

Università degli studi di Padova

SCUOLA DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica e Meccatronica
Curriculum Meccatronica

IL SOLE COME FONTE DI ENERGIA: IMPIANTI FOTOVOLTAICI

RELATORI:

- Chiar.mo Prof. MIRTO MOZZON
- Chiar.mo Prof. AUGUSTO TASSAN

Laureando: DAVIDE CASTAGNA

Anno accademico 2013/2014

INDICE

INTRODUZIONE	p.1
 CAPITOLO 1 - ENERGIA SOLARE	
1.1.Il Sole	p.3
1.2.La radiazione solare	p.4
 CAPITOLO 2 - EFFETTO FOTOVOLTAICO	
2.1.Semiconduttori	p.9
2.2.Giunzione P-N	p.11
2.3.Conversione fotovoltaica	p.12
 CAPITOLO 3 - CELLE FOTOVOLTAICHE	
3.1.Funzionamento	p.14
3.2.Tipologie di celle	p.17
3.2.1.Celle fotovoltaiche in silicio monocristallino e policristallino.....	p.17
3.2.2.Celle fotovoltaiche a film sottile (di 2° generazione)	p.19
3.2.3.Celle fotovoltaiche di 3° generazione	p.22
 CAPITOLO 4 - MODULI FOTOVOLTAICI	
4.1.Tecnologia costruttiva	p.26
4.1.1.Struttura modulo in silicio cristallino	p.26
4.1.2.Struttura modulo a film sottile	p.28
4.2.Collegamenti elettrici	p.29
4.2.1.Collegamenti tra celle	p.29
4.2.2.Cassetta di terminazione	p.30
4.2.3.Campo fotovoltaico.....	p.30
4.3.Collegamenti meccanici.....	p.32

CAPITOLO 5 - TIPOLOGIE IMPIANTI FOTOVOLTAICI

5.1.Impianti fotovoltaici	p.34
5.2.Impianti collegati alla rete	p.35
5.3.Impianti isolati dalla rete	p.36
5.4.Elementi impianto.....	p.37
5.4.1.Inverter	p.37
5.4.2.Batterie	p.38
5.4.3.Regolatore di carica	p.39

CAPITOLO 6 - PROGETTO ELETTRICO IMPIANTO FOTOVOLTAICO

6.1.Disposizione dell'impianto	p.40
6.2.Scelta dei componenti	p.42
6.2.1.Moduli fotovoltaici	p.42
6.2.2.Sistemi di accumulo	p.44
6.2.3.Regolatori di carica	p.45
6.2.4.Convertitore statico	p.46
6.3.Protezioni elettriche.....	p.48
6.3.1Diodi di blocco e diodi di by-pass	p.48
6.3.2.Quadri elettrici in c.c.	p.50
6.3.3.Quadri elettrici in c.a.	p.52
6.4.Cavi e collegamenti	p.53
6.4.1.Cablaggio dal generatore fino ai quadri di parallelo	p.53
6.4.2.Cablaggi in partenza dai quadri di parallelo stringhe	p.54
6.5.Verifiche di progetto elettrico	p.55
6.5.1.Coordinamento tra conduttori e dispositivi di protezione	p.55
6.5.2.Istallazione dei conduttori	p.56

CAPITOLO 7 - COLLAUDO E MANUTENZIONE PREVENTIVA

7.1.Collaudo.....	p.57
7.2.Manutenzione preventiva	p.61

CONCLUSIONEp.64

BIBLIOGRAFIAp.65

SITOGRAFIAp.66

INTRODUZIONE

Oggi la produzione di energia elettrica è una delle cause principali dell'inquinamento atmosferico. Produrre elettricità continuando ad utilizzare fonti fossili tradizionali, significa inquinare l'aria, l'acqua e la terra. Invece, la grande opportunità offerta dalle rinnovabili, consente di produrre energia elettrica in maniera pulita, riducendo gli impatti delle attività e contribuendo a tutelare l'ambiente.

Sole, vento e biomasse hanno il vantaggio di essere abbondanti, largamente disponibili e, al contrario dei combustibili fossili, non si esauriscono.

Oggi i progressi tecnologici hanno contribuito ad elevare l'affidabilità di infrastrutture e impianti, rendendo la produzione rinnovabile ed estremamente sicura.

Diversi sono i punti di forza delle energie rinnovabili che possono contribuire a smuovere la coscienza collettiva nell'ottica di uno sviluppo sostenibile.

In questo elaborato verrà analizzata l'energia fotovoltaica, come essa viene prodotta e la progettazione elettrica di un impianto.

L'effetto fotovoltaico è noto fin dal 1839, dalle esperienze del fisico francese Edmond Becquerel (1820-1891), che presentò alla Accademia delle Scienze di Parigi la sua "Memoria sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari", scoperta avvenuta casualmente mentre effettuava delle esperienze su una cella elettrolitica (quindi contenente una soluzione liquida) in cui erano immersi due elettrodi di platino.

Si deve aspettare il 1876 (Smith, Adams e Day) per avere una simile esperienza ripetuta con dispositivi allo stato solido, in questo caso il selenio, ma l'idea di sfruttare l'effetto fotovoltaico quale fonte energetica non ebbe modo di svilupparsi finché non si poté operare con materiali che avessero un miglior rendimento.

Solo nel 1954 si giungerà ad avere la prima cella solare commerciale in silicio, ad opera di Person, Fuller e Chapin, realizzata all'interno dei laboratori Bell.

L'Aeronautica e l'Esercito statunitensi seguirono molto da vicino lo sviluppo di questo progetto.

Entrambi ritenevano che il fotovoltaico potesse costituire la fonte energetica ideale per un progetto top-secret: i satelliti artificiali orbitanti attorno alla Terra.

Grazie a un'assidua crociata condotta da Hans Ziegler, del corpo del Genio Trasmissioni dell'esercito statunitense, la Marina Militare installò sui satelliti un sistema energetico a due sorgenti batterie chimiche e celle solari al silicio sul satellite Vanguard; mentre le batterie si esaurirono dopo una settimana circa, le celle solari funzionarono per anni.

Le sperimentazioni vennero quindi portate avanti per tale scopo e solo verso la metà degli anni settanta si iniziò a rivolgere l'attenzione verso utilizzi "terrestri".

Oggi la ricerca è volta soprattutto all'abbassamento dei costi di produzione ed al miglioramento dei rendimenti dei sistemi fotovoltaici.

Esistono varie tipologie di fotovoltaico: in questa trattazione cercheremo di fare una rapida panoramica sul funzionamento della cella e sull'attuale situazione tecnologica delle principali applicazioni.

In primo luogo introdurremo i concetti fisici e chimici su cui si basano tutte le tecnologie fotovoltaiche giungendo alla presentazione di una struttura schematica di cella solare e del suo modello elettrico teorico.

In seguito presenteremo le principali tipologie di celle, i materiali utilizzati e la loro struttura dando breve spazio anche ai diversi tipi di processi di fabbricazione.

Successivamente illustreremo le principali parti che compongono un sistema fotovoltaico, approfondendo il progetto elettrico di un impianto, dando particolare attenzione alle scelte di layout e alle scelte dei componenti, dai pannelli fotovoltaici al tipo di cablaggio.

Per concludere si effettuerà una panoramica sul tipo di collaudo di questi impianti e la rispettiva manutenzione preventiva.

CAPITOLO 1

Energia solare

1.1. Il Sole

Il Sole è una stella di dimensioni medio-piccole costituita principalmente da idrogeno (circa il 74% della sua massa, il 92,1% del suo volume) ed elio (circa il 24-25% della massa, il 7,8% del volume), cui si aggiungono altri elementi più pesanti presenti in tracce.

Esso ha una temperatura superficiale di 5 777 (5 504), caratteristica che le conferisce un colore bianco estremamente intenso e cromaticamente freddo, che però spesso può apparire giallognolo, a causa dello scattering dell'atmosfera terrestre e in ragione dell'elevazione dell'astro sull'orizzonte; il Sole, come la maggior parte delle stelle, è nella sequenza principale, ovvero in una lunga fase di equilibrio stabile in cui l'astro fonde, nel proprio nucleo, l'idrogeno in elio. Tale processo genera ogni secondo una grande quantità di energia (equivalente a), emessa nello spazio sotto forma di radiazioni elettromagnetiche (radiazioni solari), flusso di particelle (vento solare) e neutrini. La radiazione solare, emessa fondamentalmente come luce visibile ed infrarossi, consente la vita sulla Terra fornendo l'energia necessaria ad attivare i principali meccanismi che ne stanno alla base.

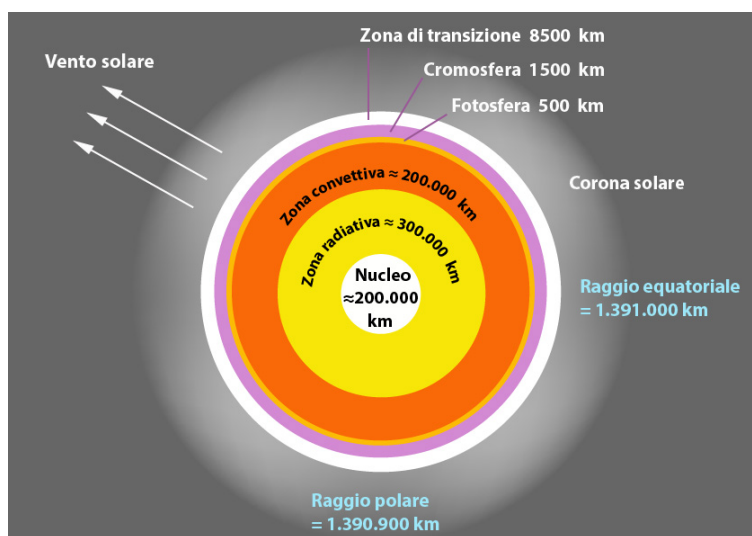
Il Sole possiede una struttura interna ben definita, la quale non è, tuttavia, direttamente osservabile a causa dell'opacità alla radiazione elettromagnetica degli strati interni della stella.

Il raggio del Sole è la distanza tra il suo centro e il limite della fotosfera, strato al di sopra del quale i gas sono abbastanza freddi o rarefatti da consentire l'irraggiamento di un significativo quantitativo di energia luminosa; è perciò lo strato meglio visibile ad occhio nudo.

La struttura interna del Sole, come quella delle altre stelle, appare costituita da involucri concentrici; ogni strato possiede caratteristiche e condizioni fisiche ben precise, che lo differenziano dal successivo.

Gli strati sono, dal centro verso l'esterno:

- Il nucleo;
- La zona radioattiva;
- La zona convettiva ;
- La fotosfera;
- L'atmosfera divisa a sua volta in:
 - Cromosfera
 - Zona di transizione
 - Corona



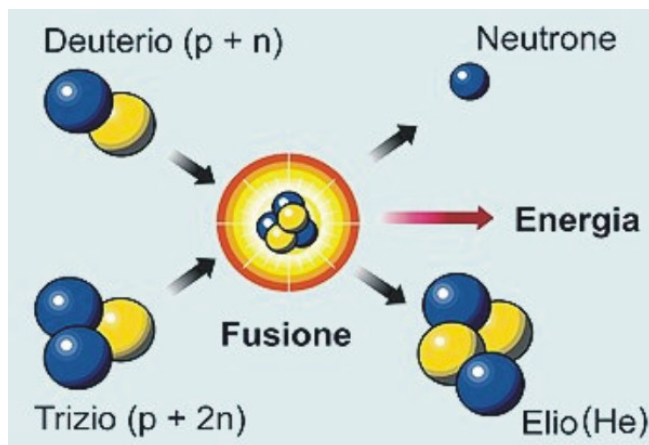
1.2. La radiazione solare

Il Sole è, analogamente alle altre stelle, una sfera di gas ad altissima temperatura (*plasma solare*), la cui materia è tenuta unita dalla forza di attrazione gravitazionale. La produzione di energia avviene nella regione centrale (*nucleo*), avente un diametro dell'ordine di 0,2 volte quello dell'intero globo solare e una densità pari a 160 . La compressione qui esercitata dal peso degli strati sovrastanti (220 miliardi di atmosfere) innalza il livello termico del gas interno fino a 15-20 milioni di gradi Kelvin, temperatura alla quale i nuclei di idrogeno (protoni), hanno energie cinetiche superiori a quelle della reciproca repulsione elettrostatica e alla quale si innescano, di conseguenza, le reazioni nucleari di fusione.

La radiazione elettromagnetica è emessa a tutte le lunghezze d'onda dello spettro, dalle onde radio ai raggi gamma, con un massimo di intensità nella banda visibile.

Secondo il cosiddetto Modello Solare Standard il meccanismo attraverso il quale il Sole produce energia è quello della fusione termonucleare.

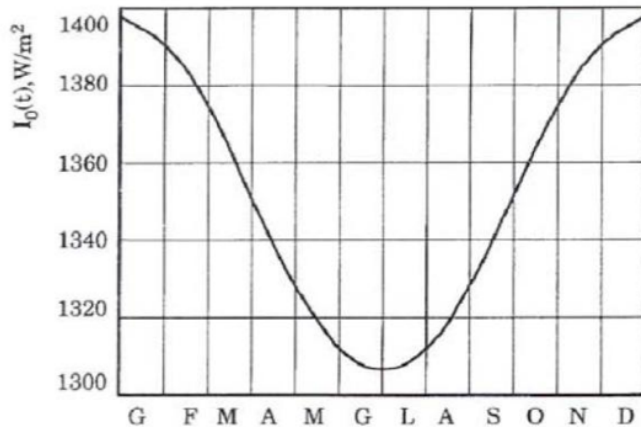
Le principali reazioni termonucleari che avvengono all'interno del Sole sono del tipo protone-protone, che alle temperature relativamente basse che esistono all'interno del Sole sono più efficienti delle reazioni del ciclo del carbonio, che, invece, sostengono le stelle più massicce.



I processi di fusione che avvengono all'interno del Sole producono una quantità immensa di energia che viene trasferita alla Terra sotto forma di onde elettromagnetiche di lunghezza compresa tra 0,2 e 3 μm , tale energia si manifesta sotto forma di un flusso continuo di fotoni, ogni fotone che raggiunge la Terra ha la stessa energia che possedeva in partenza dal Sole. La potenza disponibile decresce via via che aumenta la distanza dal Sole, e dopo aver percorso i circa 150 milioni di km che separano la Terra dal Sole assume un valore molto più ridotto, di poco superiore ad $1,35 \text{ kW/m}^2$. Questo valore prende il nome di COSTANTE SOLARE e più precisamente è da assumere pari a $1,367 \text{ kW/m}^2$. La costante solare è da intendersi come un valore medio di riferimento, perché la potenza che raggiunge la fascia esterna dell'atmosfera terrestre in realtà oscilla, principalmente a causa della variazione periodica della distanza Terra - Sole. Infatti la Terra ruota attorno al Sole compiendo un moto detto di rivoluzione e, allo stesso tempo, ruota su se stessa. Il moto di rivoluzione fa sì che la Terra descriva attorno al Sole un'orbita ellittica e di conseguenza la distanza tra i due corpi celesti varia periodicamente nel corso dell'anno. I punti estremi di quest'orbita sono: afelio e perielio. Il range di oscillazione della costante solare è del 3%, con un valore massimo in inverno e un valore minimo in estate.

Assomiglia tanto ad una contraddizione il fatto che fa caldo quando siamo più distanti dal Sole, ma tutto dipende dall'incidenza dei raggi solari che sono più gravose per noi proprio nei mesi di giugno e luglio.

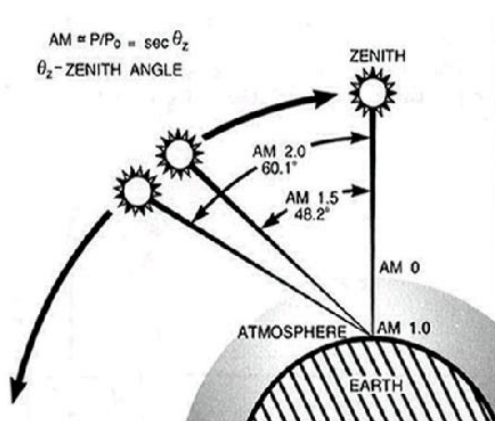
Quando parliamo di costante solare dobbiamo sempre immaginarci un valore medio riferito al di sopra dell'atmosfera terrestre. Infatti l'energia disponibile sul suolo della Terra o al livello del mare è minore a causa dell'assorbimento e riflessione che la radiazione subisce attraversando l'atmosfera.



Per tenere conto dei fenomeni di assorbimento è stata definita a livello internazionale la massa d'aria unitaria AM1 (Air Mass 1) intesa come lo spessore di atmosfera standard attraversato dai raggi solari in direzione perpendicolare alla superficie terrestre e misurato al livello del mare.

Alle latitudini europee è comunque spesso necessario far riferimento a spettri di radiazione ancora più attenuati rispetto all'AM1: AM1,5 , AM2 o anche maggiori a seconda dei casi, per tenere conto del percorso di attraversamento della radiazione dell'atmosfera dovuto alla più o meno pronunciata deviazione dei raggi solari rispetto lo zenit.

Viceversa se ci si trovasse in quota a latitudini tropicali lo spettro AM1 potrebbe, in alcuni casi, risultare eccessivamente attenuato rispetto alla radiazione realmente incidente.



In Figura 4 è visibile la rappresentazione geometrica dei percorsi di attraversamento dell'atmosfera da parte della radiazione solare nelle tre differenti condizioni AM1, AM1,5 e AM2.

Si tratta di una rappresentazione semplificata, in quanto l'atmosfera terrestre non è omogenea, sia come densità che come composizione, e inoltre non si tiene conto della rifrazione sulla radiazione solare dovuta ai diversi componenti facenti parte della massa gassosa.

La curvatura della superficie terrestre non costituisce invece un problema perché lo spessore medio dell'atmosfera è molto inferiore al raggio medio del nostro Pianeta.

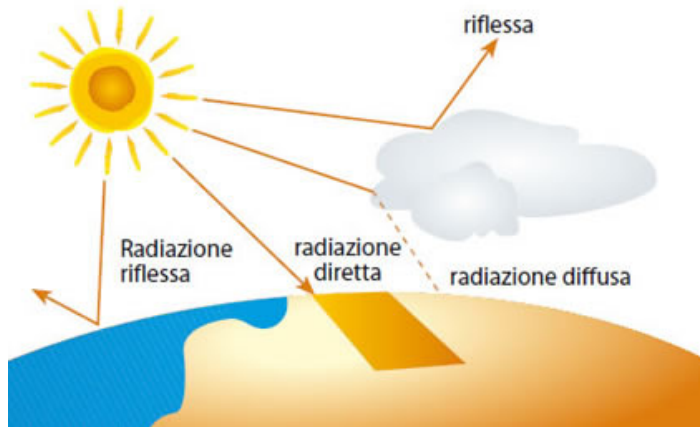
La curva AM0, corrisponde alla radiazione solare misurata al di fuori della atmosfera terrestre, risulta invece essere assai simile allo spettro di emissione di un corpo nero portato alla temperatura di 5760 .

Tuttavia al fine di stabilire delle condizioni di prova standard in laboratorio per i componenti fotovoltaici, la norma CEI EN 60904-3 (CEI 82-3) considera la curva AM 1,5 come radiazione solare standard di riferimento.

Nelle norme come nella pratica impiantistica di progettazione, il valore di massima radiazione al suolo viene assunto pari a 1000 .

Il valore di radiazione solare globale che giunge sul suolo terrestre è distinto in tre componenti:

- *Diretta*: La radiazione diretta colpisce una qualsiasi superficie con un determinato angolo di incidenza. Questa risulta essere addirittura dieci volte maggiore della radiazione diffusa quando il Sole è esattamente sulla verticale.
- *Diffusa*: Quella diffusa, invece, incide su tale superficie con vari angoli. Anche se in minima quantità, contribuisce lo stesso al funzionamento dei pannelli fotovoltaici (basti pensare ai giorni nuvolosi dove addirittura la diffusa supera di intensità la diretta). Possiamo avere un caso in cui i contributi delle due radiazioni citate sono uguali, e questo avviene solamente quando il Sole è vicino all'orizzonte.
- *Riflessa*: I pannelli fotovoltaici possono ricevere anche il contributo della radiazione riflessa dal terreno, qualsiasi specchi d'acqua o pareti di edifici vicini. In particolare questo contributo viene chiamato Albedo e deve essere valutato con attenzione.



La misura della radiazione solare globale orizzontale, si effettua mediante uno strumento, detto pirometro o più comunemente solarimetro. Lo strumento misura l'energia associata alle componenti verticali della radiazione incidente nell'unità di tempo ed è sensibile alle frequenze visibili della radiazione solare ed al vicino infrarosso. L'intensità della radiazione globale o potenza specifica è espressa in W/m^2 . Tipicamente i valori di potenza specifica orizzontale possono arrivare in Italia, al livello del mare, durante una bella giornata estiva di sole, a 900/1100 W/m^2 .

Inclinando poi lo strumento ad un angolo fisso rispetto al piano orizzontale è possibile misurare la radiazione solare globale su un piano inclinato che, risulta uno dei dati fondamentali per la progettazione solare.

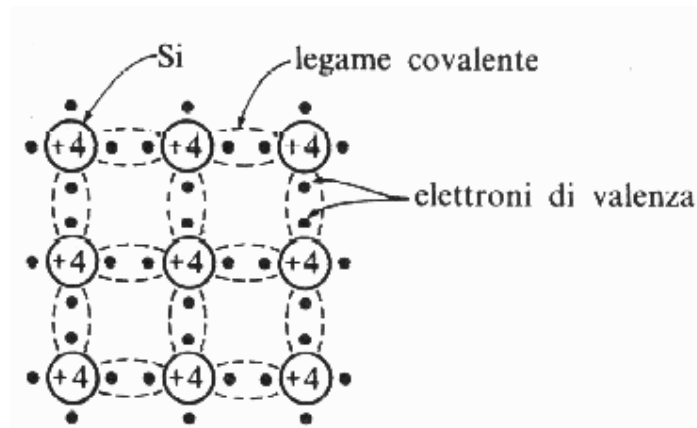
CAPITOLO 2

Effetto fotovoltaico

2.1.Semiconduttori

La conversione alla radiazione solare in energia elettrica avviene sfruttando l'effetto indotto da un flusso luminoso che investe un materiale semiconduttore (per esempio il silicio) quando quest'ultimo incorpora su un lato atomi di drogante di tipo P e sull'altro atomi di drogante di tipo N.

Consideriamo il reticolo cristallino del silicio in Figura 6, nel quale ciascun atomo è circondato da altri quattro e nel quale ognuno di essi mette in comune uno dei suoi quattro elettroni di valenza, appartenenti alle orbite più esterne. In questo modo gli è possibile completare l'ottetto esterno e rendere quindi stabile la configurazione (nella realtà essendo lo spazio 3D avremo una forma tetraedrica anziché la quadrata utilizzata per la rappresentazione sul piano). Gli elettroni appartenenti alle orbite più interne sono invece fortemente legati al nucleo e pertanto non entrano in gioco nei legami con gli altri atomi e nella conduzione elettrica.



In un cristallo di questo tipo, detto intrinseco, gli elettroni, vincolati nei legami covalenti con gli altri atomi, si trovano tutti nello stesso livello energetico che appartiene alla banda di valenza e, a meno che non intervengano fattori esterni, non dispongono dell'energia sufficiente per passare alla banda di conduzione.

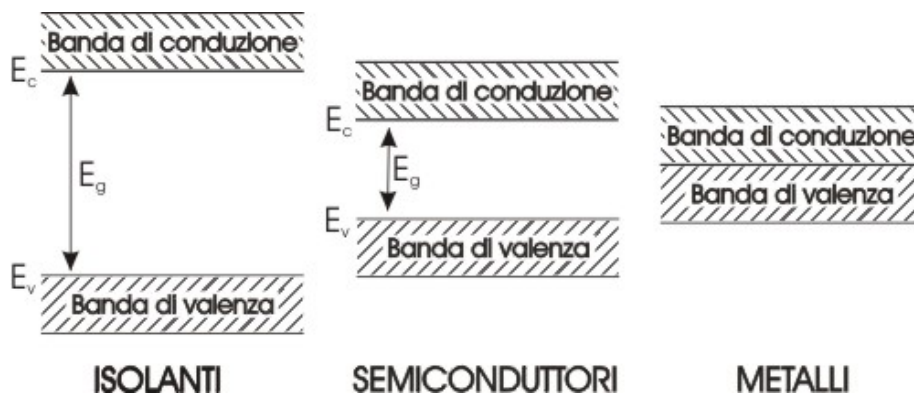
La formazione delle bande di valenza e di conduzione derivano dal fenomeno quantistico enunciato da Pauli che prende il nome di "Principio di esclusione". Secondo questo principio due elettroni non possono avere il medesimo set di numeri quantici.

Tuttavia, in un reticolo, l'effetto della vicinanza di un gran numero di atomi uguali fa sì che

dalla struttura a livelli si passi ad una struttura a bande di energia, nella quale l'elettrone è libero di occupare un qualsiasi livello energetico all'interno della stessa banda.

Un elettrone per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione ha bisogno di una certa quantità di energia che prende il nome di "Energy gap" (E_g), che nel silicio vale circa 1,12 a temperatura ambiente, questa energia può essergli fornita sotto forma di energia fotoelettrica o termica.

Quando ciò si verifica, l'elettrone, passando alla banda di conduzione è libero di muoversi nel reticolo, fino alla sua ricombinazione, esattamente come nei metalli.



I materiali semiconduttori come il silicio sono caratterizzati quindi dall'aver le bande di conduzione e valenza separate; tuttavia ogni elettrone che passa dalla banda di valenza alla banda di conduzione lascia dietro di sé una lacuna, la quale è in grado di muoversi sotto l'effetto di un campo elettrico comportandosi come una carica positiva.

In conclusione in un reticolo di un cristallo semiconduttore la conduzione elettrica può avvenire a seguito del movimento di elettroni e lacune rispettivamente in banda di conduzione e banda di valenza.

Per migliorare le proprietà elettriche di un semiconduttore vengono effettuate delle operazioni di drogaggio, ovvero l'inserimento di atomi differenti nel reticolo cristallino, questa operazione non può essere effettuata oltre una certa misura, al fine di non interferire troppo con la geometria del cristallo.

Il drogaggio sarà di tipo P se verranno introdotti degli atomi accettori (es. Boro) ovvero creeranno all'interno del reticolo un eccesso di lacune, al contrario con un drogaggio di tipo N (es. Fosforo) all'interno del reticolo di creerà un eccesso di elettroni.

La conduzione elettrica dei due tipi di cristallo è sostanzialmente differente: mentre nel silicio

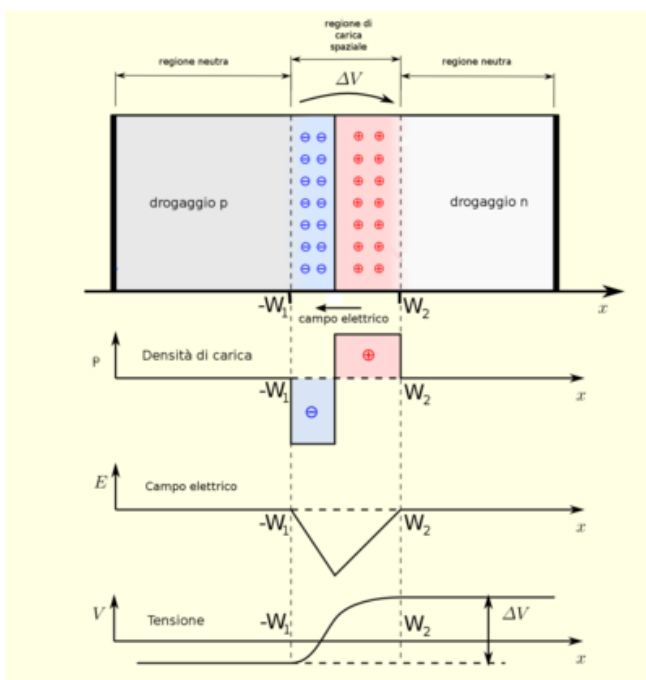
P la conduzione avviene per effetto dello spostamento delle lacune nella banda di valenza, nel silicio di tipo N il moto delle cariche è dovuto all'eccesso di elettroni passati in banda di conduzione. Poiché a temperatura ambiente tutti questi elettroni possono essere considerati già presenti nella banda di conduzione possiamo dire che tutti gli atomi donatori concorrono alla conduzione elettrica in modo analogo a quanto avviene nei metalli.

2.2. Giunzione P-N

Se poniamo a contatto due cristalli di silicio uno di tipo P e uno di tipo N otteniamo una giunzione di tipo P-N.

La giunzione P-N possiede alcune interessanti proprietà che vengono sfruttate nell'elettronica moderna.

Per diffusione, le lacune presenti nel cristallo di tipo P tenderanno a spostarsi in quello di tipo N, mentre gli elettroni tenderanno a diffondere nel materiale di tipo P.



Tuttavia questo fenomeno non continua all'infinito (poiché la giunzione sparirebbe) ma durerà fintantoché il potenziale elettrico generato dallo spostamento di cariche non diventa tale da controbilanciare il moto di diffusione.

In particolare, si forma un sottile strato neutro chiamato regione di svuotamento (depletion

layer) laddove un drogaggio di tipo P si abbina ad un drogaggio di tipo N. I semiconduttori drogati (sia di tipo N che di tipo P) sono conduttori tanto migliori quanto più elevato è il drogaggio mentre la regione di svuotamento ha le proprietà di un isolante.

Le giunzioni P-N sono comunemente usate come diodi (dispositivi elettronici che permettono un flusso di corrente in una direzione ma non in quella opposta) ma nello stesso tempo costituiscono anche una cella fotovoltaica. Questo risultato può essere ottenuto incrementando o riducendo l'estensione dello strato non conduttivo (la zona svuotata) grazie agli effetti della polarizzazione inversa e di quella diretta, dove il termine polarizzazione indica l'applicazione di una tensione elettrica alla giunzione.

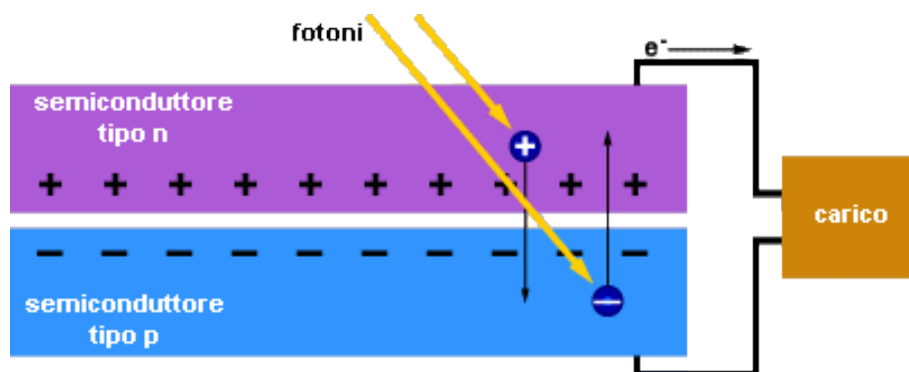
La tensione esterna infatti ne influenza la dimensione, richiamando un maggiore o minore numero di portatori; a seconda della densità di portatori disponibili, e quindi del tipo di semiconduttore scelto e del tipo di drogaggio con il quale è stato prodotto, sarà possibile variare con un ulteriore grado di libertà l'estensione della regione di svuotamento.

Si osserva che il passaggio di corrente elettrica avverrà quando il potenziale applicato (positivo lato P negativo lato N) sia in grado di annullare il potenziale elettrico interno, al contrario se viene applicato un potenziale negativo (negativo sul lato P e positivo sul lato N) avremo che il potenziale elettrico interno si somma con quello esterno non consentendo il passaggio della corrente.

2.3. Conversione fotovoltaica

Il potenziale elettrico all'interno della giunzione P-N, unitamente alla radiazione luminosa che investe il cristallo, sono alla base della generazione di corrente nella cella fotovoltaica.

Consideriamo quindi una giunzione colpita da un flusso luminoso come in figura 9.



L'energia associata a tale flusso è in grado di liberare un certo numero di coppie elettroni/lacuna negli atomi di silicio che intercettano i fotoni con energia sufficiente.

Tale energia dipende unicamente dalla frequenza della radiazione, sulla base della

relazione:

in cui ν rappresenta la frequenza e h la costante di Planck.

Le coppie cariche così generate risentono del potenziale elettrico interno alla giunzione e si muovono di conseguenza, per cui gli elettroni generati nella giunzione P sono attirati verso N, mentre le lacune generate nella giunzione N sono attratte verso P.

La cella fotovoltaica si comporta come un generatore con il polo positivo su P e quello negativo sulla giunzione N.

Tra frequenza e lunghezza d'onda esiste la relazione .

Utilizzando come semiconduttore il silicio, l'energia necessaria a liberare una coppia elettrone-lacuna corrisponde ad una lunghezza massima radiazione luminosa 1,15 μm .

Tuttavia, al diminuire della lunghezza d'onda, ai fotoni, risulta associata un'energia sempre maggiore, ma in eccesso rispetto a quella richiesta.

La parte eccedente costituisce un surplus che va inevitabilmente perduto, ossia trasformato in calore.

CAPITOLO 3

Celle fotovoltaiche

3.1.Funzionamento

Come descritto precedentemente la conversione della radiazione solare in una corrente di elettroni avviene nella cella fotovoltaica.

Il dispositivo è costituito da una sottile fetta di materiale semiconduttore, molto spesso silicio, opportunamente trattata. Tale trattamento è caratterizzato da diversi processi chimici, tra i quali si hanno i cosiddetti “drogaggi”.

Inserendo nella struttura cristallina del silicio delle impurità, cioè atomi di boro e fosforo, si genera un campo elettrico e si rendono anche disponibili le cariche necessarie alla formazione della corrente elettrica. Questa si crea quando la cella, le cui due facce sono collegate ad un utilizzatore, è esposta alla luce. L'energia che si può poi sfruttare dipende dalle caratteristiche del materiale di cui è costituita la cella: l'efficienza di conversione (percentuale di energia contenuta nelle radiazioni solari che viene trasformata in energia elettrica disponibile ai morsetti) per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 13% e il 20 %, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 32,5 %.

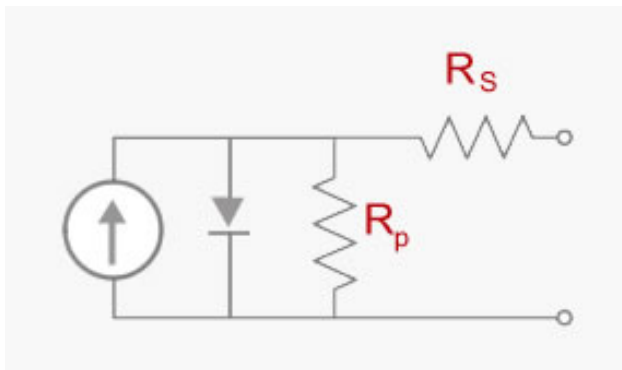
In pratica la tipica cella fotovoltaica ha uno spessore complessivo compreso tra 0,25 e 0,35 ed è costituita da silicio mono o multicristallino. Essa, generalmente di forma quadrata, misura solitamente 125x125 e produce, con un irraggiamento di 1 ad una temperatura di 25 , una corrente compresa tra i 3 e i 4 e una tensione di circa 0,5 con una potenza corrispondente di 2

Poiché la potenza di una cella fotovoltaica varia al variare della sua temperatura e della radiazione, per poter fare dei confronti sono state definite delle condizioni standard alle quali fa riferimento il cosiddetto watt di picco (P_{max}), relativo alla potenza fornita dalla cella alla temperatura di 25 sotto una radiazione di 1.000 e in condizioni di AM1,5.

Il rendimento delle celle fotovoltaiche in silicio, non seguono un andamento teorico in quanto intervengono delle inefficienze tra le quali:

- non tutti i fotoni incidenti sulla cella fotovoltaica penetrano all'interno, alcuni vengono riflessi e altri intercettati dall'elettrodo frontale;
- alcune coppie elettrone-lacuna si ricombinano prima che queste possano essere separate dal campo elettrico interno alla giunzione (dipendono dal grado di purezza del silicio);
- parte dell'energia potenziale delle coppie elettrone-lacuna che vengono separate risulta inefficace ai fini della conversione in energia elettrica e viene persa;

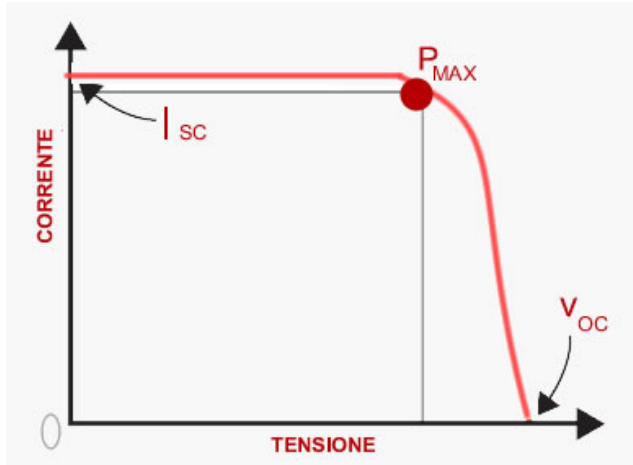
- dal circuito equivalente della cella in Figura 10 si nota l'esistenza della resistenza dovuta principalmente alla particolare realizzazione dell'elettrodo superiore della cella che deve mediare tra l'esigenza di realizzare un buon contatto ed oscurare il meno possibile la superficie della cella esposta alla luce;
- la resistenza , detta resistenza di shunt, è un parametro chiave nelle prestazioni della cella in condizioni di debole irraggiamento tipiche delle aree europee di esposizione. Il suo valore è molto importante in quanto condiziona pesantemente l'efficienza del modulo in cui la cella viene inserita. Recenti studi hanno dimostrato che resistenze di shunt inferiori a 20/30 sono responsabili di perdite di energia captata del 10% e che un mix di celle a varie resistenze di shunt (tipicamente moduli con celle poco selezionate) sono governate dalla cella a più bassa. Purtroppo, questo dato così importante è conosciuto solo dai costruttori di celle e moduli fotovoltaici e non viene evidenziato all'acquirente.



Inoltre dalla caratteristica elettrica di una cella fotovoltaica di silicio cristallino riportata in Figura 11 si può osservare che:

- la condizione di lavoro ottimale della cella è rappresentata dal punto della caratteristica di generazione tensione-corrente in corrispondenza del quale il prodotto P_{max} , che esprime la potenza elettrica ottenibile a parità di altre condizioni, risulta massimo ($P_{max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF$). Il rapporto tra P_{max} e ($P_{oc} = V_{oc} \cdot I_{sc}$, prodotto dalla corrente di cortocircuito e dalla tensione a vuoto), viene detto "fill-factor" o fattore di riempimento della cella. Quest'ultimo assume valori che si aggirano intorno a 0.75/0.80. Il fill-factor è anche un parametro di giudizio sul rendimento della cella; elevati valori di esso sono solitamente indicatori di migliori prestazioni.
- la corrente di cortocircuito I_{sc} risulta di poco superiore alla corrente al punto di massima potenza I_{mp} .

potenza : ne segue la evidente difficoltà nell'uso di un dispositivo elettromeccanico di interruzione automatica della corrente che, proprio per limitato valore di , risulterebbe più comodo che utile;



All'aumentare della temperatura, la curva tensione-corrente della cella fotovoltaica si modifica facendo registrare una diminuzione della tensione a vuoto in ragione di circa 2,3 e, congiuntamente, un aumento della corrente di cortocircuito pari a circa lo 0,2 .

Queste variazioni possono essere prese come riferimento nell'intervallo di temperatura 0/60. I due fenomeni, benché di segno opposto, si traducono in pratica in una diminuzione della potenza resa, al punto di massima potenza valutabile, intorno al 6/7% per ogni aumento di 10 della temperatura delle celle.

3.2. Tipologie di celle

La maggior parte delle celle fotovoltaiche attualmente in commercio è costituita da

semiconduttori in silicio. La ragione di questa scelta è principalmente dovuta al fatto che il silicio, a differenza di altri elementi semiconduttori, è disponibile sul nostro pianeta in quantità pressoché illimitata e, oltretutto, è largamente utilizzato dall'industria elettronica che, con la rapidissima espansione degli ultimi decenni, ha agevolato lo sviluppo di attuali metodi di raffinazione, lavorazione e drogaggio. Inoltre, gli scarti della lavorazione dei componenti elettronici possono essere riciclati dall'industria fotovoltaica che tollera maggiori concentrazioni di impurità.

3.2.1.Celle fotovoltaiche in silicio monocristallino e policristallino

Le celle fotovoltaiche in silicio monocristallino hanno un grado di purezza più elevato rispetto alle celle in policristallino ed hanno un'efficienza maggiore che va dal 14 al 18%, ed è per questo che risultano più costose.

Inoltre il silicio monocristallino è utilizzato anche nell'industria elettronica, come precedentemente detto, e questa circostanza ne fa lievitare ulteriormente il prezzo.

Generalmente le celle fotovoltaiche hanno forma circolare con diametro di 10-12 cm o ottagonale, ed uno spessore che varia tra i 0,2 - 0,3 , sono di colore blu scuro e uniforme.

Hanno un'affidabilità garantita dalle aziende produttrici per oltre 25 anni, anche se la loro vita media può superare anche i 30 anni.

Le principali applicazioni riguardano gli impianti fotovoltaici isolati (stand-alone) in particolare in condizioni climatiche poco favorevoli, in quanto le celle presentano un'elevata efficienza con una superficie captante piccola. Altre applicazioni riguardano l'alimentazione di impianti di pompaggio acqua o l'uso combinato con sistemi solari termici.

La cella è ottenuta immergendo per pochi millimetri un seme monocristallino di silicio in un crogiolo in cui vi è silicio puro fuso. Gli atomi di silicio fuso, a contatto con il seme monocristallino introdotto si orientano secondo il reticolo atomico della struttura del silicio. Il silicio fuso viene mantenuto ad una temperatura leggermente superiore a quella di fusione.

A questo punto si procede molto lentamente a sollevare il seme monocristallino, estraendolo dal crogiolo. Il silicio fuso aderente al seme si solidifica molto rapidamente conservando la struttura monocristallina del seme.

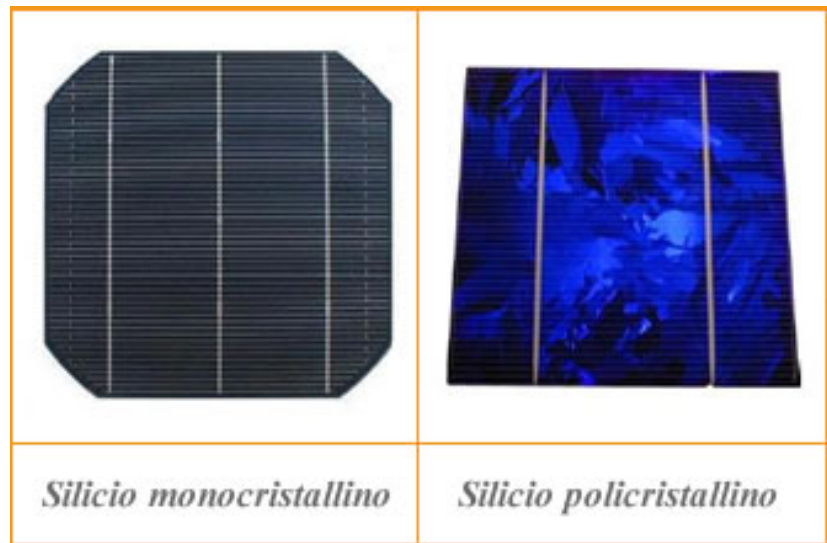
Mediante un controllo rigoroso della temperatura del materiale fuso, dell'atmosfera nella camera, e della velocità di estrazione, ed evitando ogni tipo di vibrazione, è possibile ottenere dei lingotti omogenei di forma cilindrica con un diametro di circa 13 - 20 e lunghezza che può raggiungere i 200 .

Il passo successivo consiste nel drogare la cella con atomi di boro.

Il fuso viene poi tagliato mediante un disco diamantato in sottili fettine chiamate wafer con spessore è di circa 250 - 350 , le quali costituiranno il supporto (substrato). I wafer vengono poi puliti mediante un attacco di soda.

Si realizzano poi le giunzioni P-N dopo aver effettuato il drogaggio con atomi di fosforo.

Infine si applica un sottile strato antiriflesso e si realizzano per serigrafia i contatti elettrici anteriori (griglia metallica) e posteriori (superficie continua metallica).



Le celle fotovoltaiche in silicio policristallino hanno un'efficienza che va dal 12 al 14 %, quindi un po' più basso rispetto le celle in silicio monocristallino. In proporzione anche il costo risulta però più basso.

Si realizzano riciclando componenti elettronici scartati, ossia il cosiddetto "scrap di silicio" il quale viene rifuso per ottenere una composizione cristallina compatta.

Questi scarti di silicio vengono fusi all'interno di un crogiolo in modo da creare un composto omogeneo che poi viene raffreddato in modo tale da generare una cristallizzazione che si sviluppa in verticale. Si ottiene così un pane di circa 150-200 che poi viene tagliato verticalmente in lingotti di forma parallelepipedica. Con un altro taglio, questa volta orizzontale, si ricavano delle fette di spessore simile ai wafer del monocristallo.

Anche in questo caso i wafer vengono puliti con un attacco in soda, e poi drogati con il fosforo per la realizzazione delle giunzioni P-N, si applica un sottile strato antiriflesso e si realizzano per serigrafia o elettrodeposizione i contatti elettrici anteriori (griglia metallica) e posteriori (superficie continua metallica).

3.2.2.Celle fotovoltaiche a film sottile (di 2° generazione)

Celle fotovoltaiche in silicio amorfo

Un'alternativa alla tecnologia del silicio cristallino è rappresentata dal silicio amorfo. La produzione di silicio amorfo si realizza mediante un processo di deposizione di uno strato di 1-2 nm di silicio cristallino su di una superficie di vetro o plastica. Non si dovrebbe parlare più di celle in quanto possono essere ricoperte superfici anche consistenti in modo continuo.

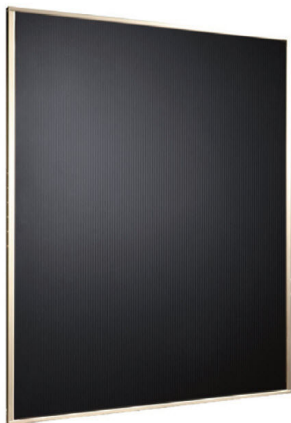
Questo tipo di tecnologia presenta un'efficienza inferiore rispetto a quella del cristallino, che va dal 5 al 6.8%..

Nel caso del silicio amorfo il rendimento subisce già nei primi anni un calo di resa di circa il 20%, per poi stabilizzarsi negli anni successivi. Al contrario il silicio cristallino subisce un periodico abbassamento delle prestazioni di circa l'1% annuo.

Esistono però alcuni aspetti interessanti nell'applicazione del silicio amorfo in sistemi fotovoltaici.

Ad esempio il fatto che lo spessore di silicio depositato sia molto ridotto permette un grande risparmio sul materiale inoltre è possibile riciclare il materiale di scarto della tecnologia cristallina. Questo si traduce in termini di costi molto competitivi.

Tuttavia il processo produttivo non ha ancora raggiunto una diffusione su vasta scala tale da permettere risultati economici interessanti.



Celle fotovoltaiche al telloruro di cadmio

Il telloruro di cadmio (CdTe) è un composto chimico cristallino e stabile, formato da Cadmio e Tellurio. In considerazione del fatto che si tratta di un semi-conduttore, il telloruro di cadmio è utilizzato, per lo più, per la produzione di celle solari, ha infatti caratteristiche simili all'arseniuro di gallio (un altro semi-conduttore inorganico) e al silicio, ma

con costi decisamente ridotti.

Cadmio e tellurio sono, infatti, considerati materiali di scarto, derivanti dall'estrazione di minerali non ferrosi e la quantità di materiale utilizzato è 100 volte inferiore.

La cella solare in è composta da 4 parti:

1. Il contatto frontale (diverse possibilità di ossidi);
2. Il materiale finestra (= Solfuro di Cadmio) che rappresenta la parte N della giunzione;
3. Il materiale assorbitore (), la parte P della giunzione;
4. il contatto posteriore (un metallo tipo il rame).

I costi contenuti hanno ovviamente determinato, per questo tipo di pannelli fotovoltaici, un bacino di utenza molto vasto.

A questo, si aggiungono, del resto, almeno altri fattori:

- Le celle solari al tellururo di cadmio hanno una migliore capacità di assorbire la luce, rispetto a quelli al silicio, ad esempio, si comportano meglio anche in condizioni di scarsa luminosità, mentre in condizioni "normali" rispondono meglio all'esposizione diretta alla luce del sole e alle temperature elevate.
- I tempi di realizzazione dei pannelli, una volta opportunamente ottimizzati e automatizzati, si riducono a un minuto a modulo.
- Il tellururo di cadmio, opportunamente trattato, si rivela particolarmente stabile, durante l'arco di alcuni decenni. Il tempo di ritorno energetico è, inoltre, più breve rispetto a quello di altre tecnologie fotovoltaiche.
- Infine, tra queste, è anche quello con l'impronta di carbonio più bassa.

Stando a questi vantaggi, non sorprende che colossi del mondo del fotovoltaico si dimostrino particolarmente interessati a questo particolare settore, implementandone notevolmente la ricerca.

Così l'americana First Solar, leader nella progettazione e realizzazione di moduli e pannelli solari, ha annunciato di aver realizzato in laboratorio celle solari al tellururo di cadmio con un'efficienza del 20,4 %.

Celle fotovoltaiche calcopiritiche tipo CIS e CIGS

La nomenclatura calcopirite deriva dal materiale che genericamente indica composti chimici del tipo ma che di per se non ha alcuna proprietà fotovoltaica.

Una qualsiasi combinazione degli elementi:

A= Rame, Argento, Oro

B= alluminio, Gallio, Indio

C= zolfo, selenio, telloruro

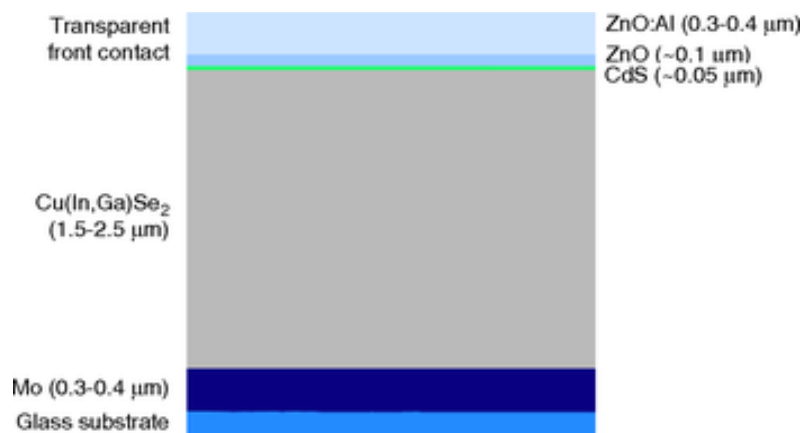
da origine ad un composto che presenta un effetto fotovoltaico.

Attualmente, le combinazioni più interessanti sono la base (CIS) e la mista (CIGS).

Nel corso del 2008 al NREL è stato sviluppato un film sottile CIGS al 19.9% di efficienza che rappresenta il valore record registrato su una cella di piccole dimensioni. La struttura di una cella calcopirite consiste in un multistrati elementi depositi su un substrato che può essere rigido o flessibile.

La struttura della cella ricalca quella di tipo prima descritta:

- Il contatto frontale trasparente (tipicamente un ossido, es.);
- la giunzione, creata depositando un strato di materiale semiconduttore (in genere);
- l'assorbitore (il composto calcopirite selezionato);
- il contatto posteriore non trasparente (in genere, molibdeno).



3.2.3.Celle fotovoltaiche di 3° generazione

La tecnologia è giunta alla 3° generazione di sviluppo mirato alla semplificazione del processo produttivo ed alla sua economicità. Con la terza generazione entrano in scena i materiali a base chimico-organica, permettendo di sfruttare i vantaggi della sintesi organica legati alla disponibilità di materiale per uso fotovoltaico in grandi quantità e con processi di produzione già collaudati ed efficienti in altri ambiti.

Tra gli esempi principali di questo nuovo filone di sviluppo tecnologico troviamo le celle organiche e le celle Gratzel.

Celle organiche (OPV- organic photovoltaic)

Nelle celle organiche OPV tutti i materiali attivi sono di base organica che hanno già trovato incredibile applicazione in altri settori tra cui i cristalli liquidi, LED organici che hanno animato il mercato dell'elettronica di massa come il caso degli schermi piatti per TV, monitor e cellulari.

Mentre nelle celle tradizionali le tre funzioni di assorbimento della luce, generazione delle cariche di trasporto degli elettroni sono coperte da un solo materiale (il silicio), nelle celle organiche troviamo una coppia di materiali con funzioni separate ed ottimizzate per assolvere le funzioni in modo analogo a quanto succede nella clorofilla.

La prima cella organica risale a 1986 ed aveva un'efficienza dell'1%. Attualmente le migliori prestazioni si aggirano intorno al 6%. Le celle organiche possono essere realizzate in forma di film sottili flessibili di ottimo rapporto energia/peso ed hanno il vantaggio di essere riciclabili al 100%. Una volta raggiunta la maturità tecnologica, un uso adatto potrebbe essere quello di integrazione in semitrasparenza nelle superfici vetrate degli edifici, integrate nelle carrozzerie delle automobili o addirittura nei vestiti.

Concentratori solari a luminescenza

Esistono materiali in grado di emettere luce grazie a fenomeni fisici completamente diversi dall'aumento della temperatura: sono materiali in grado di assorbire un livello di energia restituendola in forma di fotoni ad energia inferiore (luminescenza).

Secondo la natura dell'energia eccitante si hanno diversi tipi di luminescenza:

- chemiluminescenza, causata da reazioni chimiche come avviene per le lucciole;
- elettroluminescenza, causata da un campo elettrico come i LED;
- fotoluminescenza, quando c'è una conversione dell'energia ad energia più bassa visibile come negli evidenziatori (fluorescenza)

Su questo ultimo effetto si basano i concentratori solari a luminescenza composti in genere di tre lastre rettangolari di vetro o materiale polimerico, colorato con tinte fluorescenti che agiscono da diffusore, parte dello spettro della luce incidente viene assorbito e rimesso concentrato all'interno della lastra. A seconda della geometria della lastra e dal suo indice di rifrazione la lastra agisce "guidando" una parte della luce incidente verso i bordi dove è possibile porre le celle fotovoltaiche riducendo così la quantità di materiale.

Nei concentratori a luminescenza il rapporto di concentrazione si misura nel rapporto tra la superficie ricevente a quella dei bordi.

Al Centro Europeo di Ispra (Varese) sono state raggiunte su prototipi di LSC efficienze del 7% su un concentratore costituito da una lastra di 5x5x0,5 di polimetilacrilato (PMMA) con 4 celle all'Arseniuro di Gallio.

Gli aspetti interessanti di questa tecnologia sono legati alla ridotta quantità di materiale attivo fotovoltaico necessario, al basso costo della lastra guida ma soprattutto il fatto che riescano a lavorare anche con la parte di radiazione diffusa non sfruttabile dai concertatori tradizionali e non necessitano di accoppiare a sistemi di inseguimento.

L'utilizzo migliore potrà essere quindi dove la parte diffusa della radiazione solare risulta importante (nord Europa) ed in sostituzione dei vetri in posa verticale così visti come dei veri e propri concertatori domestici.

Celle di Gratzel

Come funzionamento è completamente diversa da una cella fotovoltaica in silicio, infatti la separazione delle cariche (elettroni e lacune) e l'assorbimento della luce sono adesso due cose distinte

1. *Assorbimento della luce*: Funziona per effetto di un colorante chimicamente legato alla superficie di uno strato di particelle di biossido di titanio (TiO_2) interconnesse tra loro e depositate su un vetro trasparente e conduttore (queste particelle vengono chiamate anche nanocristalli).
2. *Separazione*: Quando il tutto viene colpito dalla luce, accade che un elettrone si stacca dal colorante e va al biossido di titanio che a sua volta lo trasporta fino all'elettrodo (vetro conduttore). Nel frattempo, la buca che si viene a creare nel colorante viene trasferita fino all'altro elettrodo grazie ad un composto mediatore. In pratica il composto mediatore si ossida cedendo così un elettrone che trasporta poi la buca.

Esaminando il principio di funzionamento di questa cella, i processi che vengono messi in atto ricordano molto la fotosintesi clorofilliana e questo paragone fornisce un concreto esempio dell'importanza della relazione tra principi chimici e fisici. Nella fotosintesi, le piante "fissano" l'energia della luce solare in legami chimici presenti in molecole organiche complesse, i carboidrati che assunti e bruciati da piante e animali, rilasciano nell'atmosfera biossido di carbonio completando quel ciclo, reversibile e rinnovabile, che sta alla base della

vita sulla terra:

Tornando alla cella di Graetzel, abbiamo detto che usa: un colorante organico analogo alla clorofilla per assorbire la luce e poi produrre elettroni, e più strati per aiutare l'assorbimento e la raccolta degli elettroni. Di seguito vengono riportati i passaggi per poterla realizzare in laboratorio. Su un vetrino conduttore bisogna disporre le particelle nanometriche di lasciando poi il tutto ad asciugare, e in seguito messo in forno ad elevate temperature per rendere stabile la pasta. La superficie risultante sarà porosa e questo serve per poi avere più superficie atta ad assorbire la luce solare. Uno strato di molecole di colorante viene quindi legato a ciascuna particella di immergendovi il vetrino. Possono essere utilizzati tutti quei coloranti che posseggono i giusti gruppi chimici per legarsi al . Il dispositivo viene infine completato gocciolando una soluzione elettrolitica che penetra all'interno dei pori dell'ossido. Lo spessore risulta così fine che tutti gli elettroni prodotti dal colorante vengono immediatamente raccolti dal . Gli elettroni perduti dalle molecole di colorante vengono velocemente rimpiazzati dal mediatore, lo ione iodio presente nella soluzione elettrolitica, il quale riceve a sua volta elettroni dal contro-elettrodo.

Le reazioni coinvolte nel processo sono:

-
-
-
-
- Le particelle interconnesse di biossido di titanio agiscono da accettori di elettroni, lo iodio agisce da donatore di elettroni e il colorante funziona come una "pompa" fotochimica: nella fotosintesi, questi tre ruoli sono svolti rispettivamente dal biossido di carbonio, dall'acqua e dalla clorofilla.
- Un ottimo vantaggio che ha questa tipologia di celle è quello di produrre elettricità anche se non c'è radiazione diretta, e quindi anche con giornate nuvolose. Di contro però ha dei difetti non indifferenti a partire dalla sensibilità alla temperatura del liquido elettrolita che rischia di congelare o fuoriuscire ad alte temperature. In ogni caso va a bloccare il funzionamento teorico della cella.

Il fotovoltaico organico risulta quindi flessibile, leggero e potenzialmente meno costoso delle tradizionali celle al silicio.

Lo svantaggio principale del fotovoltaico organico resta ancora nei coefficienti di conversione in energia elettrica, ancora bassi rispetto al silicio. Uno studio in Georgia (USA) tuttavia sta cominciando ad alzare le prestazioni arrivando ad aumentare l'efficienza di circa 3-4% con segnale che potrebbero arrivare al 5% nel prossimo futuro.

Sebbene le celle solari organiche non siano così efficienti le loro caratteristiche come flessibilità, peso, robustezza, costo li rende sempre più attraenti al mercato.

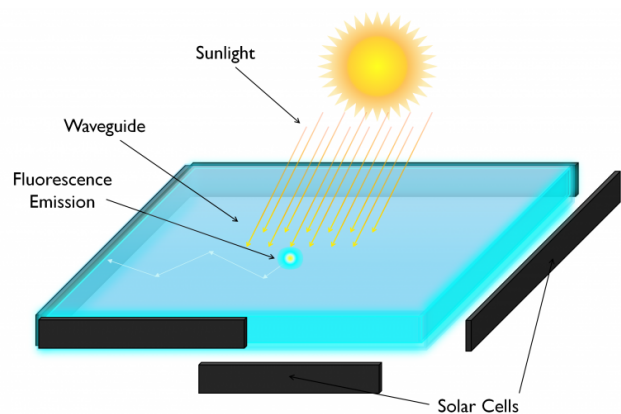
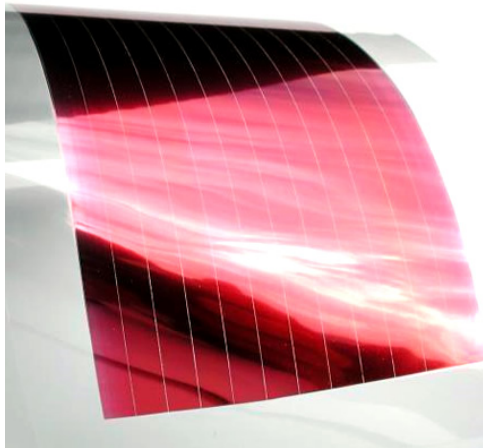
Le celle organiche possono essere facilmente applicate e incorporate in altri materiali come tessuto e plastiche per coperture, e l'ideale resta la loro applicazione nei piccoli dispositivi elettronici come cellulari, palmari, tutti quei dispositivi che richiedono poca energia, ma di grande utilizzo.

Potrebbe finire il tempo in cui si girava il mondo senza il petrolio, ma si portava con se un enorme carrello fotovoltaico in silicio per generare energia.

La società Konarka ha sviluppato la tecnologia Power Plastic che permette addirittura di stampare questi fogli fotovoltaici con un semplice click scegliendo le forme e la tipologia del foglio fotovoltaico che si vuole.

Il grosso vantaggio dei materiali fotovoltaici organici risiede nel fatto che questi possono essere depositati, su larghe aree e a costi molto ridotti, sia in soluzione liquida, come veri e propri inchiostri o paste, o attraverso semplici processi di evaporazione.

È possibile quindi usare metodi tipici dell'industria della stampa e applicarli nel campo del solare organico, riducendo così gli alti costi di materiale e di processo, tipici dell'industria dei semiconduttori convenzionali cristallini.



CAPITOLO 4

Moduli fotovoltaici

4.1. Tecnologia costruttiva

La gran parte dei moduli fotovoltaici in commercio per uso di impianti di potenza è costituita

da moduli in silicio cristallino; il rimanente, valutabile in circa il 10%, è coperto invece dalla tecnologia a film sottile. In realtà, il mercato della tecnologia a film sottile è più vasto se si includono le micro applicazioni del fotovoltaico come l'alimentazione delle calcolatrici, orologi, gadget solari dove solo l'amorfo può essere utilizzato per via di facilità con cui si riescono a costruire celle di bassissima potenza, flessibili e di peso estremamente contenuto. Si è osservato che le celle di silicio cristallino sono di fatto delle fette di semiconduttore opportunamente drogato con spessore di qualche centinaio di micron e dimensioni quadrate di 12-21 di lato.

L'assemblaggio di più celle una a fianco all'altra con i relativi collegamenti elettrici fino a formare il modulo fotovoltaico, non può che avvenire posando le celle su un supporto rigido (il vetro anteriore) a causa della fragilità dei sottili cristalli impiegati i quali, non sono in grado di assorbire sforzi meccanici o deformazioni senza danni.

Le celle a film sottile (amorfo, CIS,) sono, invece, formate per deposizione di una miscela di gas: possono così essere utilizzati differenti tipi di supporti, sia per formare moduli rigidi che moduli flessibili, arrivando a realizzare prodotti leggeri e deformabili utili specialmente per l'alimentazione di carichi mobili.

4.1.1. Struttura modulo in silicio cristallino

I moduli in silicio mono o poli-cristallini sono costruttivamente simili e prevedono che ogni cella fotovoltaica sia cablata in superficie con una griglia di materiale conduttore che ne canalizzi gli elettroni. Ogni cella viene connessa alle altre mediante nastri metallici, in modo da formare opportuni serie e paralleli elettrici. La necessità di silicio molto puro attraverso procedure di purificazione dell'ossido di silicio (, silice) presente in natura eleva il costo della cella fotovoltaica.

Il modulo fotovoltaico in silicio è costituito da un sandwich di materie prime detto laminato e dai materiali accessori atti a rendere usabile il laminato.

Il laminato viene preparato con i seguenti materiali:

1. Vetro (i moduli costruiti in Italia abitualmente usano vetro da 4 mm di spessore);
2. Etilene vinil acetato – EVA;
3. Celle mono o policristalline;
4. EVA (composto elastico utilizzato nei moduli fotovoltaici a protezione delle celle fotovoltaiche);
5. Backsheet o Tedlar (copertura di fondo)

Il vetro viene usato come base su cui viene steso un sottile foglio di EVA. Al di sopra dell'EVA vengono posizionate le celle rivolte con il lato fotosensibile verso il basso, viene steso un altro foglio di EVA e quindi un foglio di materiale plastico isolante (PET o similare) oppure un'altra lastra di vetro. Il vetro è a basso contenuto di ferro per garantire una maggiore trasparenza ai raggi solari ed è temperato. Un vetro di questo tipo lascia passare circa il 91,5% dell'irraggiamento ricevuto.

Il sandwich realizzato in questo modo viene inviato al laminatore, o forno. Questa è una macchina nella quale, dopo esser stato creato il vuoto in pochi minuti, una piastra, posta a contatto, viene riscaldata fino a 145 per circa dieci minuti, in modo da favorire la polimerizzazione dell'EVA. Trascorso questo tempo, il prodotto finito viene estratto ed inviato alle lavorazioni successive, avendo raggiunto le caratteristiche richieste dalla sua installazione.

Se la laminazione viene eseguita correttamente, il laminato è in grado di resistere alle intemperie per almeno 25-30 anni. Tutte le lavorazioni successive hanno lo scopo principale di rendere più comodo e pratico il suo utilizzo, incrementando, in realtà, di poco la resistenza nel tempo.



4.1.2. Struttura modulo a film sottile

A differenza del modulo cristallino, in questo caso, manca lo strato di EVA superiore in quanto le celle sono depositate direttamente su substrato. Il modulo in amorfo ha un aspetto molto gradevole in quanto si presenta come una superficie di colore uniforme marrone con riflessi rossastri: questa caratteristica lo ha reso particolarmente gradito a architetti e designer.

E' proprio per rafforzare questa peculiarità che negli ultimi anni si sono cercate più efficaci

soluzioni per eliminare l'uso della classica cassetta di terminazione sul retro a favore di soluzioni di miglior gusto estetico.

Sono state sperimentate soluzioni dedicate all'integrazione architettonica con gli elementi tipici dell'edilizia civile.

Dal punto di vista costruttivo, non esiste una regola fissa per la loro realizzazione: i costruttori tendono a ricopiare la forma degli elementi di fabbricazione edili esistenti, così da facilitare la sostituzione, totale o parziale, di questi ultimi con componenti fotovoltaici. Ad esempio sono state realizzate tegole fotovoltaiche di tipo marsigliese ed a coppo e anche tegole canadesi.

Non si tratta di singole tegole di piccole dimensioni, ma di strisce già formate in tegole preaccostate: si presentano costituite da una striscia plastica di supporto, sulla quale viene applicato in evidenza il materiale attivo.



4.2.Collegamenti elettrici

4.2.1.Collegamenti tra celle

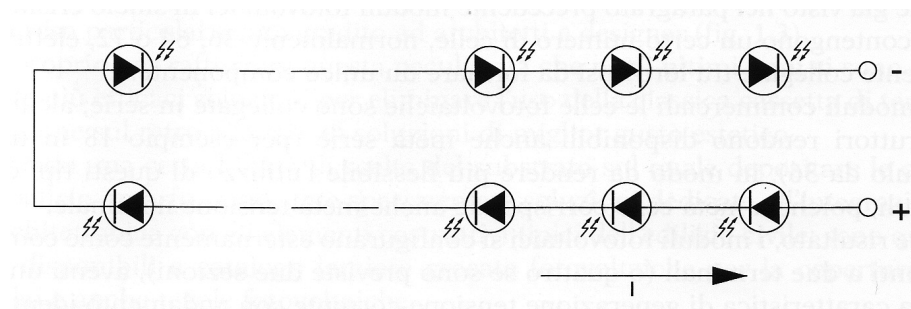
I moduli fotovoltaici in silicio cristallino contengono un certo numero di celle collegate elettricamente tra loro così da formare un unico componente.

Nei moduli commerciali le celle fotovoltaiche sono collegate in serie; in alcuni casi i costruttori rendono disponibili anche metà serie in maniera tale da rendere più flessibile

l'utilizzo di questi tipi di moduli, poiché a metà celle corrisponde metà tensione nominale.

I moduli fotovoltaici si configurano esternamente come componenti a due terminali (o a quattro se sono previste due sezioni), aventi una curva caratteristica di generazione tensione-corrente con andamento identico alle celle che lo compongono, con valori di tensioni proporzionali al numero di celle in serie.

Il collegamento avviene facendo uso di sottili bandelle metalliche elettrosaldate alle facce superiori e inferiori delle celle stesse: essendo le celle fotovoltaiche dei diodi semiconduttori, il loro collegamento in serie si traduce in un circuito equivalente come in Figura19, notiamo che qualora una cella venisse oscurata, quest'ultima cesserebbe di comportarsi da generatore funzionando quindi come un diodo polarizzato inversamente: questo comporterebbe il blocco della corrente generata azzerando così l'energia prodotta da tutta la catena, ossia dal modulo.



Nel caso che una cella fosse parzialmente oscurata, la corrente che attraversa il modulo risulta pari a quella che tale cella produrrebbe se presa singolarmente.

E' importante osservare che se in una serie costituita da molte celle ne viene ombreggiata una e, nel contempo, le terminazioni sono mantenute in cortocircuito o da una tensione molto bassa, si può verificare il fenomeno detto hot spot. La cella oscurata si trova polarizzata inversamente con una tensione molto vicina alla tensione a vuoto di tutta la serie formata dalle celle rimanenti ed esposta quindi al pericolo di entrare in conduzione inversa.

La cella si troverebbe a dovere dissipare la potenza generata dalle rimanenti celle del modulo, provocando un aumento di temperatura localizzato (hot spot) che può portare, anche con modesti valori di radiazione solare, alla distruzione della cella per sovratemperatura.

Per ovviare a questi problemi, molti moduli commerciali hanno montato nella morsettiera della cassetta di terminazione, dei diodi detti di by-pass proprio allo scopo di cortocircuitare e quindi isolare il singolo modulo in caso di malfunzionamento.

4.2.2.Cassetta di terminazione

La cassetta di terminazione è un contenitore a tenuta stagna, costruito normalmente in materiale plastico, fissato sul retro di un modulo fotovoltaico e contenente la morsettiera per il collegamento elettrico e i diodi di by-pass.

Essa si presenta come un contenitore plastico di colore nero con altezza di qualche centimetro e dimensioni di circa 10x15 , incollato al retro del modulo, e dotato di coperchio con viti, guarnizione di tenuta lungo il coperchio e con speciali connettori stagni che permettono un un collegamento più veloce tra i moduli stessi.

All'interno si trova la morsettiera che rende possibile le due polarità, ogni costruttore adotta, tuttavia, soluzioni personalizzate.

In alcuni casi la cassetta di terminazione viene sostituita da spezzoni di cavo isolato che hanno i terminali collegati alle bandelle ed annegati in una resina speciale che garantisce sia un franco collegamento che una buona resistenza meccanica.

In questi casi le bandelle non escono dal retro del modulo ma in corrispondenza del bordo del vetro. Questa soluzione non prevede diodi by-pass e pertanto, qualora il progettista ne valuti l'effettiva necessità, occorre predisporre opportuni cablaggi esterni da disegnare caso per caso.

4.2.3.Campo fotovoltaico

Il campo fotovoltaico é costituito da un insieme di moduli fotovoltaici collegati in serie e in parallelo tra di loro.

In caso di collegamento in serie dei moduli la corrente totale del modulo si "adeguа" a quella del modulo che genera meno corrente, mentre la tensione globale è data dalla somma delle tensioni dei singoli moduli fotovoltaici. Un insieme di pannelli solari fotovoltaici collegati in serie costituisce la cosiddetta "stringa".

Mettendo in parallelo più stringhe di moduli avremo che la corrente totale del campo fotovoltaico è data dalla somma della corrente in uscita da ogni stringa.

La tensione globale del sistema fotovoltaico è invece equivalente alla tensione generata da una singola stringa.

La potenza nominale totale dell'impianto fotovoltaico è pari alla somma della potenza nominale di ogni singolo modulo.

La riduzione della potenza erogata causata da un ombreggiamento parziale del campo fotovoltaico può essere non proporzionale alla porzione di superficie in ombra, ma molto superiore. Occorre prestare quindi molta attenzione ai collegamenti: se, ad esempio, di fronte al campo fotovoltaico si ha un palo, bisognerà fare in modo che l'effetto dell'ombra si

sentita su una sola stringa e non vada ad intercettare più serie di pannelli fotovoltaici, compromettendo quindi il corretto funzionamento di tutto l'impianto. E' come se si stringesse con una mano una canna entro cui scorre dell'acqua, impedendo alla stessa di fluire. Analogamente avviene con le cariche generate dalle celle fotovoltaiche dei diversi moduli fotovoltaici: se un'ombra appare su un modulo, gli elettroni provenienti dai moduli esposti al sole "trovano la strada bloccata" e non possono arrivare "a destinazione".



4.3. Collegamenti meccanici

Un'efficace montaggio meccanico dei moduli fotovoltaici sulla struttura di sostegno è spesso una condizione indispensabile per la buona riuscita del progetto.

Le regole da seguire dipendono dalla tipologia dell'impianto che si ha in mente di realizzare, tuttavia è possibile tenere conto alcuni criteri generali:

- i moduli fotovoltaici devono essere ben vincolati alla struttura che li sostiene in un numero di punti sufficiente da evitare eccessivi sforzi localizzati;
- devono esserci sufficienti spazi tra i moduli così da permettere eventuali

assestamenti della struttura e consentire le dilatazioni termiche;

- i moduli, una volta installati, devono essere facilmente ispezionabili e sostituibili;
- a prescindere da considerazioni di natura energetica, i moduli fotovoltaici dovrebbero essere montati con una inclinazione di almeno 10°, così da ridurre il ristagno dello sporco sulle superfici e favorire l'azione di lavaggio conseguente alle precipitazioni atmosferiche;
- se il collegamento alle strutture è realizzato mediante bulloni tradizionali deve essere utilizzata bulloneria in acciaio inox con bullone composto da vite, dado e rosetta dentata da posizionare lato cornice del modulo, in modo da scalfire la superficie anodizzata della cornice stessa;

La presenza della cornice in alluminio anodizzato facilita le operazioni di montaggio specialmente quando si utilizzano strutture in acciaio zincato forate in quanto rende possibile l'utilizzo dei fori già presenti sul bordo della cornice stessa o, in alternativa, permette di praticarne altri a seconda delle esigenze.

Dal punto di vista meccanico, la cornice permette di distribuire meglio gli sforzi sul bordo del vetro del modulo, riducendo la possibilità che possano insorgere rotture o crepe conseguenti a manovre errate, ad esempio, un eccessivo serraggio di un dado può avere al massimo come conseguenza il danneggiamento della cornice in quel punto.

Sempre più spesso, soprattutto per ragioni estetiche, vengono utilizzati moduli fotovoltaici senza cornice i quali, indubbiamente, consentono di realizzare strutture più snelle e gradevoli che valorizzano la scelta fotovoltaica inserendola in modo armonico nel contesto architettonico esistente. Per la realizzazione di facciate fotovoltaiche si ricorre a profili di alluminio estruso nei quali vengono alloggiati come se fossero dei normali vetri di tamponamento per edifici a facciata continua ed inserendo, come per un normale vetro, tra profilo di alluminio e modulo un sottile strato di gomma.

Qualunque sia il tipo di aggancio che si intende utilizzare per i moduli senza cornice occorre evitare accuratamente di utilizzare silicone esposto direttamente alla luce del sole in quanto l'azione dei raggi solari libera micro particelle di materiale che si posano sulla superficie esposta del modulo formando un sottile strato inattaccabile dall'acqua ma poroso per le particelle di sporcizia, col risultato di ridurre le prestazioni e creare un effetto "sporco".

CAPITOLO 5

Tipologie impianti fotovoltaici

5.1. Impianti fotovoltaici

La tecnologia fotovoltaica consente la conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica. La conversione avviene per mezzo di celle fotovoltaiche che devono essere collegate elettricamente tra loro, andando a formare i moduli, che dovranno essere esposti correttamente nella direzione del disco solare per raccogliere la maggiore quantità di

radiazione solare nell'anno.

I moduli fotovoltaici possono essere usati sia singolarmente (un modulo da 36 celle può caricare una batteria da 12V) che collegati tra loro in serie e parallelo così da formare stringhe e campi fotovoltaici.

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

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

Quando poi è necessario far assumere alla tensione disponibile verso l'utenza un valore costante, si utilizzano opportuni regolatori di tensione e circuiti di tipo chopper.

Se è necessario disporre di energia elettrica sotto forma di corrente alternata a 230 monofase o 400 trifase con caratteristiche del tutto analoghe alle forniture in bassa tensione esercite dalle società distributrici di energia elettrica, l'utilizzo di convertitori statici o inverter è una strada obbligata. I moderni inverter hanno altre importanti funzioni quali protezioni dai carichi e/o della rete elettrica a valle del dispositivo MPPT (Maximum Power Point Tracker). In alcuni casi provvedono ad effettuare il parallelo delle stringhe fotovoltaiche e ad acquisire dati di funzionamento gestendone la trasmissione verso un computer di controllo.

Le prestazioni, i componenti impiegati e la taglia dei sistemi fotovoltaici dipendono dalle specifiche applicazioni, ma in genere possono essere raggruppabili in due macro-categorie: gli impianti isolati dalla rete (detti stand-alone o off-grid) e gli impianti collegati alla rete elettrica (detti grid-connected).

5.2. Impianti collegati alla rete

Gli impianti grid-connected, chiamati in italiano "impianti connessi alla rete" sono una tipologia di impianti fotovoltaici collegati in modo stabile alla rete elettrica.

In questa tipologia di impianto, quando il generatore fotovoltaico non è in grado di produrre l'energia elettrica necessaria a coprire la domanda di elettricità, come succede ad esempio nelle ore di buio o in inverno, la rete elettrica fornisce l'energia richiesta all'utenza.

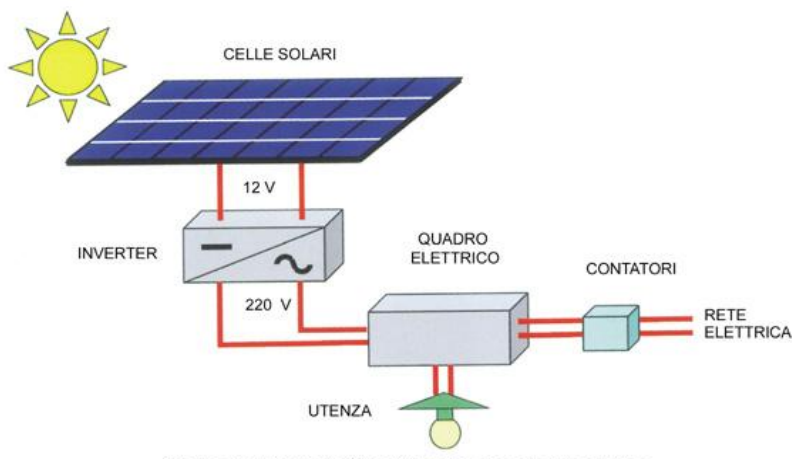
Nel caso in cui, invece, il sistema fotovoltaico produca energia elettrica in quantità superiore a quella richiesta dall'utente, il surplus può essere trasferito alla rete elettrica nazionale (es. Conto Energia) o accumulato per un futuro utilizzo.

Per poter utilizzare a livello domestico l'energia elettrica prodotta dagli impianti collegati alla rete elettrica, un inverter trasforma la corrente continua prodotta dal sistema fotovoltaico in

corrente alternata, cioè dello stesso tipo di quella distribuita a livello nazionale.

Nei sistemi fotovoltaici connessi alla rete non c'è bisogno di batterie, perché la rete di distribuzione sopprime alla fornitura di energia elettrica nei momenti di indisponibilità della radiazione solare. È evidente che in questo tipo di impianto, in cui la rete elettrica garantisce la fornitura di energia all'utente, ci deve essere una rete di interscambio in cui il flusso di energia non va solo da rete a utente, ma anche da utente verso la rete in caso di surplus energetico.

Solitamente l'installazione degli impianti fotovoltaici grid-connected avviene in quelle zone dove la produzione di energia elettrica nel modo "tradizionale" è troppo onerosa oppure dove ha un alto impatto ambientale. Un esempio di impianti connessi alla rete è quello dei sistemi fotovoltaici integrati negli edifici e nelle abitazioni (soprattutto grazie al Conto Energia). Altro tipo di applicazione è quello della realizzazione di grandi centrali di generazione elettrica.



5.3. Impianti isolati dalla rete

Gli impianti fotovoltaici stand-alone, per generare energia elettrica, sono particolarmente indicati dove non sia possibile installare un impianto [fotovoltaico](#) connesso alla rete.

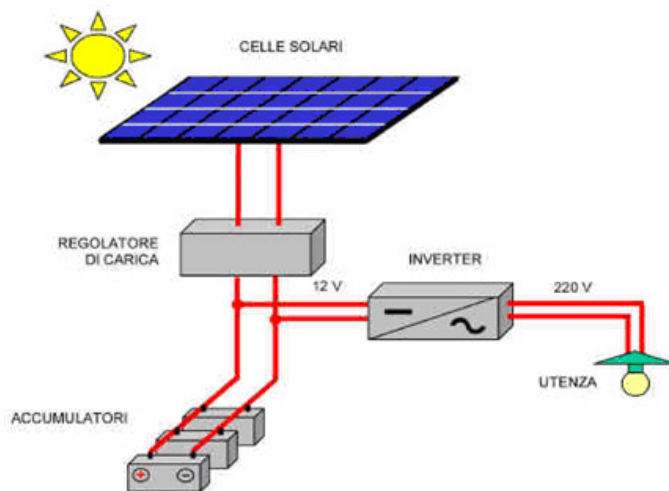
Esempi di tale applicazione possono essere:

- rifugi alpini o cascine in zone remote;
- pompe ad acqua;
- telefoni di emergenza;
- sistemi per barche o veicoli da diporto (camper, furgoni).

Poiché i [moduli fotovoltaici](#) per loro stessa natura possono produrre energia elettrica solo durante il giorno, è necessario pertanto immagazzinare l'energia elettrica necessaria per la notte o da utilizzare durante un giorno nuvoloso. I sistemi di immagazzinamento di energia

elettrica principalmente in uso sono batterie al piombo ricaricabili, grazie alla loro capacità di immagazzinamento con alta efficienza a basso e ad alto voltaggio di input.

L'impianto fotovoltaico stand alone fornisce alla batteria una tensione d'uscita (nella maggior parte dei casi) di 12 o 24 volt in corrente continua. Per fornire energia a dispositivi che funzionano a corrente alternata si utilizza un Inverter Solare che trasforma la corrente continua fornita dal generatore fotovoltaico in corrente alternata. Uno degli aspetti più importanti da tenere in considerazione per il dimensionamento dell'impianto fotovoltaico stand alone è la capacità di erogazione di energia elettrica durante il giorno rapportata al fabbisogno.



5.4. Elementi impianto

5.4.1. Inverter

Si tratta di un tipo particolare di inverter progettato espressamente per convertire l'energia elettrica sotto forma di corrente continua prodotta da modulo fotovoltaico, in corrente alternata da immettere direttamente nella rete elettrica. Queste macchine estendono la funzione base di un inverter generico con funzioni estremamente sofisticate e all'avanguardia, mediante l'impiego di particolari sistemi di controllo software e hardware che consentono di estrarre dai pannelli solari la massima potenza disponibile in qualsiasi condizione meteorologica.

Questa funzione prende il nome di MPPT, un acronimo di origine inglese che sta per Maximum Power Point Tracker.

I moduli fotovoltaici infatti, hanno una curva caratteristica tale che esiste un punto di lavoro ottimale, detto appunto Maximum Power Point, dove è possibile estrarre la massima potenza disponibile.

Questo punto della caratteristica varia continuamente in funzione del livello di radiazione solare che colpisce la superficie delle celle. È evidente che un inverter in grado di restare "agganciato" a questo punto, otterrà sempre la massima potenza disponibile in qualsiasi condizione.

Ci sono svariate tecniche di realizzazione della funzione MPPT, che si differenziano per prestazioni dinamiche (tempo di assestamento) e accuratezza. Sebbene la precisione dell'MPPT sia estremamente importante, il tempo di assestamento lo è, in taluni casi, ancor più. Mentre tutti i produttori di inverter riescono ad ottenere grande precisione sull'MPPT (tipicamente tra il 99-99,6% della massima disponibile), solo in pochi riescono ad unire precisione a velocità.

È infatti nelle giornate con nuvolosità variabile che si verificano sbalzi di potenza solare ampi e repentini. È molto comune rilevare variazioni da 100 a 1000-1200 in meno di 2 secondi. In queste condizioni, che sono molto frequenti, un inverter con tempi di assestamento minori di 5 secondi riesce a produrre fino al 5%-10% di energia in più di uno lento.

Un'altra caratteristica importante di un inverter fotovoltaico, è l'interfaccia di rete.

Questa funzione, generalmente integrata nella macchina, deve rispondere ai requisiti imposti dalle normative dei diversi enti di erogazione di energia elettrica.

In Italia, ENEL ha rilasciato la normativa CEI-021, attualmente giunta all'edizione 2. Questa normativa prevede una serie di misure di sicurezza tali da evitare l'immissione di energia nella rete elettrica qualora i parametri di questa siano fuori dai limiti di accettabilità.

5.4.2.Batterie

Di solito per impianti stand-alone vengono usate batterie stazionarie che risultano essere molto efficienti ed avere una elevata durata di vita. Possono raggiungere capacità molto elevate, anche 5000 , evitando così di porre in parallelo più batterie.

Solitamente tali accumulatore sono realizzate al piombo e possono essere di due tipi:

- *con elettrolita liquido*: usate più frequentemente perché caratterizzate da lunga durata (10-15 anni). Sono penalizzate da un'assidua manutenzione periodica;
- *con elettrolita gelatinoso*: non necessitano di manutenzione, ma presentano un costo elevato e da una durata nettamente inferiori alle precedenti. Tali batterie sono preferite solo in particolari applicazioni, dove la manutenzione risulta pressoché impossibile (ripetitori posizionati su alture, in luoghi remoti o in deserti).

Il mercato attualmente offre le batterie al Nichel/Cadmio le quali però hanno un' auto-scarica

maggiore di quelle al piombo-acido e contengono Cadmio che risulta un potenziale contaminante dell'ambiente. Oltre a Nichel/Cadmio ci sono anche quelle a ioni di litio ma risultano ancora adesso molto costose.

L'accumulatore è sicuramente la parte dell'impianto più costosa.

All'interno della batteria avvengono delle reazioni che porteranno ad un processo di carica e uno di scarica (riferimento a batterie piombo/acido).

Processo di carica e scarica per mezzo di una trasformazione chimica:

Leggendo la reazione da destra a sinistra si ottiene la reazione di carica, mentre da sinistra a destra si ottiene la scarica. Questa reazione reversibile rimane tale fino a quando il solfato di piombo che si forma nel processo di scarica e che si deposita sugli elettrodi, non raggiunge livelli tali da impedire la sua successiva trasformazione in acido solforico e ossido di piombo. Nel caso in cui questo si verifici la batteria perderebbe la propria capacità di accumulare energia e risulterebbe irrimediabilmente deteriorata. Quando invece nella batteria la carica risulta essere in prossimità del suo valore massimo, si verifica il fenomeno della gassificazione.

L'energia fornita dall'esterno non si traduce in un accumulo ulteriore bensì causa l'elettrolisi dell'acqua formando ossigeno O_2 sul polo positivo e idrogeno H_2 su quello negativo secondo la reazione:

Questo fenomeno si verifica anche durante il processo di carica e deve essere tenuto sotto controllo poiché tende ad autosostenersi con l'aumentare della temperatura e, negli accumulatori a vaso aperto, provoca la veloce diminuzione dell'acqua presente negli elementi; quest'ultima dovrà poi essere ripristinata.

E' importante ricordare che tutto quello che è stato citato prima si riferisce a sistemi fotovoltaici per zone isolate. Per quanto riguarda invece sistemi grid-connected la figura dell'accumulatore la fa la rete elettrica che assorbe l'energia non utilizzata e la fornisce in caso di poca radiazione solare.

5.4.3.Regolatore di carica

Le centraline elettroniche sono regolatori di carica utilizzabili solo per impianti stand alone. Le centraline coordinano in modo ottimale il generatore solare e l'accumulatore e ottimizzano il flusso di energia.

Servono in sostanza per il monitoraggio dell'impianto fotovoltaico.

Gli strumenti indicatori sono importanti perché l'utenza impara ad adattare il prelievo di corrente all'offerta disponibile, in modo da prolungare sensibilmente l'autonomia del sistema. Per valutare il funzionamento di un impianto fotovoltaico sono sufficienti un amperometro e un voltmetro all'entrata, un voltmetro per la tensione di batteria e un amperometro per la corrente di scarica.

Se la temperatura del locale batterie non è tra i 15 e i 25, è necessaria una compensazione della tensione finale di carica (corretta con un valore compreso tra -3 e -6 per ogni di aumento della temperatura).



CAPITOLO 6

Progetto elettrico impianto fotovoltaico

Analizzeremo come si procede nella progettazione elettrica di un impianto fotovoltaico, si procederà seguendo un tipico percorso progettuale che prevede la scelta dei componenti principali (moduli e convertitori), la scelta dei quadri elettrici con la rispettiva componentistica di protezione, i cablaggi idonei fra componenti e per finire le verifiche del sistema elettrico secondo la normativa vigente.

Cominceremo a parlare del layout d'impianto anche se non farebbe strettamente parte del progetto elettrico, poiché da esso discendono molte peculiarità che hanno forte influenza su tale progetto.

6.1. Disposizione dell'impianto

Nella progettazione della disposizione dei componenti del sistema nel sito di installazione non esistono regole generali poiché questo aspetto deve essere valutato volta per volta. In generale il posizionamento dell'accumulo e delle apparecchiature elettriche è preferibile in un locale interno rispetto ad una zona esterna.

Dopo avere fatto delle scelte di layout progettuali sarebbe utile verificare alcune condizioni:

- accertarsi che le condizioni ambientali controllabili non abbiano un'influenza negativa sulle prestazioni o la durata dei componenti del sistema;
- accertarsi che le condizioni di sicurezza elettrica e di operatività durante le manutenzioni siano scrupolosamente seguite;
- considerare se il layout scelto consentirà al sistema di essere armonizzato con l'ambiente in cui si inserisce con un minimo impatto visivo.

In merito alla scelta della disposizione del generatore fotovoltaico che risulta la parte più ingombrante dell'impianto bisogna tenere conto che si affronteranno dei problemi nel caso le potenze diventino importanti poiché sarà difficile disporre tutti i pannelli su una sola fila perciò si dovrà ricorrere a diverse soluzioni:

1. aumentare la dimensione in altezza del piano lasciando inalterata quella massima disponibile orizzontale;
2. considerare la possibilità di disporre il generatore fotovoltaico su più file.

Adottando la prima soluzione avremo un'esposizione maggiore al vento quindi un impatto non solo sulla geometria delle strutture di sostegno ma anche sul calcolo dei profili metallici e delle fondazioni.

Con la seconda soluzione si introducono invece ombreggianti reciproci che penalizzano la produzione elettrica ma, ottengono un effetto di schermatura dall'azione del vento per le file interne.

La scelta di disporre il generatore fotovoltaico su più file merita qualche ulteriore osservazione.

L'ombreggiamento totale risulta essere la somma degli ombreggiamenti durante tutto l'arco dell'anno ora per ora. Questo dato può essere stimato solo con simulazione di appositi software che tengono conto del movimento del disco solare rispetto alle superfici captanti disposte su più file. Il problema si traduce in sensibili perdite di potenza dell'impianto, spesso maggiori di quelle calcolabili attraverso il semplice rapporto tra l'area ombreggiata e la superficie totale.

Quantificare la perdita energetica non è per niente semplice, perché bisogna tenere conto che dipende sia dalla geometria dell'intera fila, sia dalla disposizione meccanica del modulo

sulla fila infine sia da come sono elettricamente cablati i moduli per formare le stringhe.

Si può osservare che i moduli installati con il lato maggiore in posizione verticale “soffriranno” le ombre N-S in quanto gli effetti dell’ombra che li raggiunge non saranno mitigati dall’innesco dei diodi di by-pass. Viceversa, moduli installati in posizione orizzontale (landscape) “soffriranno” le ombre E-O ma non quelle N-S in quanto i diodi di by-pass potranno intervenire a protezione.

Il criterio pratico da adottare quando si sceglie l’architettura del sistema dipende dal tipo di impianto:

- se si sta progettando un impianto stand-alone che deve garantire servizi elettrici tutto l’anno, si dovrà tendere a ridurre il più possibile gli ombreggiamenti, al fine di non penalizzare eccessivamente la già ridotta produzione invernale;
- se, viceversa, l’impianto no rappresenta l’unica fonte di energia elettrica disponibile, come nel caso di tetti fotovoltaici, è possibile orientarsi verso soluzioni più compatte;
- se si tratta di grandi impianti di produzioni, la valutazione dovrà essere fatta in maniera scrupolosa e con l’ausilio di simulazioni molto accurate.



6.2.Scelta dei componenti

6.2.1.Moduli fotovoltaici

Al giorno d’oggi sono disponibili moduli fotovoltaici realizzati con tecnologie differenti ma che in prima analisi è possibile suddividerli in due gruppi, silicio cristallino e film sottile.

I moduli in silicio cristallino possono utilizzare diversi tipi di celle e che possono avere origine da: wafer di silicio monocristallino, wafer di tipo policristallino, wafer di silicio monocristallino con back-contacts e infine può avere origine da substrato di silicio monocristallino con deposizione in silicio amorfo.

Altre varianti possono riguardare le dimensioni, la forma delle celle, la loro spaziatura e il colore.

I moduli fotovoltaici possono inoltre essere di varie forme e dimensioni con o senza cornice, a singolo o doppio vetro e con scatola di derivazione posizionata in modi differenti.

Da non sottovalutare inoltre la qualità delle celle che contribuiscono a qualificare il progetto

anche se alcune caratteristiche, quali ad esempio il grado di purezza del silicio utilizzato, non siano sempre verificabili.

I film sottili sfruttano materiali e tecnologie totalmente differenti rispetto al silicio cristallino. Si tratta di deposizioni con spessori di pochi micron su superfici di vetro o materiale plastico, questa caratteristica rende questa tecnologia generalmente più versatile tanto che i moduli realizzati in materiali amorfi quali il silicio possono essere di tipo flessibile ed adattarsi quindi facilmente a superfici non piane.

I moduli in tellurio di cadmio (CdTe), sono attualmente più competitive rispetto al silicio cristallino, anche se le maggiori superfici richieste dovute alla minore efficienza, e l'affidabilità di lungo periodo ancora poco certa, in molti casi riducono e vanificano tale competitività iniziale.

C'è da tenere conto che la presenza di metalli pesanti in alcune tipologie di moduli fotovoltaici a film sottile nel nostro Paese possono fare insorgere degli allarmismi a livello locale che, anche se ingiustificati, sono comunque in grado di pregiudicare o comunque ritardare il progetto.

Si dovranno fare dei confronti sulle tecnologie da utilizzare e in base all'utilizzo si sceglierà il modulo fotovoltaico più corretto, attualmente la scelta tra una tecnologia e l'altra trova soluzione dalle risposte a degli interrogativi ad esempio: "il progetto prevede criteri di integrazione architettonica del generatore fotovoltaico?", "esistono vincoli di superficie nella posa dei moduli in relazione alla potenza da installare?".

Infatti se il sistema da progettare prevede l'obbligo di seguire criteri di integrazione architettonica dei moduli e non esistono vincoli sull'occupazione della superficie di posa, la soluzione di utilizzo di moduli in silicio amorfo può essere presa in considerazione al contrario in impianti fotovoltaici di grande potenza posati a terra, la soluzione amorfa non risulta economicamente conveniente.

Un'altra considerazione importante sta nel fatto che durante la fase progettuale, per i moduli fotovoltaici è richiesta oltre la conoscenza sia delle loro caratteristiche tecniche che dei dati commerciali il loro prezzo di acquisto.

In genere, piccole quantità di moduli fotovoltaici sono vendute dai distributori sulla base del costo unitario per modulo, il quale è funzione della potenza nominale: questo sistema di acquisto però non tutela il piccolo cliente in quanto non sempre è possibile verificare se le prestazioni dei componenti corrispondano a quanto dichiarato dal costruttore.

Nel caso di vendita di grandi potenze (centinaia di), può essere utile procedere all'acquisto a watt di picco, richiedendo al fornitore il valore medio stimato sulla fornitura alle condizioni STC (Standard Test Conditions) e la sua tolleranza che, insieme alla densità di potenza, può dare indicazione anche a livello qualitativo della fornitura.

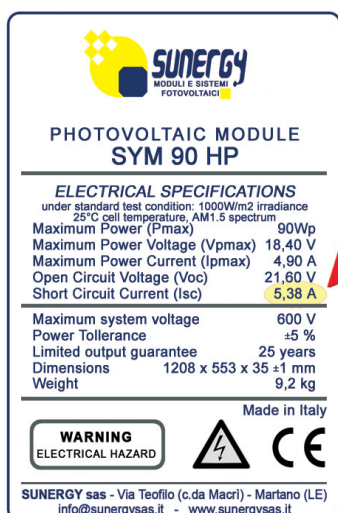
Elenchiamo quindi alcune caratteristiche che il progettista deve considerare necessari alla progettazione del sistema:

- potenza tipica del modulo espressa in ;
- presenza o assenza dei diodi di by-pass;
- tensione al punto di massima potenza (a STC) e tensione massima di esercizio del modulo;
- tensione a vuoto (a STC);
- corrente di corto circuito e corrente nominale (a STC);
- dimensioni esterne ed altezza alla cornice e layout delle forature della cornice (se presente);
- tipi di connettori e sezione dei cavi precablati o, in mancanza, misura dei passacavi;
- vincoli sull'installazione dei moduli;
- modalità di imballo;
- forma di garanzia e vita utile stimata;
- certificazioni.

Osserviamo che come per tutti i prodotti frutto in un processo industriale, anche per i moduli fotovoltaici la distribuzione statistica delle prestazioni elettriche, assimilabile ad una curva gaussiana, individua la maggiore o minore uniformità di produzione. Mentre per i piccoli impianti la scarsa uniformità di prestazioni porta con se inefficienze tollerabili, quando la potenza cresce è bene considerare l'opportunità di suddividere la fornitura dei moduli secondo classi di corrente a seconda della maggiore o minore uniformità di prestazioni.

Ogni modulo prodotto viene testato in fabbrica dal costruttore ed i dati caratteristici in termini di prestazioni elettriche sono raccolti in uno sticker applicato sul retro del modulo.

La norma CEI 50380 prescrive le informazioni minime che devono essere presenti sui fogli informativi e sulle targhe applicate ai moduli fotovoltaici.



6.2.2. Sistemi di accumulo

I sistemi di accumulo che vengono generalmente utilizzati nelle applicazioni di potenza, sono quelli piombo-acido a vaso aperto, che risultano essere anche quelli più affidabili nel tempo ed i più interessanti come rapporto prestazioni/prezzo. In impianti che necessitano di ridottissima manutenzione può essere utilizzata una analoga tecnologia Pb-acido, a vaso chiuso ermetico con elettrolita in gel.

Ormai tutti i costruttori di un certo rilievo hanno a catalogo un prodotto specifico per impianti a fonte rinnovabile del tipo Pb-acido con piastra positiva tubolare e piastra negativa grigliata con materia attiva riportata.

Si dovranno tenere conto di alcuni dati caratteristici necessari in fase progettuale:

- *Tipo accumulatore*: al Pb-acido a vaso aperto fornito già con elettrolito o, in carica secca con elettrolito a parte in fusti.
- *Composizione delle piastre*: consigliabile il tipo con piastra negativa a griglia ad ossido riportato e positiva tubolare armata con antimONIO con tenore < 2%.
- *Tensione nominale elemento*: per impianti di una certa potenza (più di 100-200) si fa uso di elementi a 2 se abbiamo potenza molto bassa elementi da 6-12 il dato è utile per la redazione del manuale di manutenzione al fine di determinare quanti elementi saranno soggetti a manutenzione.
- *Capacità C10 (25) []*: insieme al numero di elementi la capacità definisce anche l'ingombro del parco batterie dell'impianto.
- *Tensione finale di scarica a 10h*: in genere arriva a 1,85 : il dato è utile per garantire al regolatore di carica lo stacco tempestivo del carico per evitare scariche troppo profonde.
- *Peso specifico dell'elettrolito*: in genere, in climi temperati si richiede 1,25 a 20 .

- *Caratteristiche vaso*: si dà la preferenza a vasi trasparenti con indicazione dei livelli minimo e massimo che permettono di valutare lo stato delle piastre ed agevolano le operazioni di rabbocco.
- *Collegamento tra elementi*: sono possibili tre soluzioni, sbarre in piombo massiccio, rame stagnato o conduttori flessibili isolati. La soluzione flessibile permette teoricamente di poter disporre gli elementi senza troppi vincoli di distanza tra gli uni e gli altri.

6.2.3.Regolatori di carica

Per quanto riguarda i regolatori di carica possiamo trovarne di due tipi, sia tipi di regolazione ON-OFF che quelli più moderni con regolazione PWM. Si consiglia al progettista di puntare molto sull'affidabilità del prodotto scelto: troppe volte si sono visti impianti realizzati con cura ma non funzionanti per un lungo tempo per colpa di un guasto alla centralina di controllo della carica.

Il mercato dei regolatori di carica è il più fiorente in marche e modelli anche per la loro relativa facilità di progettazione.

Le principali cause di malfunzionamento, che in questi componenti molto spesso corrispondono ad impossibili riparazioni sono dovute a stress termici ed elettrici.

Il progettista perciò dovrà tenere conto di determinate caratteristiche del regolatore di carica:

- *Condizioni ambientali di funzionamento*: se le condizioni di installazione del regolatore di carica fossero gravose, è bene considerare il range di temperatura e umidità di esercizio .
- *Prestazioni elettriche*: verificare che la massima corrente in ingresso dal generatore e la massima in uscita dal carico non eccedano la portata del dispositivo e valutare l'autoconsumo nelle varie situazioni di funzionamento.
- *Sicurezza e protezioni*: sarebbe preferibile che il regolatore fosse in grado di interrompere l'alimentazione del carico in caso di corto circuito e che offrisse la protezione da inversione di polarità della batteria/generatore all'atto del cablaggio.
- *Controllo dei parametri di regolazione*: indispensabile la compensazione delle soglie di gestione della carica con la temperatura, mentre è utile che il regolatore abbia già implementate la gestione della carica di più tipi di batterie.

6.2.4. Convertitore statico

E' molto importante la scelta della tensione nominale in relazione agli aspetti di sicurezza e a quelli di efficienza del sistema. In genere, i sistemi fotovoltaici per l'alimentazione di utenze isolate hanno tensioni nominali in corrente continua standardizzate (12, 24, 48, 110) in quanto i carichi utilizzatori sul mercato sono disponibili per queste tensioni.

Gli inverter collegati alla rete hanno tensioni in ingresso decisamente superiori a quelli di servizio isolato, per ridurre la corrente associata, sia per poter lavorare con tensioni più vicine a quelle di rete.

Le tensioni sono comunque sempre dell'ordine delle centinaia di volt, arrivano anche a 500/600 .

In tutti i casi in fase di progetto occorre stabilire valori minimi e massimi delle tensioni in uscita dal generatore fotovoltaico nelle condizioni operative limite previste e vedere se questi possono essere compatibili con le caratteristiche in ingresso dell'inverter.

Date queste osservazioni il progettista in base al tipo di impianto fotovoltaico dovrà fare delle considerazioni differenti. Perciò distinguiamo due casi:

1. Considerazioni impianto collegato alla rete:

- *Accoppiamento con il generatore:* La tensione di ingresso del convertitore è costituita da una finestra con valore di tensione minima e massima all'interno della quale è generalmente garantito anche l'inseguimento del punto di massima potenza del generatore fotovoltaico. Occorre accoppiare questa finestra con la finestra di possibile funzionamento del generatore fotovoltaico alle condizioni di esercizio.
- *Inseguimento della massima potenza:* I generatori fotovoltaici in silicio amorfo che sono caratterizzati da una caratteristica piuttosto piatta, possono mettere in difficoltà i dispositivi di inseguimento del punto di massima potenza.
- *Potenza nominale:* nei data sheet si trovano diverse indicazioni relative alla potenza della macchina. La potenza massima consigliata ovvero la max potenza del generatore che è possibile accoppiare riferita alle condizioni di STC e la potenza massima in continua che indica la massima potenza in ingresso ed è circa il 20% in meno della potenza massima consigliata.
- *Presenza del trasformatore:* Realizzando prodotti senza trasformatore con uno stadio di chopper sulla continua, prima del ponte di conversione, consente di aumentare di qualche punto il rendimento senza però riuscire a diminuire i costi a causa di un più generoso dimensionamento dei filtri.

Mancando il trasformatore è indispensabile l'adozione di un dispositivo che non permetta l'iniezione di componenti continue in rete ed esso deve essere certificato da un laboratorio accreditato. In alternativa al tradizionale trasformatore a 50 sono disponibili inverter con trasformatore in alta frequenza, essi offrono alcuni vantaggi tra cui il peso spesso contenuto rispetto al tradizionale 50, minori fluttuazioni di tensione e di corrente in corrispondenza del parallelo e del distacco, costo praticamente uguale.

- *Protezioni elettriche:* occorre sincerarsi che il convertitore abbia a bordo un rilevatore di dispersioni a terra quando il generatore fotovoltaico è flottante, inoltre gli inverter sono dotati delle protezioni elettriche suggerite dalla normativa.

2. Considerazioni impianti isolati dalla rete:

- *Accoppiamento con il generatore:* Controllare che le soglie di regolazione della carica (quindi di tensione di batteria) siano compatibili con quelle in ingresso al convertitore.
- *Potenza nominale:* La scelta della potenza del convertitore rappresenta un punto molto importante nella progettazione, la macchina deve essere dimensionata per il carico previsto. Alla massima potenza assorbita prevista, si associa il valore di potenza continuativa del convertitore.
- *Autoconsumo:* un basso autoconsumo risulta fra i parametri di merito dei convertitori per servizio isolato. I moderni inverter sono spesso dotati di un dispositivo tarabile, denominato sensore di carico in grado di fermare la generazione dell'onda di tensione in assenza di un carico elettrico.
- *Protezioni elettriche:* oltre alle usuali protezioni da normativa, anche nei convertitori per servizio isolato servirà la presenza di un rilevatore di dispersioni a terra e di scaricatori di sovratensione indotte sia lato continua che lato alternata. È necessaria, inoltre, un'efficace protezione contro i cortocircuiti, i sovraccarichi e differenziale.
- *Dimensionamento termico/meccanico:* Se di piccola taglia, i convertitori per servizio isolato sono spesso soggetti a sollecitazioni meccaniche che lo shelter dovrà essere in grado di assorbire senza danni. Una maggiore

attenzione deve essere data alla scelta delle migliori soluzioni costruttive di ancoraggio dell'elettronica e dei principali componenti. Andrà poi verificata l'idoneità delle soluzioni adottate per lo scambio del calore dell'inverter, da mettere comunque in relazione al codice IP dichiarato, che dovrà essere compatibile con le condizioni operative di esercizio della macchina.

6.3. Protezioni elettriche

Le protezioni elettriche di un impianto fotovoltaico possono essere raggruppate in due categorie: quelle convenzionali relative ai componenti come le batterie di accumulatori, quadro elettrico, convertitore statico e quelle relative al generatore fotovoltaico.

6.3.1 Diodi di blocco e diodi di by-pass

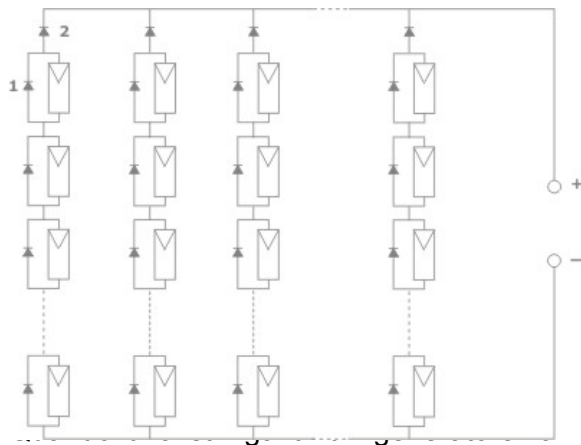
Può capitare frequentemente che una singola cella fotovoltaica sia ombreggiata parzialmente o totalmente. Il dispositivo non si trova più a funzionare come generatore ma come un carico trovandosi a dovere dissipare potenze che danno origine a riscaldamenti localizzati o ad un valore di tensione inversa in grado di provocare la rottura del dispositivo.

La massima potenza dissipabile dal dispositivo dipende dal tipo e dalla tecnologia costruttiva ed è un dato che si riesce a conoscere solo sperimentalmente oppure applicando modelli matematici.

Qualora la cella fosse ombreggiata, il limite massimo potrebbe essere, oltre alla potenza, anche la massima corrente ammissibile sui contatti (30-40). La tensione inversa di una cella che quindi può provocare danni irreversibili si aggira generalmente intorno ai 10-30 secondo il tipo di tecnologia costruttiva.

Dal punto di vista delle protezioni la maggior parte dei moduli fotovoltaici commerciali sono già dotati di protezioni adeguate consistenti in diodi di by-pass posti in antiparallelo ai moduli così da escludere il modulo contenente la cella contropolarizzata.

Oltre i diodi di by-pass possiamo utilizzare altri sistemi nella protezione dei moduli da polarizzazione inversa, i collegamenti elettrici equipotenziali effettuati fra le diverse stringhe in parallelo impediscono che la tensione su una cella contropolarizzata superi il valore limite. I collegamenti equipotenziali comportano un'indubbia maggiore complessità di cablaggio.



ato da più stringhe ha una tensione a circuito aperto più bassa della tensione di lavoro delle altre stringhe, in mancanza di adeguate protezioni la corrente di queste ultime tenderebbe a riversarsi sulla stringa a tensione minore. Anche se vi è differenza fra le tensioni delle stringhe connesse in parallelo, non sempre questo comporta un'inversione della corrente nei moduli della stringa a tensione inferiore: infatti, se la tensione a vuoto della stringa con tensione più bassa è maggiore della tensione di lavoro delle altre stringhe, non si avrà inversione del flusso di corrente ma solo una diminuzione della corrente erogata dalla stringa svantaggiata.

La protezione in questo consiste, in un diodo di blocco posto in serie alla polarità positiva di ogni stringa, esso ha la funzione di impedire il ritorno di corrente; fra i diodi più utilizzati vi sono i diodi del tipo Schottky che sono caratterizzati da una bassa caduta diretta con conseguenti basse perdite.

Il diodo di blocco serve anche ad evitare che la batteria si scarichi sul generatore fotovoltaico nelle ore notturne quando i moduli non illuminati tenderebbero a comportarsi come carichi.

In alternativa ai diodi di blocco si potrebbero usare dei fusibili o interruttori di massima corrente. Rispetto ai diodi i fusibili hanno il vantaggio di non introdurre cadute di tensione e impediscono alla corrente sui moduli di superare il valore limite. Gli svantaggi principali consistono nell'impossibilità di autoripristino, nella scelta di un particolare calibro in un largo intervallo di temperatura di esercizio e non effettuano la protezione della scarica della batteria sul campo fotovoltaico nelle ore notturne.

Negli impianti isolati la pratica progettuale pertanto è orientata nell'adozione sistematica dei diodi di by-pass e dei diodi di blocco posti in serie ad ogni stringa.

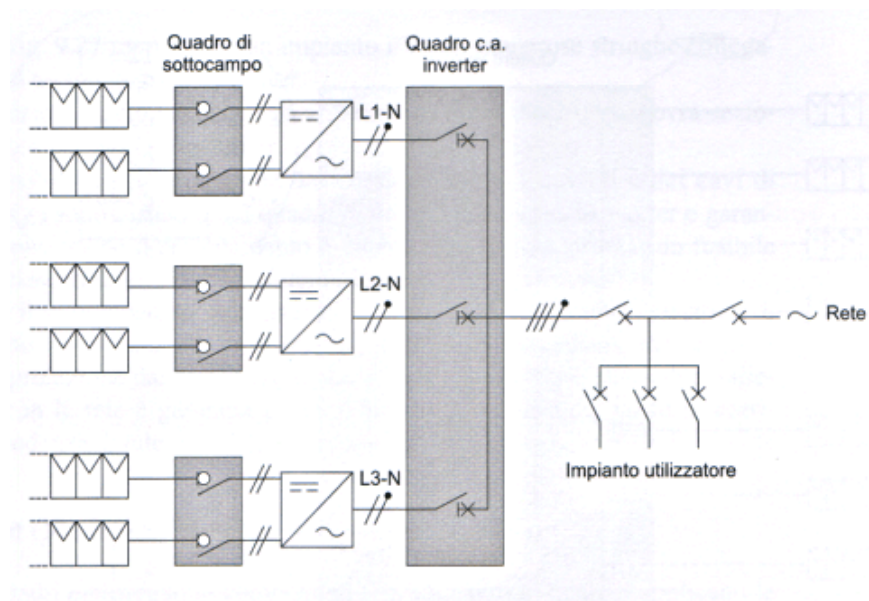
6.3.2. Quadri elettrici in c.c.

La sezione in corrente continua di un impianto fotovoltaico è composta dal generatore fotovoltaico e dal sistema di accumulo, quest'ultimo presente nel caso di impianto per

servizio isolato.

Quando il generatore è di piccola potenza, cioè composto da poche stringhe, il sistema fa capo ad un solo quadro che assolve le funzioni principali di parallelo delle stringhe, di regolazione della carica e di nodo per la batteria.

Quando il numero di stringhe è consistente si preferisce disporre di un primo livello di quadri dedicati al parallelo parziale di gruppi di stringhe e poi di un quadro generale per il parallelo finale e la regolazione.



Le stesse osservazioni trovano validità per i sistemi collegati alla rete i quali utilizzano la conversione centralizzata senza la funzione di regolazione della carica e senza il nodo di batteria: per i sistemi con conversione di stringa i cavi di cablaggio delle stringhe entrano direttamente nel convertitore senza bisogno di nessun quadro in continua.

Funzioni e componenti:

Il quadro di parallelo, sia per impianti isolati che per quelli collegati a rete, dovrà essere realizzato per assolvere le funzioni di:

- connessione e parallelo di un certo numero di stringhe in ingresso realizzata con l'uso di morsetti sezionabili;
- protezione delle stringhe con diodi di blocco o fusibili montati su una basetta isolata disperdente;
- protezione delle stringhe da sovratensioni indotte attraverso l'uso di scaricatori tra ciascun polo e la terra;
- controllo dell'isolamento autoalimentato per i sistemi isolati o alimentato da rete nei sistemi collegati alla rete;

negli impianti di piccola taglia è possibile integrare alcune funzioni aggiuntive:

1. regolazione della carica delle batterie;
2. collegamento con la batteria utilizzando un interruttore portafusibili, perché la condizione di guasto peggiore per il sistema di accumulo è rappresentata da un cortocircuito ai morsetti che sarebbe accompagnato da correnti elevatissime e potenzialmente distruttive.

per entrambe le tipologie di impianto in genere, si prevedono per completezza le seguenti misure:

- misura della tensione e della corrente predisponendo un partitore di tensione ed uno shunt;
- misura dell'energia in corrente continua in uscita dal generatore fotovoltaico con un wattorometro.

Spesso la realizzazione di sistemi fotovoltaici fruisce di supporti finanziari da parte di programmi di sviluppo delle fonti rinnovabili a livello regionale, statale o comunitario, che richiedono il monitoraggio delle prestazioni del sistema durante l'esercizio con trasmissione trimestrale dei dati JRC (Joint Research Center) di Ispra; sono esclusi i piccoli impianti per servizio isolato a causa dell'alto costo dell'equipaggiamento di misura.

Le linee guida per la misura e l'elaborazione dei dati sono date dalla norma CEI EN 61724.

Caratteristiche costruttive:

L'armadio contenitore deve essere progettato con materiale, dimensioni e grado di

protezione idoneo al luogo di installazione. Mentre la sua installazione all'interno di un locale non crea particolari problemi, per il posizionamento in un luogo esterno si dovranno tenere conto di:

- utilizzare un materiale non deperibile e stabile all'azione dei raggi UV;
- un dimensionamento teoricamente compatibile con il calore dissipato all'interno e la temperatura di esercizio in condizioni gravose;
- un grado di protezione dell'involucro adatto alle condizioni di posa, quadri con protezione sovradimensionata (es. IP65 indica protezione totale contro polvere e contro getti d'acqua potenti) consentono all'umidità interna di condensare nelle ore più fredde portando così un possibile danneggiamento dei componenti elettronici.

L'inconveniente si può superare lasciando "respirare" il quadro predisponendo dei fori di drenaggio di diametro contenuto sulla base inferiore che risulta la meno esposta alla pioggia. Il quadro deve essere provvisto di una o più targhe, marcate in maniera indelebile e poste all'esterno in modo da essere visibili e leggibili anche dopo l'installazione recanti le informazioni richieste dalla CEI EN 60439-1, inoltre è buona regola corredare il quadro di una cartella protetta applicata all'interno della controporta contenente lo schema planimetrico di disposizione dei componenti, lo schema multifilare elettrico e lo schema funzionale e di morsettiera.

Molto importante è inoltre la disposizione dei componenti, qualora il posizionamento del quadro sia in esterno, gli ingressi e le uscite dei cavi di cablaggio dal quadro sono realizzati nella base inferiore con fori adatti ai raccordi o ai passacavi che vanno scelti di diametro compatibile con il diametro esterno dei cavi di cablaggio.

Nella parte bassa del quadro trovano spazio le morsettiere e gli scaricatori di sovratensione in quanto i diodi di blocco è bene siano montati su dissipatore e disposti nella parte alta.

La copertura dei diodi di blocco e delle sbarre di parallelo positive e negative viene fatta con un pannello in materiale plastico indeformabile trasparente sul quale si riportano le sigle dei diodi e le polarità corrispondenti.

6.3.3. Quadri elettrici in c.a.

Per quanto riguarda gli impianti isolati, la realizzazione di un quadro in alternata ha significato solo se si prevede la misura dell'energia prodotta attraverso un contatore: viceversa, sarà sufficiente un normale quadro di distribuzione utenze. Quando è prevista una distribuzione in corrente alternata dell'energia prodotta dal sistema fotovoltaico, come una usuale fornitura di rete, il convertitore non può essere trasportabile ma deve essere posizionato fisso.

6.4. Cavi e collegamenti

6.4.1. Cablaggio dal generatore fino ai quadri di parallelo

I moduli fotovoltaici oggi sono in gran parte dotati di due spezzoni di filo che fuoriescono dalla scatola di giunzione, all'estremità dei quali sono presenti i connettori ad innesto rapido maschio/femmina. Poiché gli spezzoni di cavo aggiuntivi devono essere intestati, almeno sul lato moduli, con dei connettori identici a quelli già presenti, è assolutamente necessario che l'applicazione di tali connettori sia effettuata seguendo le indicazioni del fabbricante.

I cavi che trovano più impiego, almeno fino ai quadri di parallelo, sono quelli adatti per impieghi solari (spesso marchiati Solar), i quali risultano prodotti da numerosi fabbricanti. Si tratta di cavi unipolari con guaina adatti per posa esterna, resistono a tensioni continue di valore elevato e ai raggi UV. Benché rispettino le norme di prodotto sui cavi, non hanno però una marchiatura codificata in quanto ai materiali non è associata una sigla specifica.

Rispetto al cavo H07RN-F o H07RN8-F, i cavi Solar hanno il vantaggio di resistere a temperature più elevate. I cavi Solar sono disponibili con qualsiasi sezione normalizzata, ma per il cablaggio delle stringhe si utilizzano praticamente solo il 2,5 , il 4 e il 6 .

Se la posa dei cavi è esterna, il cablaggio è effettuato senza l'utilizzo di tubi o canali sia per evitare oggettive difficoltà di montaggio sia per evitare la possibilità di ristagni d'acqua. Qualora si decida di far scorrere i cavi nelle scanalature presenti negli elementi delle strutture di sostegno, è importante accertarsi che non si verifichino ristagni d'acqua in corrispondenza dei connettori anche se questi sono protetti IPX7 o IPX8.



6.4.2.Cablaggi in partenza dai quadri di parallelo stringhe

Negli impianti realizzati su edifici e costruzioni la posa di questi cavi è spesso in passerella, tubo o canale, mentre per gli impianti a terra si adotta quasi sempre la posa interrata del tubo o cunicolo.

Il primo caso non pone problemi particolari, mentre nel secondo è importante che il tipo di cavo adottato sia adatto alla posa interrata, anche per quanto riguarda la tensione di isolamento che è più elevata rispetto a quella per la posa fuori terra. La posa interrata dei cavi in tubo deve essere effettuata ad una profondità di almeno 50 anche se il tubo è di tipo pesante, e deve essere presente una protezione meccanica supplementare. Non è richiesta una profondità minima di posa e la protezione meccanica supplementare se i cavi sono posti entro un tubo protettivo in grado di resistere ai normali attrezzi da scavo, ad esempio un idoneo tubo metallico. Anche per i condotti interrati in calcestruzzo non è richiesta una profondità minima di posa. L'isolamento dei cavi rispetto alla corrente continua è pari a 1,5 volte il valore indicato per la corrente alternata. I cavi Solar, per i quali è comunque raccomandato l'utilizzo come i cavi di stringa, hanno invece un proprio livello di tensione di isolamento specificato dal costruttore. La norma CEI 20-91, di recente pubblicazione considera i cavi per utilizzi fotovoltaici di tensione non superiore a 1500 in corrente continua. Per la portata massima dei cavi multicolori, così come dei cavi isolati in PVC, si rimanda alle tabelle fornite dai costruttori o alla diffusa manualistica sull'argomento.

Ulteriori fattori di riduzione della portata massima per i cavi sono rappresentati dalla temperatura ambiente e dalle condizioni di posa in fascio.

6.5.Verifiche di progetto elettrico

6.5.1.Coordinamento tra conduttori e dispositivi di protezione

Sovraccarico

Secondo la normativa CEI 64-8/4 le protezioni delle condutture contro i sovraccarichi devono rispondere alle seguenti due condizioni:

in cui:

- = corrente di impiego del circuito;
- = portata in regime permanente della conduttura;
- = corrente nominale del dispositivo di protezione;
- = corrente che assicura l'effettivo funzionamento del dispositivo di protezione;

La parte di corrente in continua del sistema non prevede la protezione contro i sovraccarichi, in quanto la massima corrente erogabile dal campo fotovoltaico nel massimo punto di potenza è approssimativa alla massima corrente che il campo è in grado di erogare.

E' quindi condizione sufficiente la verifica di:

dove I_{sc} corrisponde alla corrente I_{sc} e alla portata in regime permanente della conduttanza.

Pensando agli impianti collegati a rete, per la sezione occorre innanzitutto calcolare la verificandone la prima condizione, la seconda condizione risulta verificata usando interruttori magnetotermici commerciali nei quali la corrente convenzionale di funzionamento I_{sc} .

Cortocircuito

Per la parte di circuito in corrente continua, la protezione contro il cortocircuito è assicurata dalla caratteristica di generazione tensione-corrente dei moduli fotovoltaici che limita la corrente di cortocircuito ad un valore noto e di poco superiore alla corrente massima erogabile al punto di funzionamento a massima potenza.

Per gli impianti collegati a rete, nelle varie sezioni in alternata, occorre proteggere le condutture dalle correnti di cortocircuito di ritorno dalla rete di collegamento. Bisogna quindi verificare la condizione:

sull'energia passante ricorrendo alla curva caratteristica del dispositivo di protezione scelto, le sezioni di cavo adottate e le correnti di cortocircuito nel punto di consegna dell'energia.

Cadute di tensione

Essendo il sistema elettrico di generazione e non di utilizzazione, la verifica delle cadute di tensione sui conduttori non è richiesta al fine della valutazione di confronto con la tensione ammessa dalla natura del carico elettrico ma solo come parametro indicativo delle perdite di

potenza.

6.5.2. Installazione dei conduttori

Tipo di posa in funzione dei conduttori utilizzati

Per la verifica della corretta scelta del tipo di posa dei cavi di cablaggio ci si può riferire alle norme CEI 64-8/5 che riportano i criteri per la scelta ed installazione dei componenti elettrici. Ad esempio la norma sulla scelta dei conduttori e dei cavi in funzione dei tipi di posa, suggerisce la possibilità di posa fissa dei cavi di cablaggio unipolari con guaina o la posa di cavi di cablaggio multicolori con guaina in condutture protettive di forma circolare.

Messa in opera delle condutture

La stessa norma suggerisce la corretta scelta del tipo di messa in opera delle condutture protettive in relazione all'ubicazione delle stesse.

Per le condutture protettive di forma circolare è contemplata, ad esempio, la messa in opera con montaggio sporgente tipico dei percorsi in esterno.

Stipamento dei cavi nelle condutture

Per un corretto stipamento dei cavi, la norma consiglia che all'interno dei tubi e dei canali utilizzati, si debba verificare che il diametro interno sia maggiore o uguale a 1,3 volte il diametro del cerchio circoscritto al fascio di cavi, con un minimo di 10, per i canali aventi sezione diversa dalla circolare si consiglia un rapporto tra sezione stessa e l'area della sezione retta occupata dai cavi non inferiore a 2.

CAPITOLO 7

Collaudo e manutenzione preventiva

7.1.Collaudo

Una volta terminata la fase d'installazione dell'impianto, bisogna effettuare il collaudo dello stesso per verificarne il corretto funzionamento.

Il certificato di collaudo dell'impianto fotovoltaico è un documento obbligatorio per poter accedere alle tariffe incentivanti del conto energia. Il collaudo è un atto tecnico-amministrativo, che si colloca alla fine dell'installazione dell'impianto stesso. Serve innanzitutto a salvaguardare gli interessi del committente, perché una mancata produzione di energia a causa di un guasto significherebbe una minor resa dell'impianto stesso in termini economici.

Il collaudo rappresenta una delle attività più importanti nella fase di realizzazione dell'impianto in quanto un'accurata ispezione del lavoro svolto permette di rilevare eventuali difetti.

La fase di collaudo prevede verifiche tecniche funzionali da effettuarsi al termine dei lavori di installazione e termina con il rilascio di una dichiarazione certificante l'esito delle verifiche effettuate.

Prima di eseguire le verifiche tecnico-funzionali è consigliabile verificare:

- a) che vi siano condizioni di irraggiamento stabili in modo da rendere stabili le misure effettuate;
- b) che vi sia una radiazione di almeno 600 allineando il sensore di radiazione al piano dei moduli;
- c) che non si stiano effettuando le verifiche nelle ore più calde;
- d) che non si stiano effettuando le verifiche in presenza di giornate afose, in quanto la presenza di umidità nell'aria determina un aumento della componente diffusa, aumento che a sua volta comporta un rendimento del campo più basso;
- e) che i moduli siano puliti.

E' una procedura che deve essere effettuata da tecnici con provata esperienza.

Le fasi principali di un collaudo riguardano:

Esame Visivo

Acquisito il progetto e verificato che l'installatore abbia rilasciato la dichiarazione di conformità ai sensi della Legge 46/90 (DM37/08), l'esame visivo deve accertare:

- che l'impianto sia conforme al progetto, che i moduli siano posati correttamente, che la carpenteria sia saldamente ancorata e che siano state prese tutte le precauzioni per evitare infiltrazioni d'acqua;
- che l'impianto sia stato realizzato nel rispetto delle prescrizioni delle Norme in generale e delle Norme specifiche di riferimento per l'impianto installato;
- che il materiale elettrico sia conforme alle relative Norme, sia scelto correttamente ed installato in modo conforme alle prescrizioni normative e che non siano presenti danni visibili che possano compromettere la sicurezza;
- che le distanze delle barriere e delle altre misure di protezione siano state rispettate;
- che vi sia la presenza di adeguati dispositivi di sezionamento e di interruzione;
- che vi sia l'identificazione dei conduttori di neutro e di protezione, l'identificazione dei comandi e delle protezioni, dei collegamenti dei conduttori.

Verifica dei Cavi e dei Conduttori

Per i cavi ed i conduttori si deve controllare che il dimensionamento sia fatto in base alle portate indicate nelle tabelle CEI-UNEL e che siano dotati dei contrassegni di identificazione, ove prescritti, e siano adatti al tipo di posa.

Verifica della continuità elettrica e delle connessioni tra i moduli fotovoltaici.

Verifica della messa a terra di masse e scaricatori.

Verifica della resistenza di isolamento dei circuiti elettrici dalle masse, controllando che siano rispettati i valori previsti dalla Norma CEI 64-8

Si deve eseguire con l'impiego di uno strumento adeguato e la misura si effettua in corrente continua. L'apparecchio di prova deve fornire determinati valori di tensione riportati in tabelle, quando eroga una determinata corrente.

La misura deve essere effettuata tra l'impianto (collegando insieme tutti i conduttori attivi) ed il circuito di terra; è raccomandata, per quanto praticamente possibile, la misura della resistenza d'isolamento tra i conduttori attivi.

Durante la misura gli apparecchi utilizzatori devono essere disinseriti. I valori minimi ammessi sono quelli previsti dalla Norma CEI 64-8.

Prove funzionali sul sistema di conversione statica con riferimento al manuale di uso e manutenzione, nelle diverse condizioni di potenza (accensione, spegnimento, mancanza di rete del distributore).

Verifica tecnico-funzionale dell'impianto

La verifica tecnico-funzionale di un impianto fotovoltaico richiede la valutazione:

- della continuità elettrica e connessione tra i moduli;
- della messa a terra di masse e scaricatori;
- del corretto funzionamento dell'impianto fotovoltaico nelle diverse condizioni di potenza generata e nelle varie modalità previste dal gruppo di conversione (accensione, spegnimento, mancanza rete) etc.;
- dell'isolamento dei circuiti elettrici dalla masse.



La procedura di verifica tecnico-funzionale di un impianto fotovoltaico prevede l'impiego di una sonda piranometro (Figura29) o con una cella campione si provvede a rilevare il valore

dell'irraggiamento (captati dalla superficie), per ciascuna stringa e si procederà alla verifica delle seguenti condizioni:

dove:

potenza (in) misurata all'uscita del generatore fotovoltaico, con precisione migliore del

somma delle potenze (in) di targa dei moduli installati del generatore fotovoltaico (potenza nominale);

irraggiamento (in) misurato sul piano dei moduli, con precisione migliore del (deve essere);

irraggiamento in condizioni standard il cui valore di riferimento è 1000 ;

potenza attiva (in) misurata all'uscita del convertitore con precisione superiore al migliore del ;

perdite termiche del generatore fotovoltaico, mentre tutte le altre perdite del generatore stesso (ottiche, resistive, caduta sui diodi, difetti di accoppiamento) sono tipicamente assunte pari all'8%.

Tale condizione deve essere verificata per della potenza di targa del gruppo di conversione della corrente continua in corrente alternata.

Alla fine se tutte le prove hanno avuto esito positivo il collaudatore provvede a rilasciare il certificato di collaudo.

7.2.Manutenzione preventiva

Le attività di manutenzione preventiva sono consigliate con cadenza al minimo annuale, semestrale se si tratta di impianti per servizio isolato, e comprendono una serie di ispezioni e controlli.

La maggior parte delle verifiche possono essere fatte anche da personale non esperto in tecnologie fotovoltaiche purché addestrato ad operare su circuiti elettrici applicando le norme di sicurezza e comunque, non senza aver preso visione del “Manuale d’uso e manutenzione” scritto dal progettista e consegnato al cliente.

I controlli verranno effettuati sui vari componenti tra i quali:

- Moduli fotovoltaici;
- Stringhe fotovoltaiche;
- Strutture di sostegno;
- Quadri elettrici;
- Batteria di accumulatori (se presenti);
- Convertitore statico;
- Collegamenti elettrici.

Moduli fotovoltaici

La manutenzione preventiva sui singoli moduli fotovoltaici non richiede la messa fuori servizio dell’impianto in quanto consiste in primo luogo di un’ ispezione visiva tesa all’identificazione dei danneggiamenti ai vetri anteriori, deterioramento del materiale usato per l’isolamento interno dei moduli, microscariche per perdita di isolamento ed eccessiva sporcizia del vetro. Verrà effettuato un controllo alla cassetta di terminazione mirata a trovare eventuali deformazioni di essa, la formazione di umidità all’interno, lo stato dei contatti elettrici delle polarità positive e negative, lo stato dei diodi di by-pass, il corretto serraggio dei morsetti di intestazione dei cavi di collegamento delle stringhe e l’integrità della siliconatura dei passacavi.

Infine verrà fatto un lavaggio (esempio in Figura 30) dei moduli negli impianti in cui le perdite per sporcamento possono contribuire al decadimento delle prestazioni. Per evidenti motivi ambientali non si usano detersivi. È possibile invece usare acqua a tre livelli di purezza in relazione alla sporcizia. Normalmente si prevedono due lavaggi all’anno da concentrare nel periodo asciutto.



Stringhe fotovoltaiche

La manutenzione preventiva sulle stringhe, viene effettuata nel quadro elettrico in continua e anch'esso non richiede la messa fuori servizio dell'impianto.

Verranno effettuati dei controlli delle grandezze elettriche con l'ausilio di un normale multimetro, si controllerà l'uniformità delle tensioni a vuoto e delle correnti di funzionamento per ciascuna delle stringhe che fanno parte dell'impianto; risultano accettabili scostamenti fino al 5%. Qualora il progetto abbia previsto il monitoraggio delle stringhe, le grandezze elettriche si possono leggere facilmente dal sistema di acquisizione dei dati di esercizio.

Struttura di sostegno

È sufficiente assicurarsi che le connessioni meccaniche bullonate più sollecitate risultino ben serrate e che l'azione del vento non abbia piegato o modificato la geometria dei profili e che lo strato di zincatura sia ancora uniforme senza macchie di ruggine.

Quadri elettrici

Non comporta operazioni di fuori servizio dell'impianto e consiste innanzitutto nell'ispezione visiva del quadro fatta per identificare danneggiamenti dell'armadio e dei componenti contenuti al suo interno e della corretta indicazione degli strumenti di misura eventualmente presenti sul quadro di fronte.

Si effettua un controllo delle protezioni elettriche per verificare l'integrità degli eventuali diodi di blocco e l'efficienza degli scaricatori di tensione, si controllano inoltre i cablaggi elettrici.

Infine si terrà un controllo elettrico per controllare la funzionalità e l'alimentazione del relè di isolamento installato se il generatore è flottante, e l'efficienza delle protezioni di interfaccia.

Batteria di accumulatori

Tramite un controllo puramente visivo verranno identificati se presenti danneggiamenti meccanici dei vasi di contenimento, deterioramento delle piastre, intorpidimento dell'acido e riscaldamenti localizzati per resistenze di contatto elevate sulle sbarre conduttrici, tra elementi e controllo del livello di elettrolito.

Si effettuerà un controllo densità e tensioni tese all'identificazione di un significativo campione di elementi verificando per ognuno, con apposito densimetro, l'uniformità delle misure di densità dell'elettrolito e con un multimetro l'uniformità delle tensioni.

Infine verrà fatto un rabbocco dell'acqua distillata.

Convertitore statico

Le diverse tipologie di convertitori utilizzabili nei sistemi fotovoltaici hanno diversi schemi elettrici e risulta indispensabile una personalizzazione per qualsiasi intervento, anche solo ispettivo, è consigliabile attenersi alle indicazioni contenute nel "Manuale d'uso e manutenzione" che accompagna la macchina.

Le operazioni di manutenzione preventiva sono limitate ad una ispezione visiva mirata ad identificare danneggiamenti meccanici dell'armadio di contenimento, infiltrazioni di acqua, formazione di condensa, eventuale deterioramento dei componenti contenuti, controllo della corretta indicazione degli strumenti di misura eventualmente presenti e sostituzione dei filtri sui condotti di ventilazione.

Collegamenti elettrici

La manutenzione non necessita di fuori servizio dell'impianto in quanto per i soli cavi a vista, basta un'ispezione visiva che servirà a trovare danneggiamenti quali bruciate, abrasioni, deterioramento isolante, variazioni di colorazione del materiale usato per l'isolamento e fissaggio saldo nei punti di ancoraggio.

CONCLUSIONE

Il mercato del fotovoltaico è in continua crescita e negli ultimi anni in Italia il numero e la potenza degli impianti fotovoltaici sono aumentati a ritmi molto sostenuti, questo grazie anche alla possibilità, introdotta dal Conto Energia, di ricevere incentivi per l'installazione di impianti permanentemente connessi alla rete.

L'obiettivo di potenza installata stimato dai legislatori era inizialmente di 8 entro il 2020 in Italia. Il nostro Paese ha superato però tutte le aspettative creando un volume di mercato, stimato dal GSE, di 5,8 di impianti installati solo nel 2010. Solo 2,3 gigawatt sono stati però connessi alla rete.

Per il 2011 si prospettava un ammontare di installazioni tra i 3 e i 5 . Le previsioni sono state superate con la connessione di 9,3 di impianti fotovoltaici, risultanti in parte da installazioni non connesse a fine 2010.

La ragione di questa inusuale concentrazione deriva dall'adozione di un decreto che ha permesso agli impianti installati entro la fine del 2010, ma non connessi, di beneficiare degli incentivi più vantaggiosi del 2010. Il decreto, conosciuto con il nome "Salva Alcoa", ha permesso a 3,5 di impianti di beneficiare di queste speciali condizioni.

All'inizio del 2011, il 3° Conto Energia ha registrato 1,5 di nuovi impianti connessi.

Il 4° Conto Energia è entrato in vigore i primi di giugno 2011 e, nonostante le ristrette condizioni e la riduzione degli incentivi, ha permesso la connessione di quasi 4 in soli sette mesi.

L'attuale situazione del mercato fotovoltaico in Italia è caratterizzata dalla presenza di più di 520.000 impianti sparsi su tutto il territorio nazionale, con una particolare concentrazione nelle regioni di Lombardia, Emilia Romagna e Triveneto.

Nello specifico, il numero degli impianti attualmente in esercizio con il 5° Conto Energia sono 526.463, per una potenza corrispondente di 17.080.255 .

Numeri significativi, che sottolineano quanto il mercato sia cambiato, rivolgendosi principalmente al residenziale.

La tecnologia fotovoltaica era inizialmente poco efficiente e competitiva, ma grazie alla ricerca svolta e allo sviluppo che hanno permesso di abbattere i costi e di migliorare i rendimenti degli impianti, tale tecnologia è ora diventata estremamente attraente come fonte non tradizionale di energia.

Infine possiamo osservare che ricorrere a energie alternative e rinnovabili significa ridurre la dipendenza economica nei confronti dei combustibili fossili con conseguente miglioramento della vivibilità e della sostenibilità ambientale.

Bibliografia

Dispensa del corso Elettronica analogica tenuta dal prof. Buso S.

Groppi F., Zuccaro C., Impianti solari fotovoltaici a norme CEI, editoriale delfino, 2005

Richard C. Jaeger e Travis N. Blalock, Microelettronica, McGraw-HILL, 2009

Rota S., Elettricità dal Sole "Guida all'impiego, nei piccoli impianti, dei pannelli fotovoltaici e generatori eolici", Sandit libri, 2005

Sitografia

blog.crit-research.it
digilander.libero.it
<http://astrolink.mclink.it/sole.htm/>
<http://it.wikipedia.org>
<http://solar360.it>
<http://tuririolo.altervista.org>
www.100ambiente.it
www.3sun.com
www.ac-ilsestante.it
www.albanesi.it
www.appuntidigitali.it
www.bericacavi.com
www.bluearea.eu
www.bnrgreenenergy.it
www.caspi.it
www.comune.villafrancapiemonte.to.it
www.dbenergy.it
www.edilportale.com
www.elca-srl.com
www.enerpoint.it
www.enersafe.it
www.expoclima.net
www.fotovoltacosulweb.it
www.fotovoltacosulweb.it
www.ideegreen.it
www.ipersolar.it
www.marconi-galletti.it
www.newstechnology.eu
www.nihilscio.it
www.pannellisolari.name
www.sapere.it
www.siallerinnovabili.it

www.solaiocompound-isolamentotermico.it
www.solareterminodinamico.com

www.solaridea-fotovoltaico.it

www.ste-pignotti.com

www.strumentazioneelettronica.it

www.test-italy.com

www.vivoscuola.it