso” quando vengono utilizzati due circuiti idraulici separati. Il fluido termovettore, che circola di continuo nel circuito che passa per i collettori, cede calore all'altro attraverso uno scambiatore di calore.

La circolazione all'interno del circuito solare viene invece chiamata: naturale o forzata. La prima avviene spontaneamente grazie ai moti convettivi del fluido, che scaldandosi sale verso il serbatoio di accumulo che deve quindi essere posto in un punto più in alto rispetto al collettore. La circolazione forzata invece avviene tramite una pompa che spinge il liquido termovettore dal collettore all'accumulatore che può quindi essere

posto dove risulta più comodo. Bisogna però ricordare che bisogna azionare una pompa e la centralina di controllo, questo richiederà un certo consumo di elettricità.

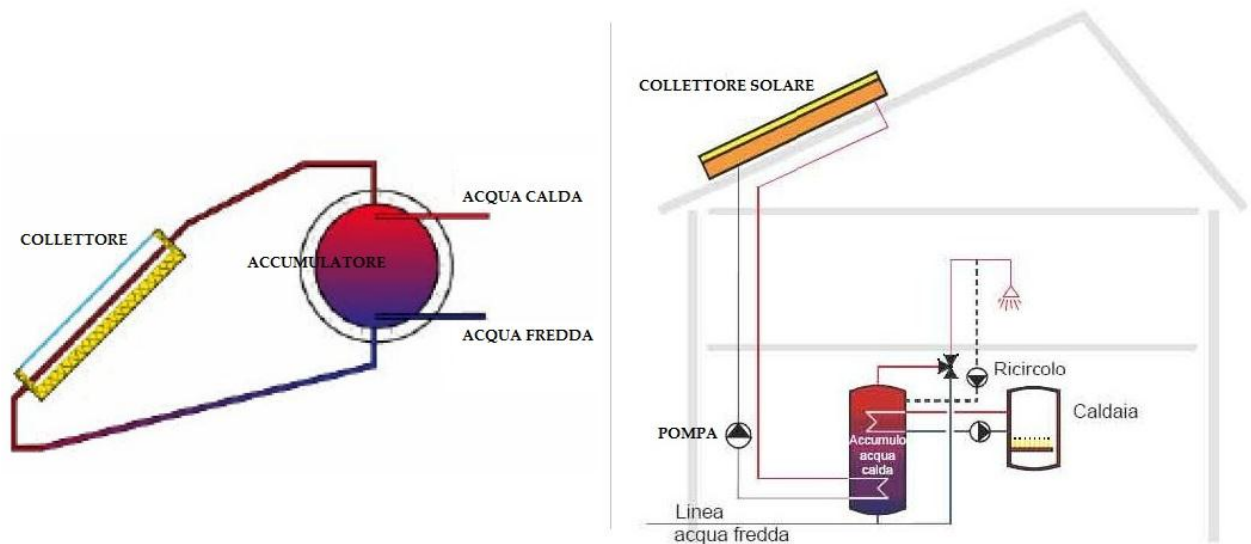


Figura 43: A sinistra si può vedere un modello di circolazione naturale e a destra uno di circolazione forzata.

Le quattro categorie di sistema solare termico derivano quindi dalle combinazioni tra le tipologie appena viste:

- Circuito aperto a circolazione naturale, generalmente usato per il riscaldamento dell'acqua sanitaria delle docce di impianti con utilizzo stagionale o per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria ad uso domestico annuale.
- Circuito chiuso a circolazione naturale, generalmente usato per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria ad uso domestico, con utilizzo annuale.
- Circuito aperto a circolazione forzata, generalmente usato per il riscaldamento centralizzato dell'acqua sanitaria di impianti con utilizzo stagionale oppure per il riscaldamento dell'acqua di piscine scoperte.
- Circuito chiuso a circolazione forzata, generalmente usato per il riscaldamento: dell'acqua sanitaria, dell'acqua delle piscine coperte, degli ambienti o per il riscaldamento simultaneo di tutte e tre le categorie sopra elencate.

1.10 Solare termico a medie e alte temperature (o termodinamico)

I sistemi termici a medie e alte temperature trovano riscontro solo in grossi impianti ad alta potenza per la produzione di energia dinamica, corrente elettrica, idrogeno, cogenerazione e trigenerazione. Verrà di seguito fornito solo un accenno su queste tecnologie in quanto non sono adatte ad essere integrate ai sistemi fotovoltaici.

Come nei sistemi visti in precedenza, anche le tecnologie solari termiche a medie ed alte temperature sfruttano la componente termica dell'energia solare, ciò che le distingue è lo scopo. Infatti questi sistemi termodinamici utilizzano il calore del sole per far evaporare il fluido termovettore che scorre nelle tubature. Il vapore, così formatosi, alimenta delle turbine collegate ad alternatori, producendo in questo modo corrente elettrica. Questo ciclo termodinamico, che trasforma l'energia termica in energia elettrica tramite una turbina a vapore collegata ad un alternatore prende il nome di ciclo di Rankine, che è lo stesso utilizzato nelle attuali centrali termoelettriche.

Al contrario dei sistemi a basse temperature, questa tipologia d'impianto è in grado di generare temperature molto elevate (dai 500 fino ai 1000°C) che possono essere sfruttate per applicazioni industriali. Inoltre hanno un altro importante vantaggio, possono produrre elettricità anche nei periodi in cui i normali collettori sarebbero di scarsa utilità, come durante le ore notturne o in condizioni di alta nuvolosità. Questo è reso possibile da un particolare fluido a base di sali che, una volta riscaldato, mantiene la sua altissima temperatura (circa 550°C) per alcuni giorni, pertanto è possibile una produzione di energia praticamente ininterrotta.

Esistono due tipologie di impianti termodinamici:

- Impianto a collettori parabolici lineari, questo tipo di impianto è caratterizzato da una serie di specchi parabolici. Essi ruotano su un asse in modo da concentrare più luce solare possibile su un tubo ricevitore, posto nel fuoco del paraboloide, che viene percorso da un fluido termovettore. Questo fluido assorbe l'energia termica e la trasporta in un serbatoio di accumulo, necessario nei momenti di scarsa o nulla insolazione. L'accumulatore è collegato ad uno scambiatore di calore che fornisce l'energia termica ad una caldaia, la quale genera vapore. Come accennato in precedenza il vapore viene usato per muovere una turbina che, collegata a degli alternatori, genera corrente elettrica.

Gli specchi concentratori sono completamente automatizzati e grazie ad una centralina elettronica, che comanda un motorino, si inclinano in modo da seguire il percorso del sole nel cielo (per questo vengono detti eliostati). In questo modo riescono a massimizzare la resa di captazione solare durante l'arco della giornata. In caso di forte vento è previsto l'abbassamento verso terra degli specchi, in modo da evitare rotture.



Esempi di impianto termodinamico a collettori parabolici lineari.

- Impianto a torre centrale, consiste in un sistema di specchi riflettenti indipendenti tra loro che, anche in questo caso, inseguono il sole, e concentrano la radiazione solare su un ricevitore fisso, posto in cima ad una struttura a torre, che si trova solitamente al centro dell'impianto. Nel ricevitore al vertice della torre scorre il fluido termovettore che trasferisce il calore sviluppato (600-1000°C) ad un generatore di vapore. Il vapore viene generato ad una pressione sufficiente da mettere in moto la turbina, che ruotando produce energia meccanica che cede all'alternatore, consentendogli così di creare energia elettrica. La corrente prodotta in questo modo può poi essere inviata ad un trasformatore che la innalza di tensione e la immette nella rete di distribuzione.

Questo impianto, rispetto al precedente, raggiunge fattori di concentrazione più elevati e quindi è possibile ottenere temperature superiori.



Esempi di impianto termodinamico a torre centrale.

Capitolo 2: Conversione combinata elettrica e termica

2.1 Introduzione e funzionamento tecnologia ibrida termo-fotovoltaica

Si sono visti, nel capitolo precedente, i due sistemi più importanti con cui è possibile raccogliere l'energia solare: fotovoltaici e solari termici.

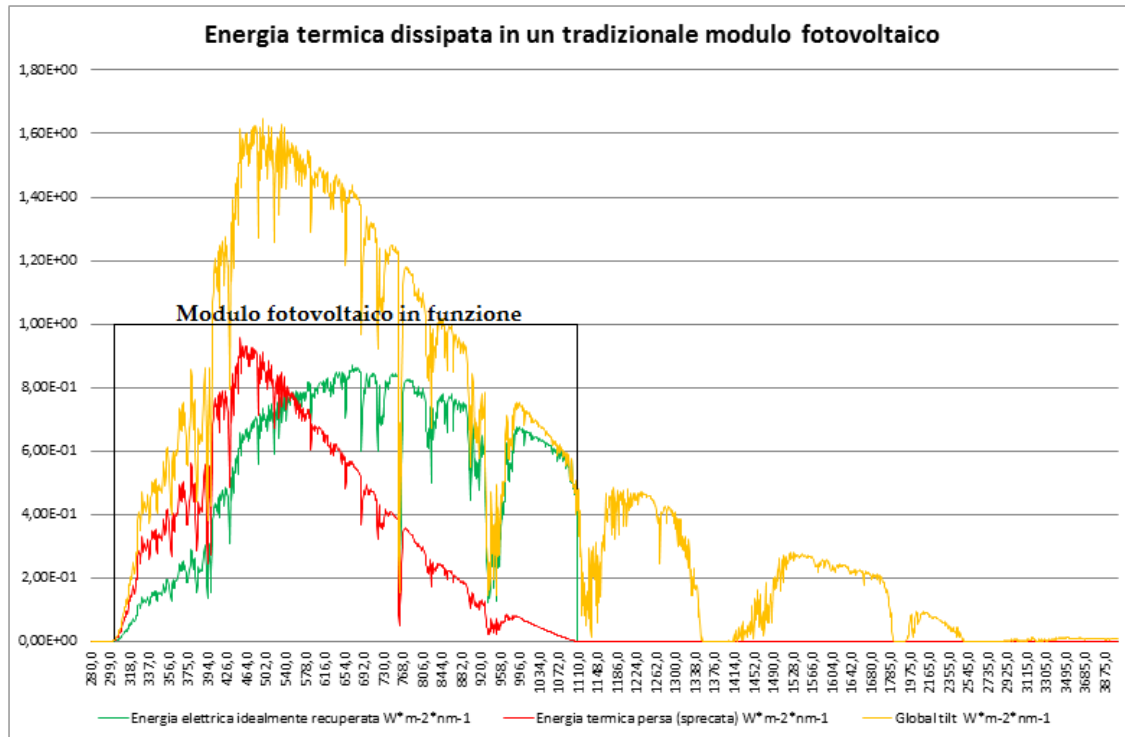
Come è stato accennato numerose volte i due sfruttano in maniere diversa la radiazione solare, ottenendo rispettivamente energia elettrica ed energia termica.

Si è quindi pensato che poteva essere una buona soluzione montare entrambi gli impianti, ad esempio, sul tetto di un'abitazione residenziale, per ottenere sia elettricità sia acqua calda sanitaria o il preriscaldamento dell'ambiente.

Arrivati a questo punto è stato compiuto il passo successivo, ci si è chiesti se non fosse una prospettiva interessante provare a integrare le due tecnologie in un unico pannello. Sono quindi stati costruiti vari prototipi di collettore ibrido, detto anche pannello termo-fotovoltaico o dall'inglese photovoltaic thermal collector (PVT).

Oltre al vantaggio del doppio utilizzo, questa idea ha avuto una buona riuscita anche grazie ad un altro importante fattore. Un normale modulo fotovoltaico è in grado di convertire in energia elettrica solo una piccola porzione della radiazione solare (tra il 6 e il 17%), il resto viene perso a causa di non idealità e per il 32% viene dissipato sotto forma di vibrazioni reticolari, ovvero calore, come si è visto nel sottocapitolo 1.4 (Figura 10) e 1.5.2 (Figura 17). Questa energia termica, nei moduli convenzionali, viene dispersa nell'ambiente e quindi sprecata, mentre i moduli ibridi riescono a recuperare buona parte del calore, trasferendolo al fluido termovettore che circola nel collettore termico.

Per dare un'idea della quantità di energia termica che va normalmente sprecata, si veda il grafico seguente, che varrà trattato più nel dettaglio nel capitolo 3.



In rosso, si può vedere la quantità di calore che viene dissipata da un modulo fotovoltaico, rispetto alla quantità totale di energia messa a disposizione dal sole, grafico in giallo. In verde è rappresentata la quantità di energia elettrica idealmente recuperabile, senza considerare quindi le varie cause di inefficienza.

Sono state proposte varie tipologie di pannello termo-fotovoltaico, più o meno performanti, ma in generale esso consiste in un modulo fotovoltaico, dietro al quale viene posto l'assorbitore di calore con la rispettiva serpentina per il passaggio del fluido termovettore (scambiatore di calore). Il liquido, che scorre nella serpentina, assorbe il calore proveniente dal modulo fotovoltaico e lo cede successivamente all'accumulatore, come per un normale collettore solare termico.



Figura 44: Esempi di pannelli PVT.

Compiendo alcuni studi sull'argomento, si è scoperto che l'efficienza di un collettore solare termico, integrato ad un modulo fotovoltaico, è minore rispetto a quella di un collettore normale sotto le stesse condizioni operative; però è anche emerso che due pannelli termo-fotovoltaici producono più energia, per unità di superficie, rispetto ad un modulo fotovoltaico posto accanto ad un collettore solare termico. Quindi un pannello ibrido cattura meglio l'energia solare, questo anche grazie al fatto che il collettore integrato contribuisce a non far aumentare la temperatura del modulo fotovoltaico, evitando così la conseguente diminuzione di efficienza dello stesso. Al contempo, questo particolare tipo di moduli, ha il vantaggio di incorporare due finalità diverse in un unico pannello, con una notevole riduzione di spazio.

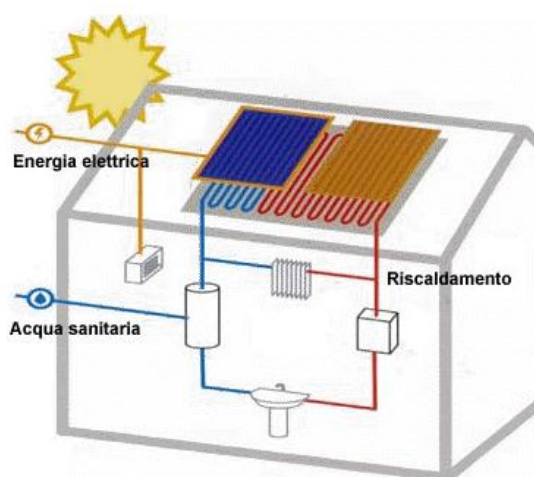


Figura 45: Esempio molto semplificato di sistema termo-fotovoltaico.

Si sono visti sempre esempi su abitazioni residenziali, ma questa tecnologia risulta un'ottima soluzione impiantistica anche per esercizi commerciali e aziende.

In questo capitolo verrà descritta la situazione attuale di questa tecnologia e verranno illustrate varie alternative realizzative, tra quelle già presenti in commercio e quelle ancora in fase sperimentale.

2.2 Situazione attuale della tecnologia termo-fotovoltaica

L'ottimizzazione e il costante miglioramento delle tecnologie fotovoltaiche e termiche disgiunte, hanno recentemente spinto la ricerca a creare qualcosa di nuovo, pensando ad una loro possibile integrazione (come visto nel sottocapitolo precedente). I sistemi per la conversione combinata dell'energia solare in energia elettrica e termica hanno quindi preso il via solo negli ultimi anni, nonostante fossero stati trattati per la prima volta negli anni '70.

Ad oggi, esistono ancora pochi modelli di pannelli termo-fotovoltaici in commercio, ma la ricerca su questo argomento sta avendo un forte sviluppo e sono già presenti diversi prototipi in fase di sperimentazione.

Durante la fase di ricerca vengono realizzati dei pannelli campione combinando le varie tipologie esistenti di moduli fotovoltaici e collettori termici. Vengono quindi sperimentate le differenti combinazioni tra pannelli fotovoltaici: monocristallini, policristallini, a film sottile con silicio amorfo e a film policristallino; e collettori termici: piani, sottovuoto, monoblocco e ad aria. I moduli così realizzati, devono essere testati per verificare se sono economicamente competitivi e nel caso lo siano verranno poi commercializzati.

I progressi maggiori sono stati compiuti con la tecnologia al silicio policristallino integrata a collettori piani aventi come fluido termovettore: aria, acqua o un altro liquido.

2.3 Descrizione moduli ibridi in commercio

Verranno di seguito prese in oggetto due ditte che producono attualmente questo tipo di pannello. I prodotti presi in esame hanno le stesse caratteristiche di base.

Si tratta, in entrambi i casi, di moduli realizzati applicando sul retro di un pannello fotovoltaico, in silicio policristallino, un assorbitore di calore, generalmente in alluminio. I vari moduli termo-fotovoltaici in commercio, si differenziano l'uno dall'altro per alcuni parametri, ma in linea di massima i vantaggi e gli svantaggi, gli utilizzi e le applicazioni, sono i medesimi.

Vantaggi apportati dalla scelta di un pannello termo-fotovoltaico, rispetto ad un modulo convenzionale:

- Maggior energia prodotta per unità di superficie: l'efficienza della singola porzione fotovoltaica viene incrementata del 15-20% su base annua, grazie all'integrazione col collettore termico che mantiene bassa la temperatura sul modulo (20-25°C). Il resto di energia solare, invece di andare sprecata, viene immagazzinata come calore dalla parte termica dell'impianto, che avrà efficienza intorno al 50-60%.
- Flessibilità: è possibile adattare questi moduli ad ogni esigenza.
- Allungamento della vita dell'impianto: grazie alle minori temperature di lavoro questi moduli si usurano più lentamente.
- Aumento del COP: il coefficiente di prestazione della pompa di calore varia a seconda del livello di temperatura a cui si trova l'energia dallo scambiare. Affiancando la pompa al pannello PVT, questo coefficiente risulta notevolmente aumentato.
- Raffrescamento naturale estivo: riduce l'innalzamento della temperatura giornaliera, delle superfici sopra le quali viene posto.
- Minor spazio utilizzato, soluzione ottimale per chi necessita sia di elettricità che acqua calda sanitaria ma ha poco spazio disponibile.
- Costi minori: la produzione e l'installazione di un pannello ibrido presenta minori costi rispetto al prezzo di produzione e installazione di un modulo fotovoltaico e di un collettore termico separati.
- Detrazioni al 55% sulla componente termica: utilizzando moduli appositamente certificati, sarà possibile detrarre, in 10 anni, il 55%

del costo imputabile alla parte termica dell'impianto; diminuendo ulteriormente i tempi di rientro dell'investimento iniziale (minor pay-back time).

Svantaggi:

- Spreco di energia termica in estate: nella stagione calda, quando i moduli fotovoltaici hanno maggior necessità di scambiare calore con i collettori termici, la necessità di acqua calda è molto ridotta.
- Minor efficienza del collettore solare termico: il collettore solare termico è sovrastato da tutto il modulo fotovoltaico, per questo la sua efficienza risulta inferiore rispetto a quella di un collettore disgiunto.
- Maggior costo per pannello: come elencato nei vantaggi, il costo di un pannello termo-fotovoltaico è inferiore al prezzo di un collettore termico più un modulo fotovoltaico, ma è maggiore rispetto ad entrambi presi singolarmente.

I moduli ibridi possono essere utilizzati per generare:

- Corrente elettrica: grazie alla matrice di celle fotovoltaiche.
- Riscaldamento parziale o totale di: piscine, impianti radianti a bassa temperatura (anche a pavimento), acqua calda sanitaria e impianti industriali di processo.
- Snevamento invernale: grazie al controllo della temperatura dei moduli è possibile far sciogliere la neve sul tetto, che in grandi quantità può causare danni a grondaie, tegole ed in alcuni casi limite può provocare il crollo del tetto stesso. Inoltre, la possibilità di sbrinare i pannelli, consente di rimettere in funzione l'impianto anche nei periodi immediatamente successivi a forti nevicate.

Le applicazioni sono molteplici grazie alla flessibilità impiantistica di questi moduli, che possono quindi essere installati in:

- Abitazioni residenziali.
- Edifici commerciali, industriali e agricoli.
- Centrali fotovoltaiche.
- Altre applicazioni.

MODULI PVT H-NRG di AnafSolar divisione ANAFGROUP

Vengono realizzati mediante la sovrapposizione di vari strati, che verranno fissati con una cornice in alluminio.

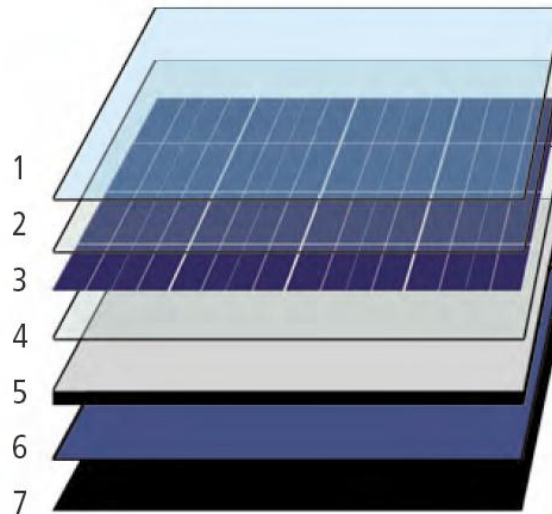


Figura 46: Struttura modulo termo-fotovoltaico H-NRG.

In Figura 46, si può vedere che la struttura di questo pannello non si discosta di molto dalla generica composizione di un modulo fotovoltaico. Gli strati che lo compongono sono:

1. Vetro temprato, ovvero trattato termicamente per renderlo più resistente agli agenti esterni, con basso contenuto ferroso (altamente trasparente) e ad alta trasmissione (ridotta riflessione esterna, alta riflessione interna).
2. Film incapsulante in E.V.A. (acetato viniletilenico), che fa da strato isolante.
3. Matrice composta da 60 o 72 celle fotovoltaiche.
4. Altro strato isolante in E.V.A..
5. Protezione posteriore in TPT e TPE, ovvero pellicola multi-laminata che viene utilizzata come substrato (supporto posteriore).

Questo polimero del fluoruro possiede eccellenti qualità: buona resistenza nel tempo, impermeabilità, insolubilità, resistenza alla corrosione, buona stabilità meccanica, possiede basso coefficiente di dilatazione termica e brucia molto lentamente.

6. Sistema assorbitore di calore H-NRG, in alluminio, nel quale sono presenti una serie di canalizzazioni dove scorre il liquido termovettore, come si può notare in Figura 47.

7. Ulteriore strato isolante, opzionale.

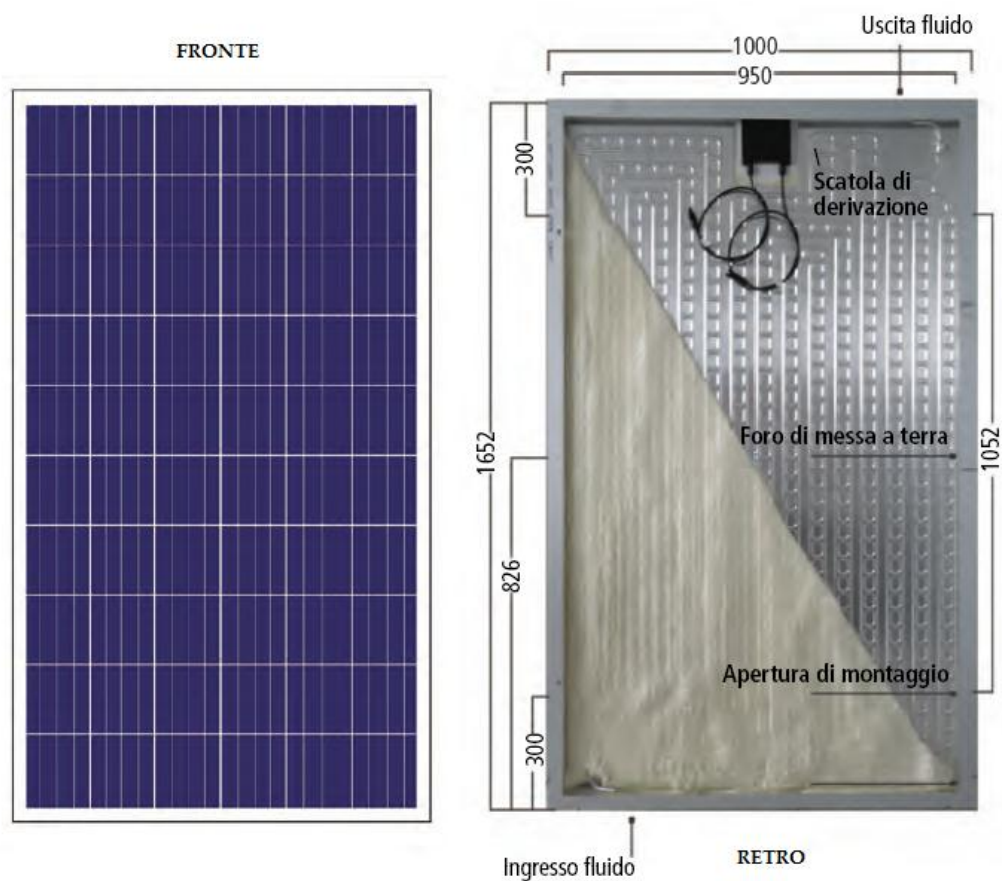


Figura 17: Modulo policristallino H-NRG.

AnafSolar dichiara che il modulo H-NRG può fornire 230 Watt elettrici più 800 Watt termici, in condizioni di insolazione standard.

I vantaggi e gli svantaggi, di questo modulo, sono stati precedentemente trattati, si vedano quindi ora i parametri tecnici che contraddistinguono questa soluzione, Figura 48.

DIMENSIONI E PARAMETRI FISICI			
Lunghezza (mm)	1652	Contenuto ferroso nel vetro (ppm)	90 ~ 120
Larghezza (mm)	1000	Spessore vetro (mm)	4
Profondità (mm)	45	Film incapsulante	E.V.A. Bridgestone
Peso (Kg)	34	Protezione posteriore	TPT e TPE Krempel
Tipo di cella	Policristallina	Cornice	Alluminio anodizzato
Dimensione cella (mm)	156 x 156	Cavi e scatola di giunzione	Cavo solare unipolare L 900 mm Ø 4mm
Numero celle	60	Classe di protezione scatola di giunzione	IP65
Layout celle	6 x 10	Numero di diodi di bypass	3

PARAMETRI TECNICI	
Potenza di picco Pm(W)	230W
Tolleranza di potenza (%)	-0+3
Tensione MPP Vm(V)	30
Corrente MPP Im(A)	7,67
Tensione di circuito aperto Voc (V)	36,8
Corrente di circuito chiuso Isc (A)	8,34
Tensione massima di sistema (VDC)	1000
Efficienza del pannello (%)	13,9%
Massimo carico superficiale	2400N/m ²
Isolamento	>100MΩ

COEFFICIENTI DI TEMPERATURA	
Coef. di temperatura di potenza W%/°C	-0,45 %/°C
Coef. di temperatura di tensione Voc%/°C	-0,36 %/°C
Coef. di temperatura di corrente Isc%/°C	+0,05 %/°C
NOCT	45 ± 3°C
Intervallo di temperatura di lavoro	-40°C ~ +85°C

PARAMETRI FUNZIONALI		
Rendimento ottico	η_b	0,513
Coefficiente di dispersione termica lineare	a_1	7,680 W/(m ² K)
Coefficiente di dispersione termica quadratico	a_2	0,014 W/(m ² K ²)
Variazione dell'efficienza ottica per un angolo di incidenza pari a 50°	$k_{\Theta}(50^\circ)$	94 %
Perdite di carico		150 mbar
Massima temperatura operativa consentita		80 °C
Massima pressione di esercizio		3 bar
Portata consigliata		1,2 l/min
Peso del pannello a vuoto		34 Kg
Volume di fluido nel pannello		0,8 l
Superficie lorda		1,65 m ²
Superficie di apertura		1,52 m ²
Superficie assorbitore		1,46 m ²
Diametro attacchi di collegamento		Ø 8 x 1 mm x mm
Normativa di riferimento		UNI EN 12975 CEI EN 61215 CEI EN 61730

Parametri riferiti alla superficie dell'assorbitore

Condizioni standard di test: Irraggiamento di 1000W/m², temperatura ambiente 25°C, vento di 1,5 m/s.

Figura 48: Dati e parametri modulo policristallino H-NRG.

MODULI PVT SERIE Cs e Ph di FOTOTHERM S.r.l.

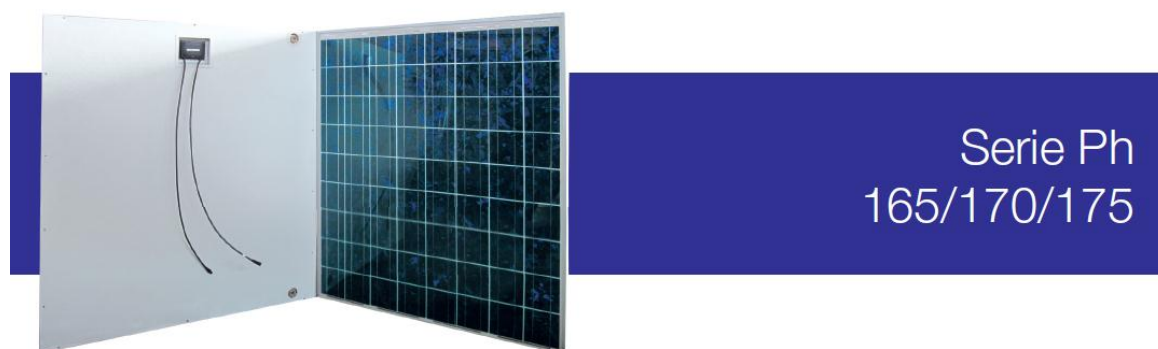


Questo modulo termo-fotovoltaico viene realizzato con un telaio in alluminio anodizzato, idoneo a soddisfare elevati standard di qualità per resistenza alla corrosione. Esso è conforme alla norma ICE61215 e presenta le seguenti caratteristiche.

Serie Cs

CARATTERISTICHE ELETTRICHE - ELECTRICAL DATA	FT220Cs	FT226Cs	FT230Cs	FT236Cs	FT240Cs	FT246Cs	FT250Cs
Potenza nominale - Typical power (Pn)	220 Wp	226 Wp	230 Wp	236 Wp	240 Wp	246 Wp	250 Wp
Tensione a circuito aperto - Open circuit voltage (Voc)	36,6 V	36,7 V	36,8 V	36,9 V	37,0 V	37,1 V	37,2 V
Tensione alla massima potenza - Maximum power voltage (Vpm)	29,2 V	29,4 V	29,6 V	29,8 V	29,9 V	30,0 V	30,1 V
Corrente di corto circuito - Short circuit current (Isc)	8,09 A	8,19 A	8,34 A	8,46 A	8,59 A	8,74 A	8,87 A
Corrente alla massima potenza - Maximum power current (Ipm)	7,63 A	7,65 A	7,78 A	7,90 A	8,03 A	8,17 A	8,30 A
Efficienza modulo - Module efficiency (η _m)	13,7 %	14,0 %	14,3 %	14,6 %	14,9 %	15,2 %	15,5 %
Tensione massima sistema - Maximum system voltage (V)	1000V DC						
Coefficiente di temperatura (Pn) - Temperature coefficient (Pn) (γ)	-0,43 %/°C						
Coefficiente di temperatura (Vpm) - Temperature coefficient (Vpm) (β)	-0,34 %/°C						
Coefficiente di temperatura (Ipm) - Temperature coefficient (Ipm) (α)	0,065 %/°C						
Condizioni STC: irraggiamento = 1000W/m ² , temperatura della cella = 25°C STC conditions: irradiance = 1000W/m ² , cell temperature = 25°C							
CARATTERISTICHE TERMICHE - THERMAL DATA							
Superficie attiva - Collector area	1,69 m ²						
Potenza termica nominale - Nominal thermal power	900 W						
Connettore idraulico - Hydraulic connector	2 x 1/2" femmina						
Portata - Volume flow rate	1,6 - 2,6 l/min						
Perdita di carico - Flow losses	400 - 900 mmH ₂ O						
Volume fluido vettore - Fluid volume	0,8 l						
Coefficiente α1 - Coefficient α1	9,12						
Coefficiente α2 - Coefficient α2	0,00						
Capacità termica effettiva - Effective thermal capacity	20 kJ Kg ⁻¹ K ⁻¹						
IAM K0 a 60°C - IAM K0 at 60°C	96,0 %						
SPECIFICHE - SPECIFICATION							
Celle - Cells	Silicio policristallino 166 mm Polycrystalline silicon 166 mm						
Numero di celle e connessioni - Number of cells and connections	60						
Dimensioni - Dimensions	1638x982x40 mm						
Peso - Weight	27 Kg						

Figura 49: Dati e parametri modulo policristallino serie Cs FOTOTHERM.



Serie Ph

CARATTERISTICHE ELETTRICHE - ELECTRICAL DATA

		FT165Ph	FT170Ph	FT175Ph
Typical power	(Wp)	165	170	175
Tensione a circuito aperto - <i>Open circuit voltage</i>	(Voc)	43,2 V	43,3 V	43,4 V
Tensione alla massima potenza - <i>Maximum power voltage</i>	(Vpm)	34,4 V	34,7 V	35,0 V
Corrente di corto circuito - <i>Short circuit current</i>	(Isc)	5,1 A	5,2 A	5,3 A
Corrente alla massima potenza - <i>Maximum power current</i>	(Ipm)	4,8 A	4,9 A	5,0 A
Efficienza modulo - <i>Module efficiency</i>	(η_m)	12,3 %	12,7 %	13,0 %
Tensione massima sistema - <i>Maximun system voltage</i>	(V)	1000V DC		
Coefficiente di temperatura - <i>Temperature coefficient</i>	($\gamma_{P/P}$)	-0,43%/°C		
Conformità		CE, IEC 61215, Safety class II		

Condizioni STC: irraggiamento = 1000W/m², temperatura della cella = 25°C
 STC condition: irradiance = 1000W/m², cell temperature = 25°C

CARATTERISTICHE TERMICHE - THERMAL DATA

Superficie attiva - <i>Collector area</i>	1,22 m ²
Potenza termica nominale - <i>Nominal thermal power</i>	0,7 kW
Connettore idraulico - <i>Hydraulic connector</i>	2 x ½" femmina
Portata - <i>Volume flow rate</i>	1,5 - 2,5 l/min
Perdita di carico - <i>Volume flow rate</i>	286 - 550 mmH ₂ O
Volume fluido vettore - <i>Fluid volume</i>	1,2 l
Coefficiente a1 - <i>Coefficient a1</i>	11,11
Coefficiente a2 - <i>Coefficient a2</i>	0,032
Capacità termica effettiva - <i>Effective thermal capacity</i>	14,3 kJ Kg ⁻¹ K ⁻¹
IAM K θ a 50°	96,0 %
Certificazione - <i>Certification</i>	UNI EN 12975-2:2006

SPECIFICHE - SPECIFICATION

Celle - <i>Cells</i>	Celle in silicio policristallino 125 mm Polycrystalline silicon 125 mm square
Numero di celle e connessioni - <i>Number of cells and connections</i>	72
Dimensioni - <i>Dimensions</i>	1237x1082x38
Peso - <i>Weight</i>	25 Kg
Dimensioni box (2pz/box) - <i>Dimension box (2pc/box)</i>	1360x1110x100

Figura 50: Dati e parametri modulo policristallino serie Ph FOTOTHERM.

2.4 Sistemi ibridi termo-fotovoltaici

Si vedrà di seguito una possibile tipologia di impianto termo-fotovoltaico.

L'AnafSolar ne propone quattro, distinguendoli per scopo finale, sono:

- Sistema per la produzione di acqua calda sanitaria;
- Sistema per la produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento invernale;
- Sistema per la produzione di acqua calda sanitaria, riscaldamento invernale e condizionamento estivo;
- Sistema per il raffreddamento di un impianto fotovoltaico.

In tutte e quattro le tipologie di impianto sopracitate, viene utilizzato il modulo l'H-NRG, ciò che le contraddistingue è invece il sistema che viene abbinato ai pannelli termo-fotovoltaici, per realizzare lo scopo voluto. Verranno quindi inseriti diversi dispositivi a seconda delle necessità impiantistiche.

Si veda ora come viene realizzato il sistema per la produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento invernale di AnafSolar (Figura 51).

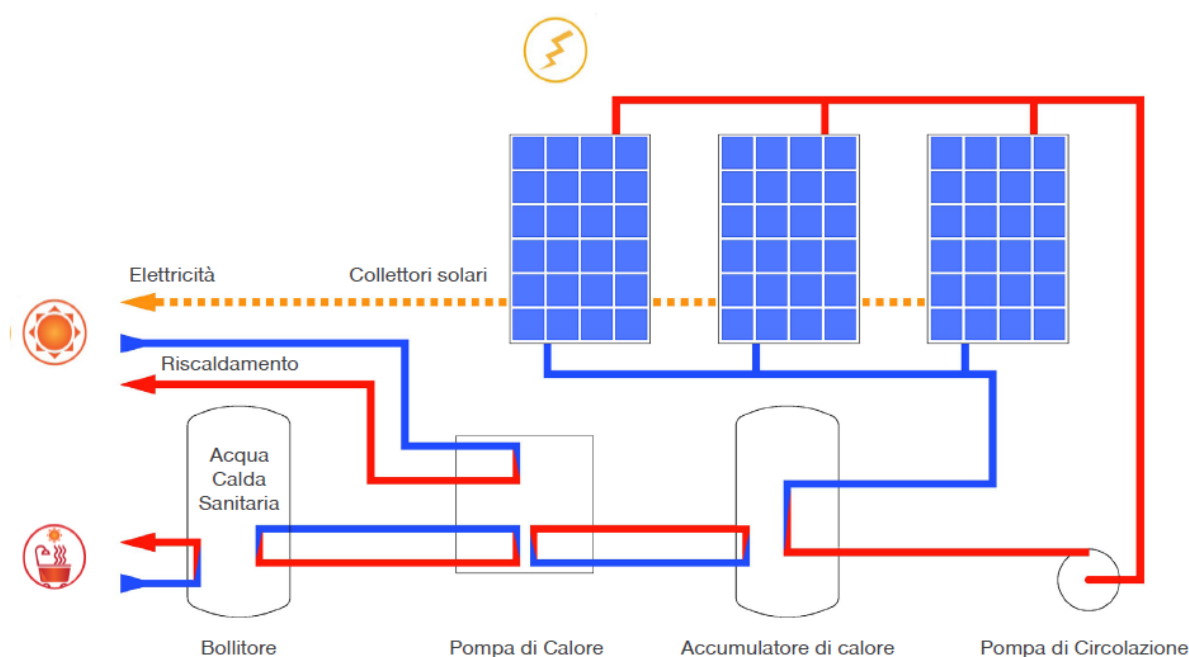


Figura 51: Sistema termo-fotovoltaico di AnafSolar per la produzione di acqua calda sanitaria, riscaldamento ambienti ed elettricità.

Questo sistema è composto innanzi tutto da uno o più moduli termofotovoltaici H-NRG, collegati all'impianto elettrico; si hanno poi una serie di circuiti idraulici chiusi e aperti. Nel primo, il fluido termovettore circola all'interno delle tubature grazie ad una pompa di circolazione (circuiti a circolazione forzata, chiusi), che spinge il liquido freddo dall'accumulatore ai collettori e quello caldo dai collettori all'accumulatore. Il fluido all'interno dell'accumulatore di calore, viene quindi riscaldato e immagazzinato finché non ne viene fatta richiesta.

Quando l'utente vuole usufruire di acqua calda sanitaria e/o riscaldare l'ambiente, si attiva la pompa di calore. Questa macchina è in grado di trasferire l'energia termica da un corpo ad un altro, indifferentemente da quale dei due si trova a temperatura inferiore; per funzionare necessiterà di corrente elettrica, come la pompa di circolazione. Una volta attivata, la pompa di calore, trasferisce l'energia termica dall'accumulatore al boiler e all'impianto di riscaldamento, restituendo così all'accumulatore fluido freddo (circuiti chiusi).

Il bollitore (o boiler) ha il compito di scaldare ulteriormente l'acqua calda sanitaria al suo interno, nel caso in cui la pompa di calore non fornisca l'energia termica necessaria per scaldare l'acqua fino alla temperatura desiderata dall'utente.

Oltre alle diverse tipologie di impianto, AnafSolar propone anche vari Kit standard, suddivisi per produzione di kW. Si vedano di seguito i dati relativi a H-NRG Kit 3, realizzato con 13 moduli H-NRG, Figura 52.

H-NRG Kit 3 è un kit predefinito che produce in condizioni di riferimento 3kW elettrici, e viene proposto in alcune varianti che conservano l'architettura di base ed aggiungono funzionalità per servizi sempre maggiori.

CONDIZIONI DI RIFERIMENTO*			
Perdite di carico pannello	150 mbar		
Massima temperatura operativa consentita	80°C		
Pressione statica massima	3 bar		
Portata del circuito consigliata	0,95 m ³ /h		
Peso del pannello a vuoto	34 Kg		
Volume del liquido nel pannello	0,8 l		
Dimensioni d'ingombro	1650x1000x45 mm		
Diametro attacchi idraulici	8 x 1 mm		
Normativa di riferimento	UNI EN 12975 CEI EN 61215 CEI EN 61730		
PRESTAZIONI ELETTRICHE*			
Irraggiamento solare	1000 W/m ²		
Potenza elettrica nominale	2,99 kW		
Produzione elettrica annua	3417 kWh		
Produzione mese più favorevole (Luglio)	460 kWh		
Produzione mese più sfavorevole (Dicembre)	117 kWh		
PRESTAZIONI TERMICHE*			
	Estate	Mezza stagione	Inverno
Potenza termica al pannello (kW)	0,75	0,38	0,19
Inclinazione collettori	25°	25°	25°
Temperatura ambiente	25°C	18°C	8°C
Potenza termica complessiva (kW)	9,75 (50°C)	4,87 (40°C)	2,47 (25°C) int**
PRESTAZIONI - POMPA DI CALORE 6kW*			
	Estate	Mezza stagione	Inverno
Potenza termica al pannello (kW)	0,75	0,38	0,19
Temperatura uscita fluido dai collettori (°C)	50,00	20,00	5,00
COP (Coefficiente di Performance)	*	5,60	3,48
Potenza assorbita al compressore	0	2,02	2,01
Potenza termica complessiva a 50°C (kW)	9,75	9,21	7,00
Costo per 100 l d'acqua a 50°C (EUR) ***	0,00	0,14	0,18
Costo per 100 l d'acqua a 50°C con gas naturale (EUR)	0,30	0,30	0,30

* Dati medi non impegnativi, basati su statistiche effettuate nella provincia di Milano

** Energia termica da usarsi ad integrazione

*** Riferiti ad acqua ingresso a 15°C e costo elettricità 0.16 EUR/kWh

Sono inoltre disponibili kit da 4.5, 5, 6, 9 e 10kW in grado di produrre sino a 30kW termici tali da garantire una riduzione dei costi energetici fino al 90% a livello ACS e fino al 60% in termini di riscaldamento rispetto all'utilizzo del gas metano.

Figura 52: H-NRG Kit 3.

Capitolo 3: Studio teorico dei limiti di conversione

Quando si parla di studio teorico dei limiti di conversione (in questo caso riferendosi alla tecnologia termo-fotovoltaica) si intende uno studio atto a ricavare quali potrebbero essere i risultati massimi ottenibili da questa tecnologia e quindi quale sarebbe l'efficienza di conversione massima raggiungibile.

Per poter compiere questo studio, si è partiti dal parametro più importante che caratterizza i sistemi termo-fotovoltaici, ovvero l'energia solare.

3.1 Energia solare e densità spettrale di potenza

L'energia solare, detta anche radianza o radiazione solare, non è altro che la quantità di luce (onda elettromagnetica) che raggiunge la terra, viene quindi frequentemente espressa come potenza.

Nel sottocapitolo 1.2 si sono visti alcuni standard relativi a questa grandezza e si è deciso di adottare lo standard AM1.5, usato per le applicazioni terrestri. Si è inoltre parlato di un parametro chiamato "spettro di radiazione solare" ma per la precisione sarebbe più corretto parlare di "densità spettrale di potenza irradiata dal sole". Questa grandezza rappresenta una densità di energia, viene infatti misurata in $W/(m^2 \cdot nm)$, ed indica la quantità di potenza proveniente dal sole che raggiunge la terra in funzione della lunghezza d'onda del fotone. L'irradianza, sempre citata nel sottocapitolo 1.2, rappresenta invece la quantità effettiva di potenza generata dal sole in un m^2 di terreno da esso illuminato (irraggiato) e si esprime quindi in W/m^2 . L'irradianza (I) è quindi strettamente legata alla densità spettrale di potenza ($S(\lambda)$).

Sarà però la seconda ad essere utilizzata per lo studio teorico dei limiti di conversione, in quanto è in funzione della lunghezza d'onda (λ).

Nello standard ASTM G-173-03 AM1.5, vengono definite due distribuzioni spettrali standard della radiazione solare, densità spettrale normale di potenza diretta (Direct+CircumSolar) e densità spettrale di potenza globale (Global tilt). La prima considera la componente diretta normale della radiazione solare, che è quasi parallela in quanto il sole non è

una sorgente puntiforme, ma un disco del diametro apparente di 0,5 gradi, ed esclude la componente diffusa e riflessa.

La densità spettrale di potenza globale, invece, racchiude tutte e tre le componenti: diretta, diffusa e riflessa.

Essendo la seconda più completa, risulta più adatta ad essere utilizzata nello studio.

Per compiere lo studio teorico si parte quindi da una serie di dati che rappresentano la densità spettrale di potenza globale irradiata dal sole, in funzione della lunghezza d'onda.

Un altro parametro importante sarà quindi la lunghezza d'onda stessa (λ in nm), in funzione della quale verrà impostato il grafico della densità spettrale di potenza globale (Figura 53).

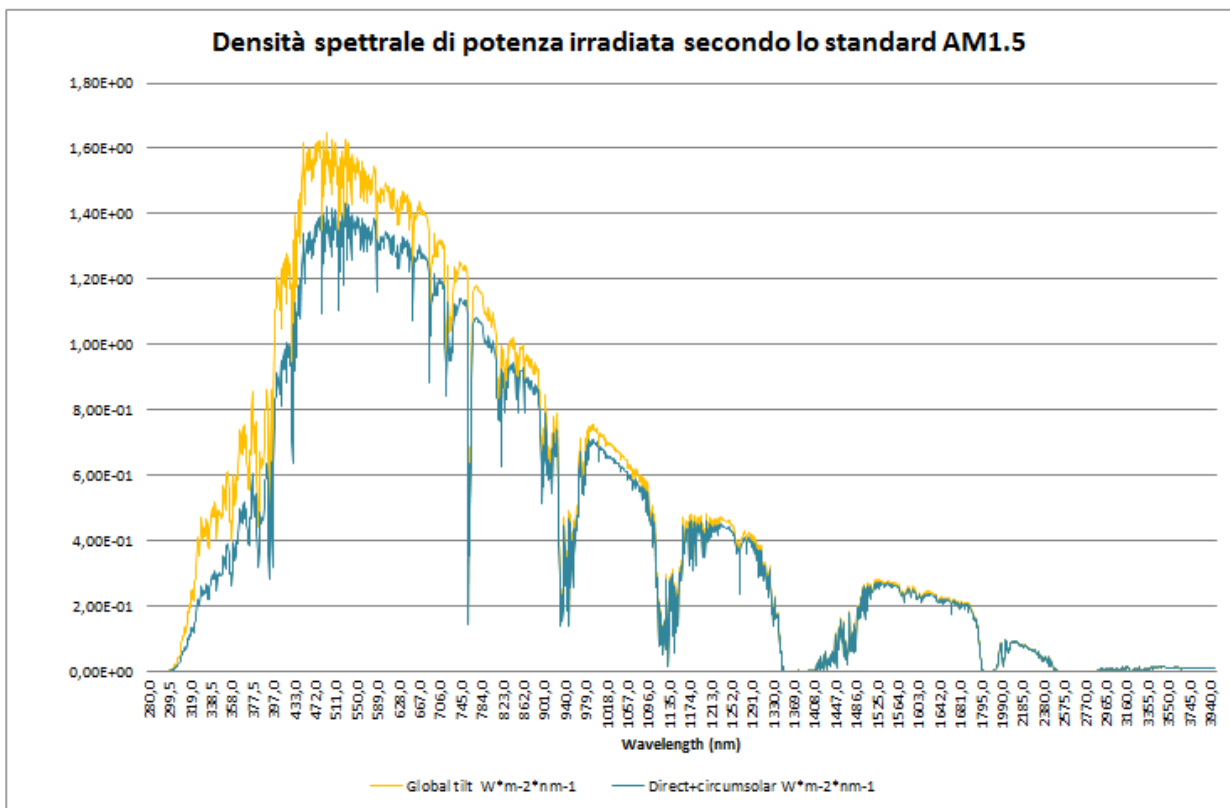


Figura 53: In giallo si può vedere la densità spettrale di potenza globale (Global tilt), mentre in azzurro è illustrata la densità spettrale di potenza diretta (Direct+Circumsolar), entrambe in funzione della lunghezza d'onda (Wavelength) crescente (da 280 a 4000nm).

3.2 Energia elettrica idealmente recuperata mediante un modulo fotovoltaico

A questo punto può essere interessante ricavare quanta energia solare viene idealmente recuperata da un modulo fotovoltaico e confrontarla con quella totale (Global tilt). Per far questo è necessario compiere una serie di calcoli.

Premettendo che la densità spettrale di potenza globale viene espressa in funzione della lunghezza d'onda (λ), tutte le seguenti considerazioni verranno fatte tenendo λ come parametro variabile.

Verrà quindi considerata la funzione a gradino del grafico precedente (Figura 53), che verrà reso discreto scegliendo un passo di lunghezza d'onda ($\Delta\lambda$) pari a 0,5 nm.

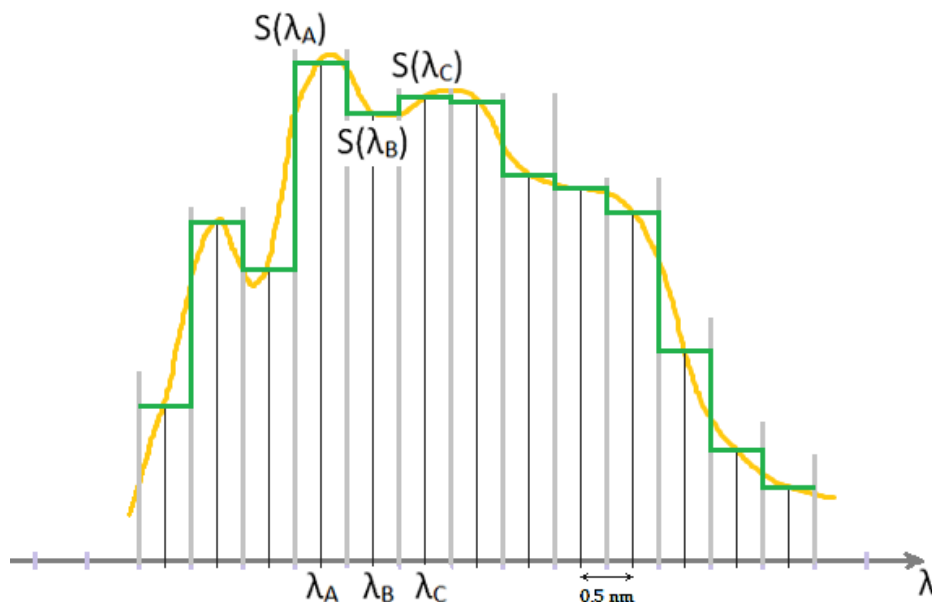


Figura 54: In giallo si può vedere una porzione della funzione “densità spettrale di potenza irradiata dal sole”, ed in verde la stessa funzione discretizzata per intervalli di lunghezza d’onda pari a 0,5 nm.

Innanzitutto bisogna calcolare l’energia di un fotone, che dipende dalla lunghezza d’onda secondo la relazione:

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

Dove:

h è la costante di Planck ed è pari a $6,6260693 \cdot 10^{-34}$ Js;

c è la velocità della luce nel vuoto e vale 299792458 m/s;

λ è la lunghezza d'onda (all'aumentare di questo valore l'energia del fotone diminuisce).

Il passo successivo consiste nel ricavare il numero di fotoni che giungono sulla terra, sempre in funzione della lunghezza d'onda. Per ottenere un valore adimensionale sarà necessario supporre di considerare una superficie di 1m^2 soggetta al sole per il tempo di 1 secondo.

$$n^{\circ}\text{fotoni} = \frac{S(\lambda) * \Delta\lambda}{E_{\text{fotone}}}$$

Dove:

$S(\lambda)$ è la densità spettrale di potenza globale, discretizzata, misurata in $\text{W}/(\text{m}^2 * \text{nm})$;

$\Delta\lambda$, come visto in precedenza, è il passo di lunghezza d'onda con cui si è discretizzata la precedente funzione e vale $0,5$ nm;

A questo punto è possibile ricavare l'energia elettrica recuperata da un modulo fotovoltaico ideale, avente superficie di 1m^2 ed esposto alla luce solare per 1 secondo.

$$E. \text{ elettrica idealmente recuperata} = n^{\circ}\text{fotoni} * E_g$$

Siccome l'Energy gap viene solitamente espresso in eV e si vuole ottenere l'energia elettrica idealmente recuperata in Joule per poterla comparare, all'interno della formula si inserisce la conversione da eV a Joule.

Sapendo che $1\text{eV} = 1,60217646 \cdot 10^{-19}$ J:

$$E. \text{ elettrica idealmente recuperata} = n^{\circ}\text{fotoni} * E_g * 1,60217646 * 10^{-19} [\text{J}]$$

Dove E_g è l'Energy gap, ovvero la distanza che separa la banda di valenza da quella di conduzioni di un atomo. Per il silicio questo valore è pari a circa $1,12\text{eV}$.

Si può notare che finora l'energia fornita dal sole è stata espressa attraverso una densità spettrale di potenza avente unità di misura in $W/(m^2 \cdot nm)$.

Perciò, per poter confrontare l'energia elettrica idealmente recuperata con questo parametro, è necessario far diventare anch'essa una densità di potenza.

Avendo ricavato l'energia elettrica in Joule sarà sufficiente dividerla per il passo di discretizzazione utilizzato in precedenza, $\Delta\lambda$ pari a 0,5 nm.

$$\begin{aligned} \text{Densità di potenza elettrica idealmente recuperata} &= \\ &= \frac{n^\circ \text{fotoni} \cdot E_g \cdot 1,60217646 \cdot 10^{-19}}{\Delta\lambda} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}] \end{aligned}$$

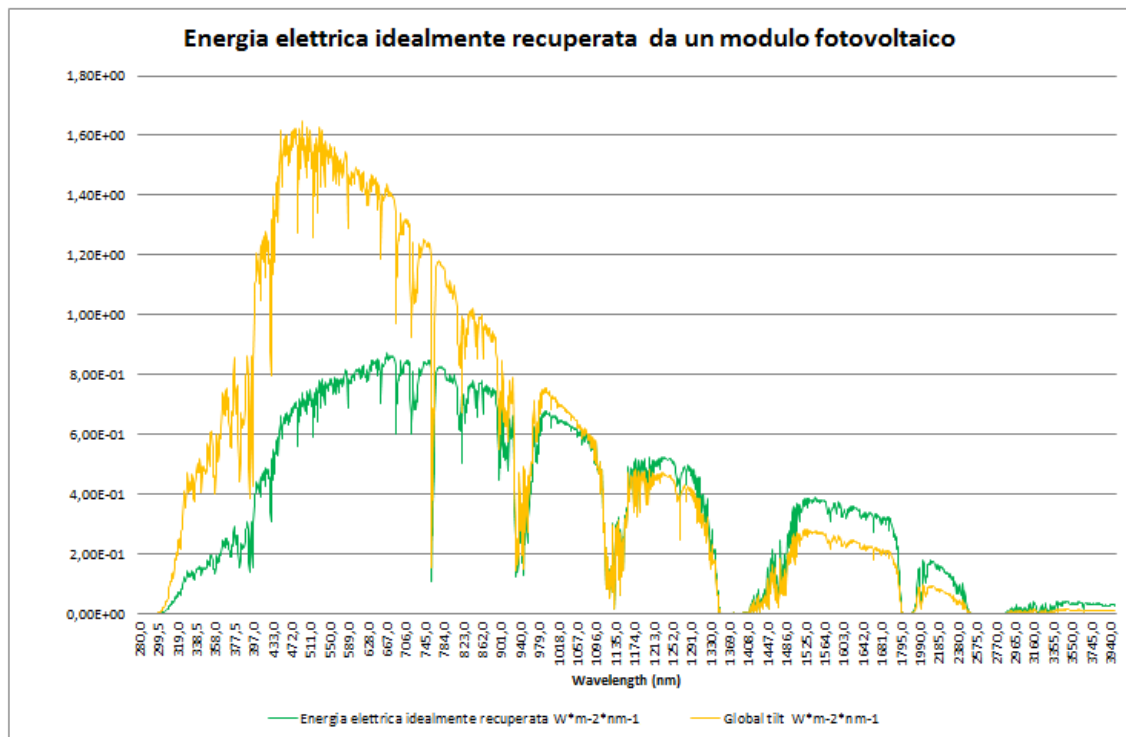


Figura 55: Il grafico in verde rappresenta la quantità di energia solare idealmente recuperabile mediante un modulo fotovoltaico e quindi la massima energia elettrica che il modulo è in grado di fornire in uscita.

Tuttavia bisogna precisare che questo grafico, dopo un certo valore di lunghezza d'onda, perde di significato.

Come si è visto nel sottocapitolo 1.4 e 1.5 la cella fotovoltaica genera energia elettrica grazie all'effetto fotoelettrico, che si verifica solo nel caso in cui l'energia del fotone incidente sia maggiore o uguale all'Energy gap.

Alla luce di queste considerazioni si possono svolgere i calcoli per verificare fino a quale valore di lunghezza d'onda avviene l'effetto fotoelettrico, nel caso in cui si usi il silicio come materiale semiconduttore.

Come visto in precedenza l'Energy gap del silicio ha un valore di circa 1,12eV, sapendo che 1eV vale $1,60217646 \cdot 10^{-19}$ J si può calcolare che:

$$E_g(\text{Si}) = 1,79443764 \cdot 10^{-19} \text{ [J]}$$

Per ricavare il valore di lunghezza d'onda fino al quale si verifica l'effetto fotoelettrico, si supponga di trovarsi nel caso limite $E_{\text{fotone}} = E_g$ (minimo valore di energia del fotone che permettere ad un elettrone di passare dalla banda di valenza a quella di conduzione).

Come visto sopra, l' $E_{\text{fotone}} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ e quindi svolgendo la formula inversa si può ricavare che:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_{\text{fotone}}} = 1'107 \text{ [nm]}$$

Perciò, per tutti i valori di λ successivi a 1'107 nm, non si verifica l'effetto fotoelettrico e quindi il modulo non produce corrente.

Il grafico corretto risulta pertanto essere troncato a quel valore (come si può vedere in Figura 56).

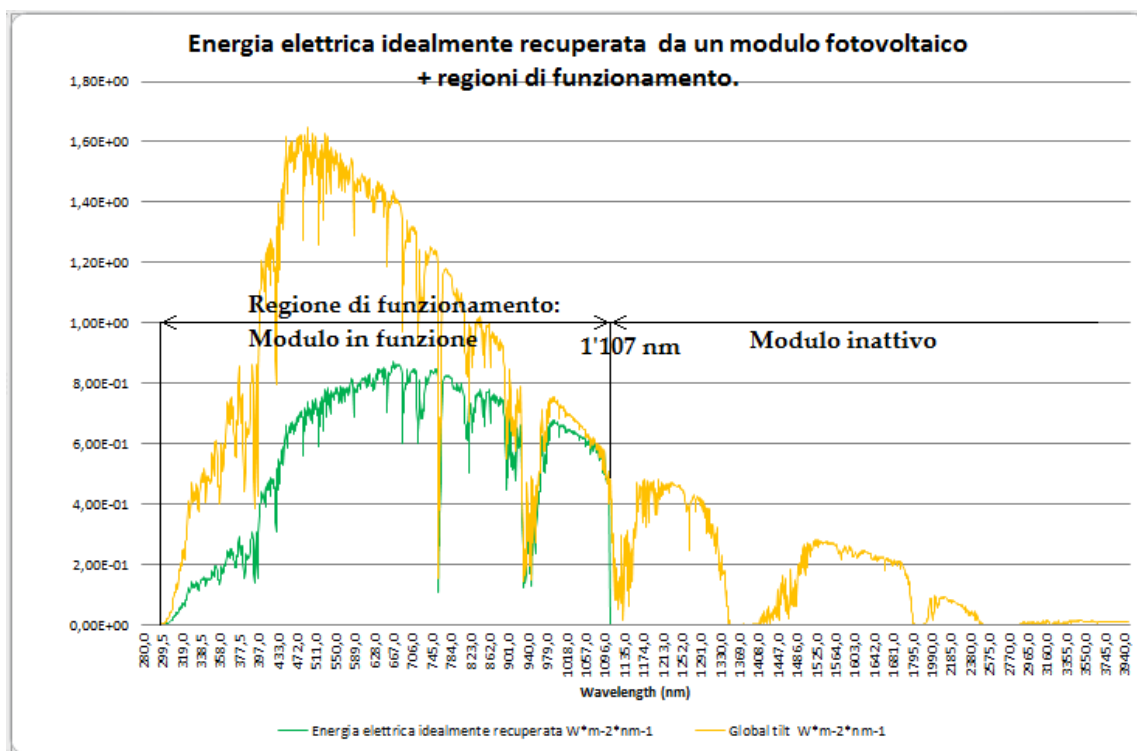


Figura 56: Regione di funzionamento modulo fotovoltaico.

3.3 Energia termica dissipata da un modulo fotovoltaico

In Figura 56 si può notare come un modulo fotovoltaico sia in grado di convertire in energia elettrica solo una parte dell'energia solare incidente. Innanzitutto si è appena visto come il modulo risulti spento per fotoni aventi lunghezza d'onda superiore a 1'107 nm, valore di energia non sufficiente a scatenare l'effetto fotoelettrico (questi fotoni vengono detti sottosoglia). Inoltre, anche quando il modulo si trova nella regione di funzionamento, non riesce a trasformare tutta l'energia solare in elettricità a causa del fatto che possiede un Energy gap limitato. Questo fenomeno è stato spiegato nel sottocapitolo 1.4., che mostra come l'energia in eccesso di alcuni fotoni (detti energetici) non possa essere sfruttata ma venga invece dissipata sotto forma di calore (energia termica).

A questo punto risulta interessante quantificare l'energia termica persa (sprecata) che potrà essere successivamente raccolta da un collettore integrato al modulo fotovoltaico, grazie ad uno scambiatore di calore (serpentina per il passaggio di fluido termovettore). Come in precedenza,

questa energia verrà espressa attraverso una densità di potenza per poterla confrontare con il Global tilt.

$$\text{Densità di potenza termica persa} = S(\lambda) - \text{Densità di potenza elettrica idealmente recuperata}$$

$$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}]$$

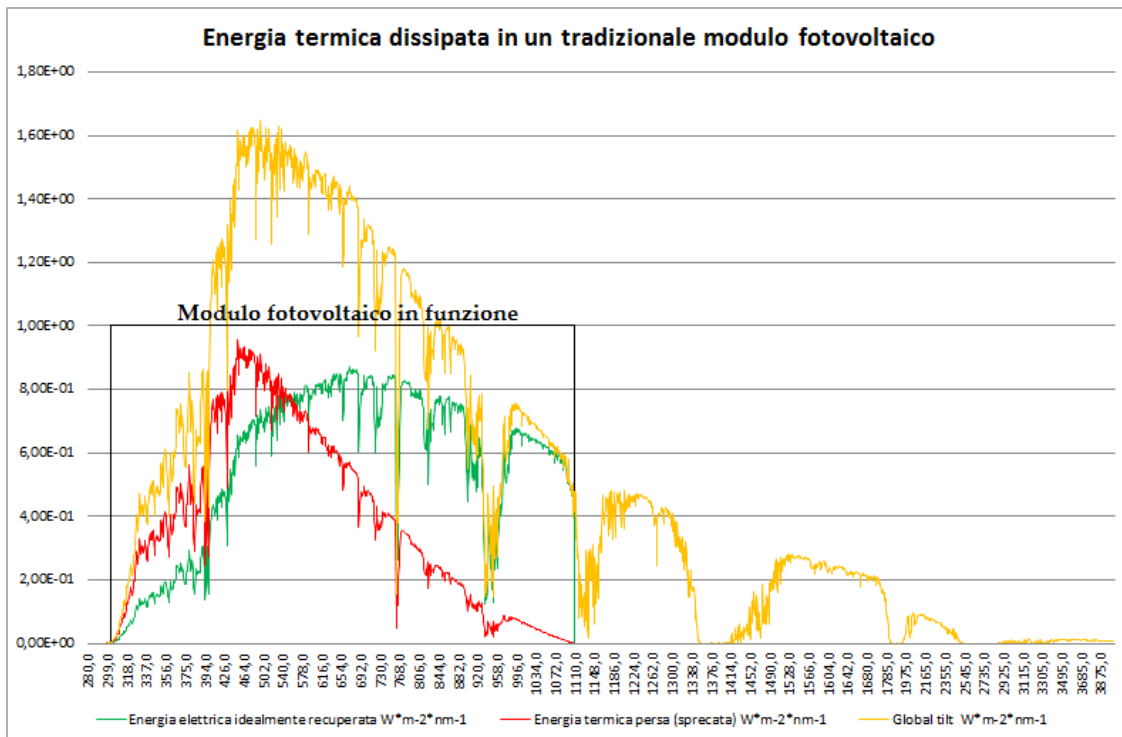


Figura 57: In rosso si può vedere l'energia termica dissipata in un tradizionale modulo fotovoltaico in funzione; rispetto all'energia totale fornita dal sole, espressa nel grafico in giallo.

3.4 Indice percentuale di potenza termica recuperabile

Per concludere lo studio teorico dei limiti di conversione è necessario ricavare un indice percentuale che esprima quanta potenza termica viene persa sulla base della potenza elettrica idealmente prodotta dall'impianto.

Per calcolare questo indice si dovrà svolgere il rapporto tra le due potenze precedenti. Tali potenze si possono calcolare integrando (sulla lunghezza d'onda) rispettivamente la densità di potenza termica persa e la densità di potenza elettrica idealmente recuperata.

$$I_{PTR} = (P_{\text{termica persa}} / P_{\text{elettrica idealmente recuperata}}) * 100 = 68,79 \%$$

Da questo valore, si può ricavare che in un sistema di moduli fotovoltaici per la produzione di 3kW elettrici, 2'063,7 Watt vengono dissipati sotto forma di calore. Ciò significa che idealmente sono disponibili poco più di 2kW termici, che potrebbero essere raccolti dai collettori termici integrati ai moduli e impiegati per la produzione di acqua calda sanitaria o altri utilizzi.

3.5 Conclusioni

Si è qui concluso un primo studio sui limiti teorici di conversione energetica dei sistemi termo-fotovoltaici, che ha portato ad una valutazione puramente ideale dell'energia termica persa in un tradizionale modulo fotovoltaico. Non sono quindi state prese in considerazione le inefficienze associate a tale tecnologia che ricoprono un aspetto cruciale nello studio delle prestazioni reali, ma è stato comunque compiuto il primo importante passo che sarà la base per i successivi approfondimenti.

Un secondo aspetto che rimane da affrontare per concludere in maniera quantitativa lo studio sulla convenienza di questa tecnologia, è l'analisi di sostenibilità e competitività dei costi che potrà essere realizzata in un secondo momento quando questa tecnologia prenderà maggiormente piede sul mercato Italiano.

I risultati ottenuti dallo studio qualitativo svolto, sono però sufficienti ad affermare che la tecnologia in esame possiede buone potenzialità.

Innanzitutto si è visto come un modulo ibrido riesca a catturare maggior energia solare rispetto ad un normale modulo fotovoltaico. Ciò avviene anche grazie al fatto che il collettore integrato mantiene bassa la temperatura della parte fotovoltaica, contrastando la perdita di efficienza di conversione dovuta all'innalzamento della temperatura del pannello (è stato stimato che l'efficienza diminuisce di 0,35-0,45% all'aumentare di ogni grado Celsius). Inoltre il collettore recupera buona parte dell'energia termica che viene normalmente dissipata, generando diversi vantaggi secondari che verranno successivamente presi in esame.

In secondo luogo, anche se si è scoperto che l'efficienza del collettore integrato è minore dell'efficienza di un collettore disgiunto, questa tecnologia può risultare conveniente in quanto ha il vantaggio di incorporare due finalità diverse in un unico pannello, con una notevole riduzione di spazio (rendendo così l'impianto più flessibile, adattabile in qualsiasi situazione) ed un costo relativamente basso rispetto all'installazione di un modulo fotovoltaico ed un collettore termico separati.

Vantaggi secondari:

- La durata di vita di un normale impianto fotovoltaico è molto simile a quella di un impianto solare termico e si aggira intorno ai 25-30 anni di funzionamento. E' però plausibile che questi impianti vengano smantellati anche parecchi anni prima, in quanto l'erosione e l'usura possono ridurre drasticamente le loro prestazioni. Grazie alle minori temperature di lavoro gli impianti termo-fotovoltaici si usurano più lentamente e risultano quindi più duraturi.
- Un modulo fotovoltaico tradizionale cattura parte dell'energia proveniente dal sole riducendo, nei pressi del pannello, l'innalzamento della temperatura provocato dall'irraggiamento solare. E' stato stimato che questo dispositivo disperde nell'ambiente circostante una quantità di energia termica pari a circa il 32% dell'energia totale fornitagli dal sole. Nei moduli PVT questo vantaggio è sensibilmente ampliato grazie al fatto che di questo 32% di energia termica buona parte viene assorbita dal collettore, bloccando drasticamente l'aumento di temperatura durante le ore diurne.

Bisogna però ricordare che contrapposto a questi vantaggi c'è un maggior costo per singolo modulo. Si pensi ad esempio che mettendo a confronto due impianti da 3kW, uno realizzato con moduli H-NRG ed uno composto da normali moduli fotovoltaici, il primo risulta costare indicativamente sui 2000 € in più. Inoltre i moduli PVT in commercio hanno rendimenti compresi tra il 13 e il 16% pienamente nella media rispetto a quelli normali in silicio policristallino.

Si può concludere che i sistemi di conversione energetica ibridi termo-fotovoltaici rappresentano una soluzione impiantistica da non sottovalutare, infatti non costituiscono una semplice combinazione di tecnologie, ma creano una nuova soluzione che potrà risultare la più adatta per determinate situazioni impiantistiche.

Bibliografia:

- Bimestrale Energia solare FV fotovoltaici, elettricità dal sole, numero 2 e 5 anno VIII.
- La corsa delle green economy di Antonio Cianciullo e Gianni Silvestrini, in collaborazione con Kyoto Club.
- Il terzo conto energia: guida ai nuovi incentivi per il fotovoltaico secondo il decreto 06/08/2010, di FV fotovoltaici e zeroEmission in collaborazione con GSE (Gestore Servizi Elettrici).
- Dispensa del corso di Energetica L del professor Carlo Maria Orlandelli.
- Dispensa della ditta Sistemi fotovoltaici.com srl, di Cesena.

Principali siti utilizzati:

- www.ainm.it
- www.anafsolar.eu
- www.arkimedesrl.it
- www.autorita.energia.it
- www.bcp-energia.it
- www.cleanenergysrl.com
- www.consulente-energia.com
- www.daimon.org/ambiente
- www.earthlinked.com
- www.ecoage.com
- www.ecoalfabeto.blogspot.it
- www.ecoinchiesta.wordpress.com
- www.enea.it
- www.energiattiva.it
- www.energoclub.it

- www.eniscuola.net
- www.esi-italia.com
- www.eu.suntech-power.com
- www.eyesolarlux.com
- www.fire-italia.it
- www.fototherm.com
- www.gse.it
- www.habitatenergy.it
- www.independergy.it
- www.istitutocalvino.it
- www.lenntech.it
- www.nonsoloaria.com
- www.pv-t.org
- www.pveducation.org
- www.pvtwins.nl
- www.rischiocalcolato.it
- www.rivistamissioniconsolata.it
- www.seccosistemi.it
- www.sistemifotovoltaici.com
- www.solarenergy.ch
- www.solaria.sitiwebs.com
- www.sviluppo-energia.com
- www.tuttotetto.it
- www.wikipedia.com
- www.yoursunyourenergy.com
- www.zeroemission.eu

