

Università degli Studi di Ferrara



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea triennale Ingegneria Meccanica

**LA CELLA SOLARE E IL GENERATORE
FOTOVOLTAICO: PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO
E SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI REALI**

Relatori:

MALAGÚ CESARE

PARRETTA ANTONIO

Laureando

NGUEPNANG NOUME ARSENE

Anno accademico 2006-07

INDICE

<i>Premessa</i>	<i>pag. 1</i>
<i>Introduzione</i>	<i>pag. 2</i>
1. La cella fotovoltaica	pag. 4
1.1 Semiconduttore di tipo p e di tipo n	pag. 6
1.2 La giunzione p-n	pag. 8
1.3 Effetti della luce sui semiconduttori	pag. 8
1.4 Caratteristiche elettriche	pag. 11
1.5 Efficienza delle celle solari	pag. 17
1.6 Collegamento in serie delle celle	pag. 22
1.6.1 Oscuramento o rottura di una delle celle della serie	pag. 25
1.7 Celle in parallelo	pag. 26
2. Interazione fra radiazione solare e pannello fotovoltaico – effetto della temperatura	pag. 29
2.1 prestazioni elettriche e ottiche dei moduli	pag. 30
3. Codice di calcolo “aquila”	pag. 31
3.1 Potenza STC e RRC	pag. 33
3.2 I meccanismi di perdita.....	pag. 34
3.3 Il programma “aquila”.....	pag. 34
3.3.1 Procedura di calcolo.....	pag. 36
3.3.2 Perdita per riflessione della luce.....	pag. 40
3.3.3 Perdita per la luce diffusa	pag. 43
3.4 Modello per effetti spettrali	pag. 44
3.4.1 I piranometri	pag. 45
3.4.2 I pireliometri.....	pag. 46
3.5 Perdite per basso irraggiamento	pag. 48
3.6 Effetto della temperatura sul modulo	pag. 52

4	<i>Prove sperimentali</i>	<i>pag. 54</i>
4.1	<i>Sistema di acquisizione I-V</i>	<i>pag. 54</i>
4.2	<i>Risultato delle misure</i>	<i>pag. 56</i>
	 <i>Conclusioni</i>	 <i>pag. 57</i>

Ringraziamenti

Premessa

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

Il termine viene però anche comunemente usato con il significato di “cella-solare”.

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

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

Introduzione

L'effetto fotovoltaico è noto fin dal 1839, trova il suo fondamento nell'esperienza del fisico francese Edmond Becquerel (1820-1891) che alla giovane età di 19 anni presentò all'Accademia delle Scienze di Parigi la sua "Memoria sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari". La scoperta di tal effetto avvenne casualmente, mentre Becquerel eseguiva delle esperienze su una cella elettrolitica, in cui erano immersi due elettrodi di platino. Nel 1870 l'effetto fotovoltaico fu studiato in solido sul selenio da Heinrich Hertz, e nel 1876, da Smith, Adam e Day, i quali conclusero che tali celle erano in grado di convertire la luce in elettricità con un'efficienza compresa tra l'1% e il 2%. Contemporaneamente il selenio fu utilizzato nel campo della fotografia e nei dispositivi per le misurazioni.

L'idea di sfruttare l'effetto fotovoltaico come forma di fonte energetica, non poté essere sviluppata fino a quando non si presentò l'occasione di operare con materiali diversi dal selenio, il cui rendimento fosse migliore. Dopo molti lavori teorici e sperimentali la prima cella solare commerciale fu prodotta presso i laboratori Bell nel 1954 da un gruppo di lavoro guidato da Person, Fuller e Chapin, che realizzarono una giunzione su un monocristallo di silicio producendo in tal modo il capostipite delle moderne celle fotovoltaiche. Si trattava però di un dispositivo il cui costo elevato ne restrinse l'impiego quasi esclusivamente nel campo aerospaziale.

Negli anni seguenti la maggior parte degli studi fu dedicata a migliorare la resistenza delle celle alle condizioni ambientali che caratterizzano lo spazio interplanetario e solo verso la metà degli anni settanta s'iniziò a portare avanti anche le ricerche dedicate alle celle per utilizzazioni terrestri.

Dovendo passare dalle tecnologie spaziali sperimentali alla produzione di massa per pannelli terrestri si tentò subito di operare nel senso della riduzione dei costi di produzione. In questo senso si modificarono i processi di produzione, realizzando celle a sezione di più ampia e sviluppando procedimenti per il taglio, che causassero minori sprechi di materiale.

In seguito altri tentativi volti a ridurre il costo hanno condotto allo studio di nuovi materiali in particolare, il silicio policristallino ed il silicio amorfo.

Di recente applicazione sono i sistemi ottici per concentrare la radiazione solare su celle d'area ridotta, per limitare l'impiego di materiale attivo e la realizzazione di celle multigiunzione.

L'attuale frontiera del solare sembra essere un nuovo polimero, sperimentato all'università della California, in grado di generare energia elettrica con la stessa efficienza di un pannello solare ma a costi notevolmente più bassi ed aggiungendo la flessibilità della plastica tra i suoi vantaggi.

Sicuramente il fotovoltaico non è ancora competitivo per quanto riguarda la produzione di energia elettrica su grande scala, ma grazie alla riduzione dei costi (per merito della ricerca) ed al migliore rendimento degli odierni moduli fotovoltaici la conversione diretta dell'energia solare si presta estremamente attraente come fonte non tradizionale di energia elettrica.

Un aspetto vantaggioso dei moduli fotovoltaici è legato alla natura della sua fonte di energia: il Sole.

Essendo questa distribuita risulta poco efficace la realizzazione di grandi produzioni centralizzate tipiche degli impianti a combustibile, mentre appare come naturale l'adozione di piccoli centri di produzione distribuiti sulla rete sino a raggiungere una copertura puntuale del territorio.

Con questo preciso intento sono nate delle iniziative di incentivazione del fotovoltaico come ad esempio "tetti fotovoltaici" che mira a sensibilizzare lo sfruttamento dei tetti trasformando le abitazioni in veri e propri centri di produzione.

CAPITOLO 1 LA CELLA FOTOVOLTAICA

La cella fotovoltaica, detta anche cella solare, è un dispositivo a stato solido capace di convertire l'energia luminosa, su di essa incidente, direttamente in energia elettrica. Quando esposte alla luce solare che ha, come è noto, uno spettro non monocromatico, il rendimento di conversione delle celle solari è tipicamente compreso fra il 10 e il 15% per dispositivi commerciali, per superare il 20% in alcuni campioni di laboratorio.

La cella più comunemente usata per la conversione dell'energia solare è la cella al silicio. Prendiamo in considerazione una normale cella al silicio cristallino.

L'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali occupano l'orbita più esterna e sono detti elettroni di valenza. Questi possono partecipare alle interazioni con altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi. In un cristallo di silicio puro ogni atomo è legato in modo covalente ad altri quattro atomi che con i loro elettroni di valenza completano la sua orbita esterna: quindi due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro hanno in comune una coppia di elettroni, uno dei quali appartenente all'atomo considerato e l'altro appartenente all'atomo vicino.

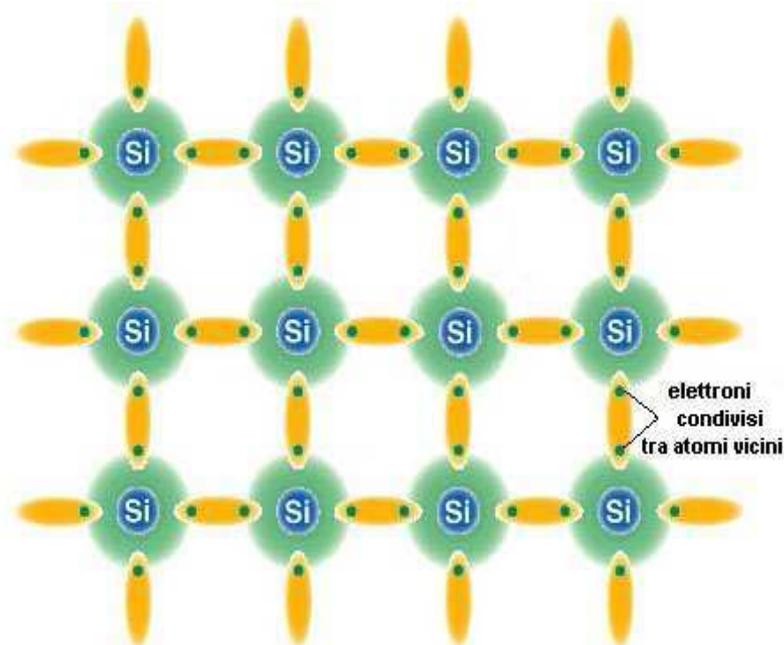


Fig1 – struttura di un cristallo di silicio puro

Esiste quindi un forte legame elettrostatico fra un elettrone ed i due atomi che esso contribuisce a tenere uniti. Questo legame può essere spezzato con una quantità d'energia che permetta ad un

elettrone di passare ad un livello energetico superiore, in pratica dalla banda di valenza alla banda di conduzione, superando la banda proibita, E_g (energy gap). ogni qual volta un elettrone salta dalla banda di valenza in quella di conduzione, rimane un livello energetico non occupato in banda di valenza (vacanza o lacuna) ed anche quest'ultima, per conseguenza, può contribuire alla conduzione. Il meccanismo di conduzione in banda di valenza è molto diverso da quello che avviene in banda di conduzione. Mentre in quest'ultima infatti si hanno poche cariche disponibili e molti livelli non occupati, al contrario, in banda di valenza si hanno molte cariche disponibili e pochi livelli vuoti. Se si considerano però le effettive cariche mobili, ovvero elettroni in banda di conduzione e lacune in banda di valenza, i meccanismi di conduzione sono molto simili, differendo soltanto nella mobilità degli elettroni e delle lacune.

L'energia necessaria per effettuare il salto dalla banda di valenza alla banda di conduzione può essere fornita agli elettroni o mediante eccitazione termica o mediante assorbimento di fotoni di opportuna energia.

Sarà solo a temperatura prossima allo zero assoluto che tutti gli stati della banda di valenza sono occupati e tutti quelli della banda di conduzione vuoti.

Per l'atomo di silicio quest'energia è pari ad $E_g = 1.12 \text{ eV}$ (eV significa elettronvolt, $1\text{eV}=1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Fornita tale valore d'energia, l'elettrone passa al livello di conduzione ed è libero di muoversi, contribuendo così al flusso d'elettricità; ma passando alla conduzione si lascia dietro una buca, cioè una lacuna dove manca un elettrone.

Un elettrone vicino può andare facilmente a riempire la lacuna, scambiandosi così di posto con lei.

Nei semiconduttori però, il moto delle cariche non è dovuto solo al campo elettrico applicato, così come avviene nei metalli, ma è presente anche una corrente cosiddetta di diffusione. La corrente di diffusione è determinata dal moto delle cariche elettriche generato da un gradiente di concentrazione degli elettroni e delle lacune.

L'espressione della corrente in un semiconduttore può essere quindi espressa in forma analitica

$$\text{così: } I = I_n + I_p = qA\mu_n n \mathcal{E} + qA\mu_p p \mathcal{E} + qAD_n \frac{dn}{dx} - qAD_p \frac{dp}{dx}$$

dove:

A : sezione della porzione di semiconduttore

q : carica elettrone

n : concentrazione di elettroni

p : concentrazione di lacune

\mathcal{E} : campo elettrico

σ : conducibilità elettrica

μ_n : mobilità degli elettroni

μ_p : mobilità delle lacune

D_n : costante di diffusione degli elettroni

D_p : costante di diffusione delle lacune

Quando un flusso luminoso investe il reticolo cristallino del silicio, si ha la liberazione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde la creazione di un egual numero di lacune.

Nel processo di ricombinazione ogni elettrone che capita in prossimità di una lacuna la può occupare, restituendo una parte dell'energia che possedeva sottoforma di calore.

Per sfruttare l'elettricità è necessario creare un moto coerente di elettroni (e di lacune), ovvero una corrente, mediante un campo elettrico interno alla cella. Il campo si realizza con particolari trattamenti fisico-chimici, creando un eccesso di atomi caricati positivamente in una parte del semiconduttore ed un eccesso di atomi caricati negativamente nell'altra.

1.1 Semiconduttori di tipo n e di tipo p

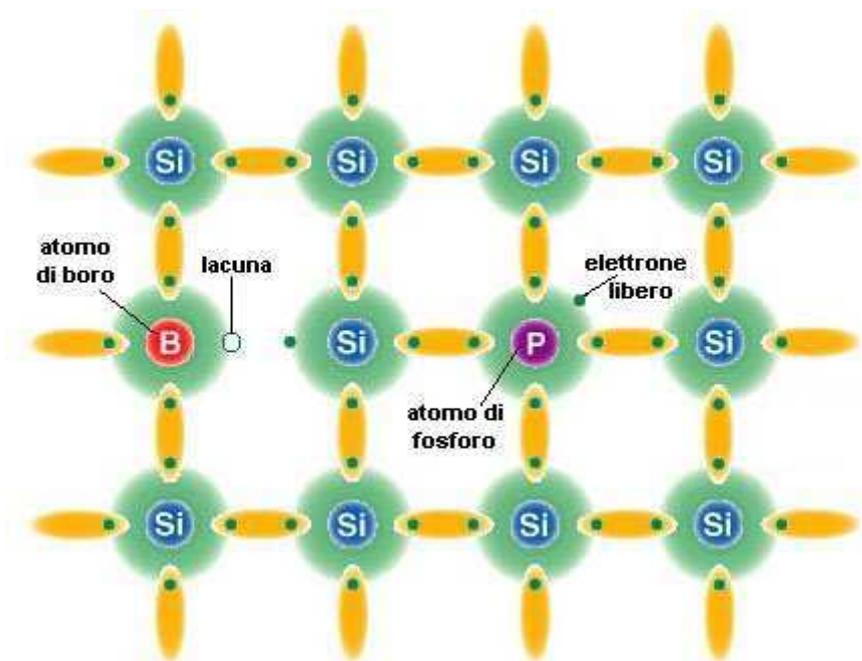


Fig. 2 – silicio drogato

In pratica è necessario introdurre nel silicio una piccola quantità di atomi appartenenti al V gruppo del sistema periodico, detti donatori o al III, detti accettori. Nel primo caso si introduce nell'orbita più esterna del silicio un elettrone in più di quelli necessari per chiudere l'orbita stessa. Questo

elettrone è debolmente legato (frazione di elettronvolt) e quindi ha bisogno di una modesta energia per saltare in banda di conduzione. Materiali con questo tipo di conducibilità (dovuta prevalentemente a cariche negative) sono detti di tipo n.

Nel secondo caso si aumenta invece la concentrazione di lacune. Materiali con questo tipo di conducibilità (dovuta prevalentemente a cariche positive) sono detti di tipo p.

Questo trattamento è detto drogaggio e la quantità delle impurità introdotte è nell'ordine di una parte per milione (ppm). Generalmente si utilizzano il boro (B, terzo gruppo) ed il fosforo (P, quinto gruppo) per ottenere rispettivamente una struttura di tipo p (con un eccesso di lacune) ed una di tipo n (con un eccesso d' elettroni).

In entrambi i casi, il materiale risulta elettricamente neutro.

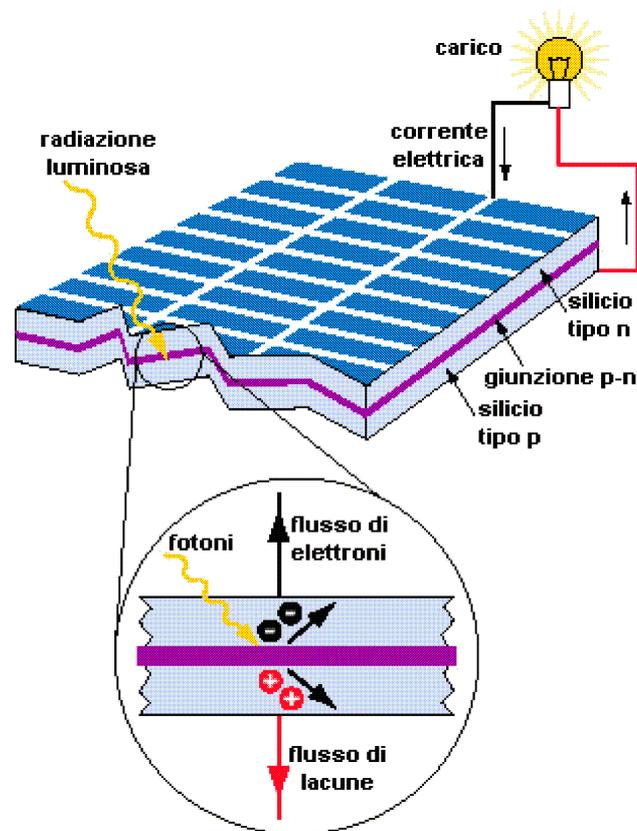


Fig. 3 - sezione di un cella in presenza di luce, a cui è connesso un carico

1.2 La giunzione p-n

Ponendo a stretto contatto un semiconduttore drogato tipo n con un semiconduttore drogato di tipo p si ottiene una giunzione .

Va notato che dicendo “stretto contatto” si intende che deve essere garantita la continuità cristallina. Nel caso di silicio ciò può essere ottenuto drogando con donatori uno strato di un cristallo già drogato omogeneamente (ma a più bassa concentrazione) di tipo p; oppure drogando con accettori uno strato di un cristallo già drogato omogeneamente di tipo n. Quando si realizza una giunzione, gli elettroni che nel materiale tipo n si trovano nella banda di conduzione tendono a diffondere, in conseguenza della maggior concentrazione e per effetto della loro agitazione termica, nel materiale tipo p. Parimenti, si ha anche una migrazione di lacune dal materiale p a quello n. In conseguenza di questa corrente di diffusione, il materiale di tipo n (inizialmente neutro) si carica positivamente. Ciò genera un campo elettrico confine fra il materiale n e quello p, cui è associata una differenza di potenziale situata nella zona della giunzione dove è confinato tutto il campo elettrico. Questa differenza di potenziale genera “una corrente di conduzione” in senso opposto alla corrente di diffusione. All’equilibrio , la corrente di diffusione è compensata da quella di conduzione e non si ha più alcun passaggio netto di carica fra i materiali a contatto. In altri termini, si può dire che la diffusione di elettroni dal materiale n a quello p continua fino a che il campo elettrico generato dalla mancanza di lacune nel materiale p e dalla mancanza di elettroni nel materiale n non è in grado di annullare la corrente di diffusione attivando una corrente di conduzione uguale e contraria.

1.3 Effetti della luce sui semiconduttori

Si consideri un blocchetto di semiconduttori e si supponga di illuminarlo con i fotoni di frequenza ν . Come è noto, ad un fotone di frequenza ν è associata una energia $E=h\nu$ dove h è la costante di Plank. Se l’energia di tali fotoni è inferiore ad E_g essi non potranno essere catturati da elettroni poiché questi, verrebbero portati ad un livello energetico della banda proibita dove nessun elettrone può trovarsi.

Se invece $h\nu \geq E_g$, l’elettrone che cattura il fotone viene portato nella banda di conduzione, lasciando ionizzato (lacuna) il suo atomo originario di appartenenza. Una volta nella di conduzione, l’elettrone dissipa termicamente la quantità di energia $h\nu - E_g$ ed è libero di muoversi nella banda di conduzione.

Applicando al blocchetto di semiconduttore una differenza di potenziale si osserva che in seguito all'illuminazione, la resistenza del blocchetto è diminuita e passa quindi una maggiore corrente nel circuito esterno. La diminuzione di resistenza del blocchetto di semiconduttori è dovuta all'aumentato numero di elettroni e lacune che, in seguito all'illuminazione si sono resi disponibili per la conduzione.

Quando per l'effetto termico o per l'arrivo di fotoni di opportuna energia un elettrone viene portato in banda di conduzione si dice che si è verificato un processo di generazione di coppia elettrone-lacuna. Con velocità di generazione si indica il numero di coppie generate nell'unità di tempo.

Una volta che un elettrone sia stato portato in banda di conduzione, o per effetto termico o per assorbimento di fotoni, esso tende di nuovo a ritornare in banda di valenza non appena incontra uno stato libero da poter occupare. Tale fenomeno prende il nome di ricombinazione quando un elettrone e una lacuna si ricombinano, scompaiono contemporaneamente una carica positiva ed una negativa. La differenza di energia dovuta al decadimento dell'elettrone dalla banda di conduzione a quella di valenza, viene emessa all'atto della ricombinazione o sotto forma di un nuovo fotone o di fononi (quanti di più bassa energia che vengono assorbiti dal reticolo dando luogo ad un riscaldamento del semiconduttore).

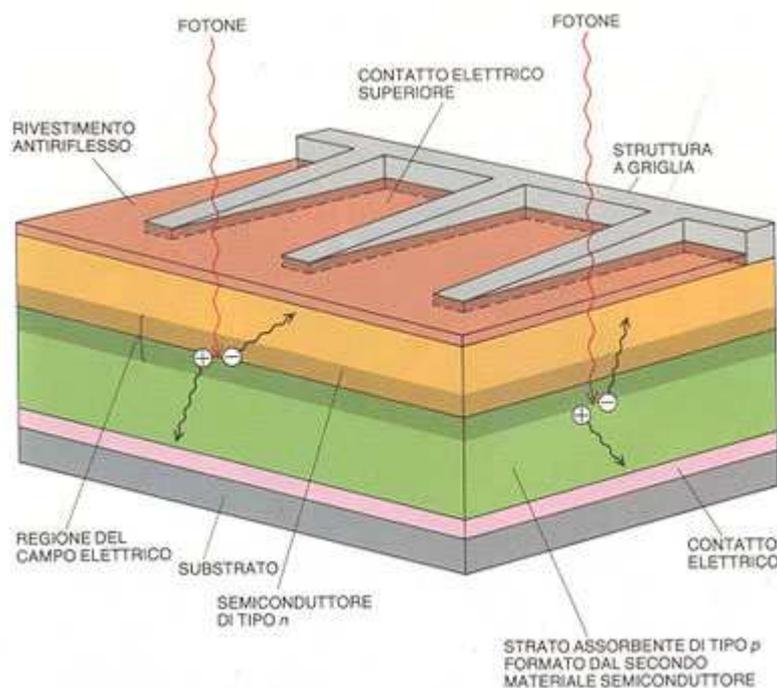


Fig4 - Effetto schematico dell'assorbimento di un fotone ($h\nu \geq E_g$) nella cella.

Il tempo medio che intercorre tra l'istante in cui avviene la generazione di una coppia elettrone-lacuna e quello in cui si ha la ricombinazione di uno dei due portatori generati prende il nome di vita media che indica per l'elettrone, il tempo medio durante il quale esso permane in banda di conduzione prima di decadere in banda di valenza (per la lacuna, indica il tempo medio durante il quale essa rimane attiva, a partire dall'evento di generazione fino a quello della ricombinazione).

La vita media nei semiconduttori diminuisce all'aumentare del livello di drogaggio. Le imperfezioni del reticolo cristallino, conseguenza anche della immissione di atomi di specie diversa da quella del semiconduttore, funzionano infatti da centri di ricombinazione.

Si supponga ora di avere un dispositivo a giunzione p/n, del tipo indicato in fig4 ove è rappresentato lo schema di una cella solare. Se un fotone incidente sulla superficie superiore crea una coppia, ad esempio nel materiale n, si possono determinare le seguenti situazioni:

- a) l'assorbimento avviene nella zona di carica spaziale; in questo caso l'elettrone viene sospinto, dal campo elettrico ivi esistente, verso il materiale n e la lacuna verso il materiale p. si ricordi infatti che il campo elettrico di giunzione è diretto da n verso p e quindi favorisce il passaggio di lacune da n a p e quello di elettroni da p ad n.
- b) l'assorbimento avviene in prossimità della zona di carica spaziale, ad esempio nel materiale n. In questo caso, si ha che se la lacuna raggiunge, per diffusione, la zona di carica spaziale immediatamente portata, dal campo di giunzione, nel materiale p. Si osservi che le cariche p generate nel materiale n tendono sempre a diffondere verso la giunzione. Infatti, nello strato n, la presenza del campo, del verso indicato precedentemente, fa sì che esista un gradiente di concentrazione delle cariche positive nel senso che la loro concentrazione diminuisce man mano che ci si avvicina alla giunzione al punto che, in corrispondenza di questa, la loro concentrazione è estremamente ridotta. Il campo elettrico infatti le porta immediatamente via nel materiale p. In conseguenza di tale gradiente, la carica si muove verso la giunzione e viene da questa sospinta nel materiale p.
- c) Se la generazione avviene lontano dalla zona di giunzione le cariche, generalmente, si ricombineranno dopo un tempo pari alla vita media.

Riassumendo nei casi a) e b) si ha un contributo alla potenza elettrica ai morsetti del dispositivo dovuto all'accumulo di elettroni nel materiale n e di lacune nel materiale p, nel caso c) non si ha, in genere, alcun effetto utile.

1.4 La cella fotovoltaica: caratteristiche elettriche

Dalla descrizione qualitativa presentata nel precedente paragrafo è facile capire che una cella fotovoltaica ha un comportamento all'"oscuro" (cioè quando non venga illuminata) tipo raddrizzatore: vedi fig7. In realtà essa è in sostanza un diodo a semiconduttore di opportune caratteristiche geometriche.

Cominciamo a vedere qualitativamente in base ad argomenti intuitivi che forma ci aspettiamo per la curva caratteristica di un diodo a semiconduttore. Se alimentiamo con potenziale positivo V il lato p (cioè introduciamo cariche positive al lato p, o, che è lo stesso, cariche negative al lato n: vedi fig5) non si ha passaggio di corrente per piccoli valori di V , perché il potenziale esterno viene contrastato dalla barriera di potenziale V_e , generata dal doppio strato di cariche alla giunzione. Quando tuttavia V tende a V_e , il dispositivo diviene un buon conduttore. La corrente è dovuta al moto di lacune entro il materiale p e al moto di elettroni nel materiale n. Questi portatori di segno opposto muovono entrambi verso la giunzione che ora possono attraversare visto che il potenziale esterno ha abbassato il valore del potenziale di contatto che su di essa esisteva.

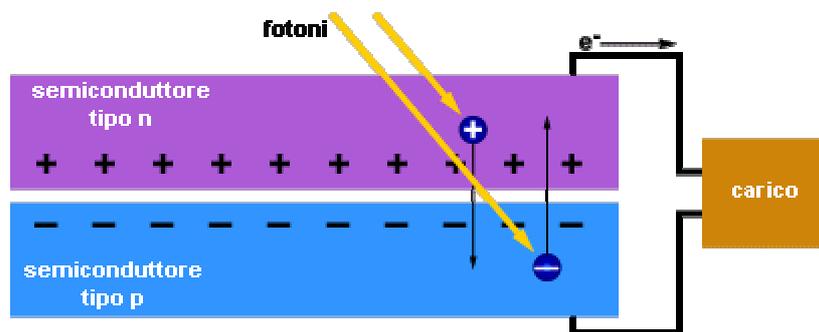


Fig. 5 – definizione del segno del potenziale scelto convenzionalmente come positivo

Se invertiamo il segno del potenziale, non si può invece avere conduzione. In questo caso, infatti, il potenziale esterno si somma a quello di barriera e gli elettroni del materiale n così come le lacune del materiale p non possono attraversarla. Solo i cosiddetti portatori minoritari, ossia le lacune presenti nel materiale n e gli elettroni del materiale p, sono facilitati dal maggior valore del potenziale di barriera ad attraversare la giunzione. Poiché però la concentrazione dei portatori minoritari è sempre molto bassa, la corrente che si ha in polarizzazione inversa è sempre estremamente modesta.

Questo risultato può essere posto in termini quantitativi risolvendo l'equazione della conservazione della carica per la cella in condizioni di oscuramento. Senza entrare in dettagli di calcoli, si riporta solo il risultato finale che è del tipo:

$$I_D = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (E1)$$

dove q è la carica dell'elettrone, k è la costante di Boltzman, T la temperatura assoluta ed I_0 è una costante dipendente dalle caratteristiche dei due semiconduttori che formano la giunzione, e dalla temperatura. Il pedice della corrente indica "diodo". Come si vede per $V \ll -kT/q$, $I_D \rightarrow -I_0$: per questo motivo, il parametro I_0 viene chiamato "corrente di saturazione inversa".

Nella pratica si riscontra che i diodi hanno una caratteristica esterna del tipo

$$I_D = I_0(e^{\frac{qV}{NkT}} - 1) \quad (E2)$$

dove N è un coefficiente compreso tra 1 e 2 e che dipende dai fenomeni di generazione e ricombinazione che avvengono nella zona di carica spaziale al confine tra il materiale n e p.

Al fine di determinare la dipendenza delle proprietà della cella dalla temperatura (cosa che faremo nei prossimi paragrafi) è necessario conoscere la dipendenza dalla temperatura dei suoi parametri caratteristici. La dipendenza da T della banda proibita E_g è presentata qui nella curva di figura 6.

per quanto riguarda I_0 , essa ha una dipendenza molto forte dalla temperatura data dalla formula

$$I_0 = A_0 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (E3)$$

In essa A_0 è una costante che dipende dal semiconduttore adoperato.

La dipendenza di I_0 dalla temperatura è dovuta non tanto al termine cubico T quanto a quello esponenziale.

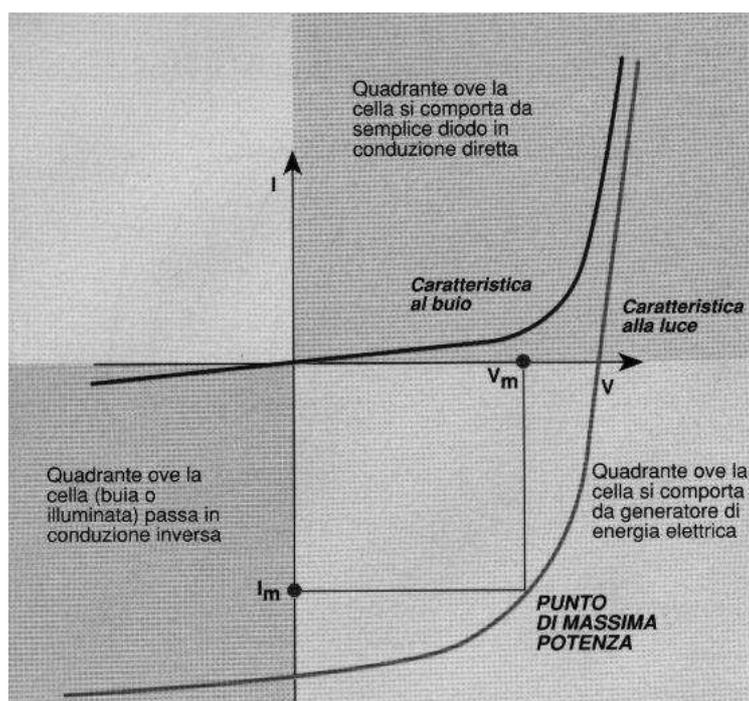


Fig. 7 – andamento tipico della curva caratteristica per una cella fotovoltaica illuminata e all'oscuro

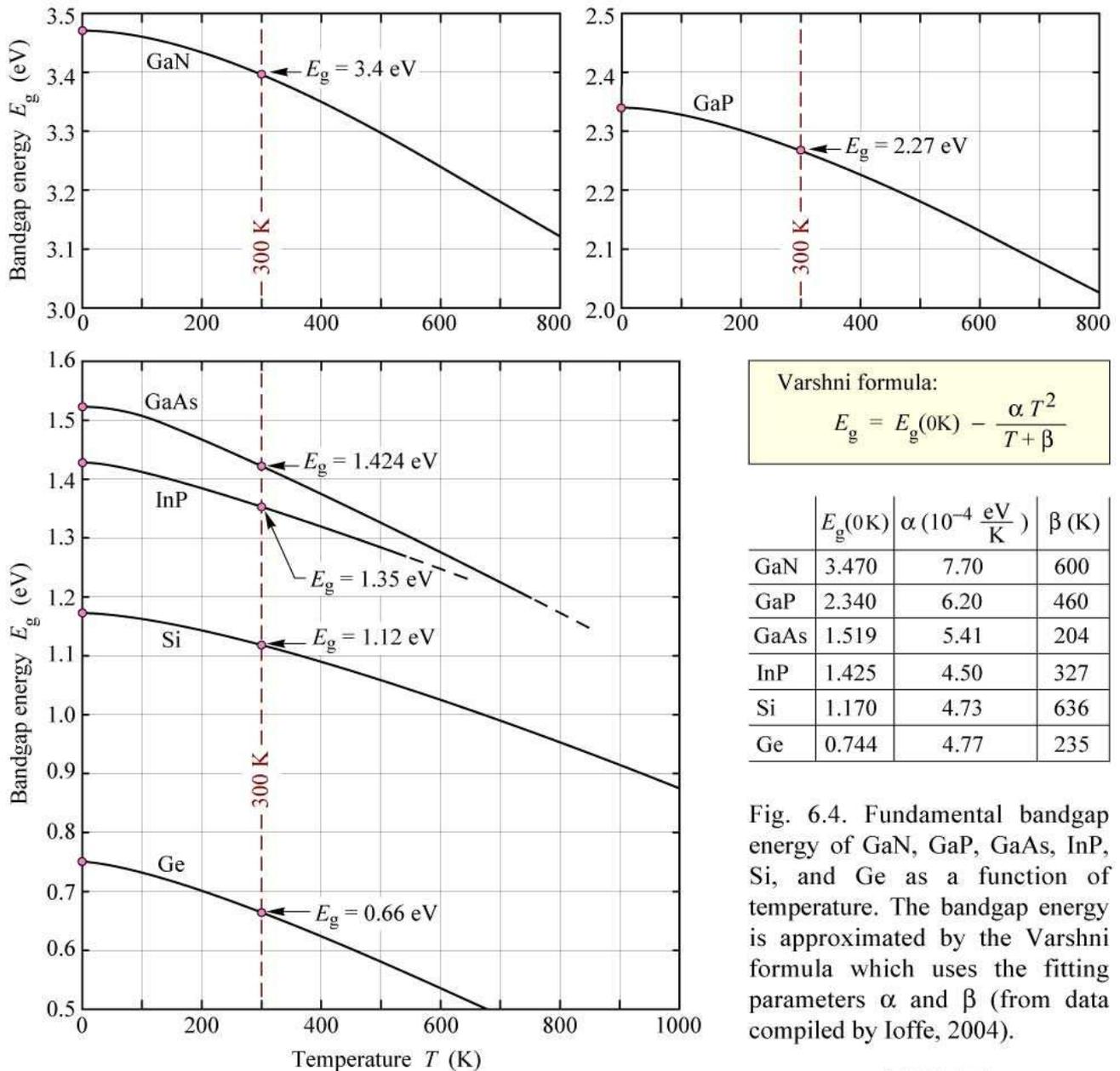


Fig. 6 – andamento di E_g con la temperatura per alcuni semiconduttori puri

Quando la cella viene illuminata con fotoni di frequenza $\nu \gg \frac{E_g}{h}$ la giunzione diviene una sorgente di coppie elettrone-lacuna (lacuna verso il lato p; elettrone verso il lato n). A cella aperta, questo flusso di cariche genera ai capi della cella stessa una differenza di potenziale, con il materiale di tipo p che si carica positivamente rispetto a quello n. La tensione ai capi della cella raggiunge, nella condizione a circuito aperto, un valore tale che la polarizzazione diretta che risulta ai capi della giunzione sia tale da consentire il passaggio attraverso questa di una corrente pari a quella fotogenerata. Se la cella viene chiusa su un carico esterno R, questo viene a trovarsi in parallelo

rispetto alla giunzione. Il circuito equivalente della cella è allora quello mostrato in figura 8. la corrente I_L è quella generata dalla luce: la sua intensità risulta proporzionale al numero di fotoni per cui $\nu > \frac{E_g}{h}$. Fissato lo spettro della luce incidente, I_L risulta anche proporzionale alla intensità ϕ della radiazione incidente. I_D è la corrente che attraversa la giunzione della cella: la sua espressione, in funzione di V è data dalla formula $I_D = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$. I è la corrente che fluisce nel carico. R_s , detta resistenza serie, è la resistenza parassita della cella, e comprende la resistenza dei due strati di materiale che costituiscono la cella e la resistenza ohmica dei contatti stessi. L'equazione caratteristica della cella illuminata diviene dunque

$$I = I_L - I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (E4)$$

Ovvero risolvendo rispetto a V

$$V = \frac{kT}{q} \ln\left[\frac{I_L - I + I_0}{I_0}\right] \quad (E5)$$

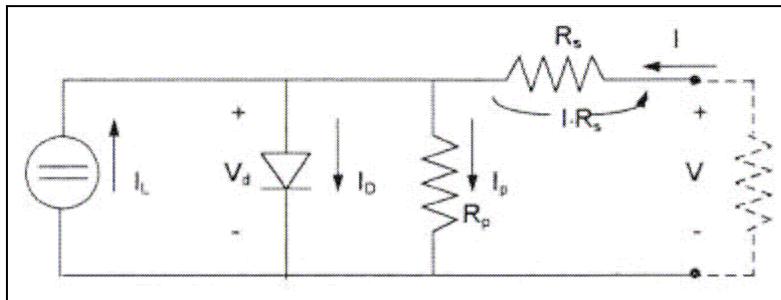


Fig. 8 – circuito equivalente della cella illuminata chiusa su un carico

Va notato che se R_s non è trascurabile, V che rappresenta la differenza di potenziale ai capi del diodo, non coincide con il potenziale V_R che la cella trasmette al carico. Quanto maggiore è la resistenza serie tanto più V_R si discosta da V . Se la R_s è sufficientemente elevata, la potenza ottenibile da una cella solare diminuisce notevolmente e la caratteristica esterna della cella mostra una forma meno squadrata. Tuttavia, accade spesso che R_s sia trascurabile e quindi $V \approx V_R$.

Graficamente, l'andamento tipico di tale curva caratteristica, fissata l'illuminazione, è quello mostrato in figura9. La corrente I_{cc} per $V_R = 0$ è detta corrente di corto circuito, ed è la massima corrente che la cella può erogare fissata l'illuminazione. Nell'approssimazione $V \approx V_R$ (cioè

quando R_s è trascurabile) risulta dalla equazione caratteristica della cella illuminata che

$$I_{cc} = I_L = a\phi \quad (E6)$$

I_{cc} risulta dunque proporzionale alla illuminazione della cella. questa approssimazione ($V \approx V_R$, e quindi $I_{cc} = I_L$ proporzionale alla illuminazione a parità di spettro) è praticamente sempre valida per le celle utilizzate in sistemi fotovoltaici a pannelli piani. Essa va invece presa con molta cautela nei sistemi a concentrazione, in cui l'illuminazione della cella viene moltiplicata per grossi fattori (fino a cinquecento) o, come anche si dice, l'illuminazione è di 500 e più "soli".

V_{oc} è invece la differenza di potenziale ai capi della cella per $I=0$, cioè a circuito aperto. Ponendo $I=0$ nella equazione caratteristica della cella illuminata risolta rispetto a V si trova:

$$V_{oc} = NV_T \ln \frac{I_L + I_0}{I_0} \quad (E7)$$

Anche V_{oc} dipende dalla corrente di illuminazione e quindi dalla intensità di ϕ della radiazione incidente. La dipendenza, tuttavia, è in questo caso logaritmica, e quindi assai debole. L'andamento tipico della caratteristica in funzione della illuminazione è mostrato in figura 10.

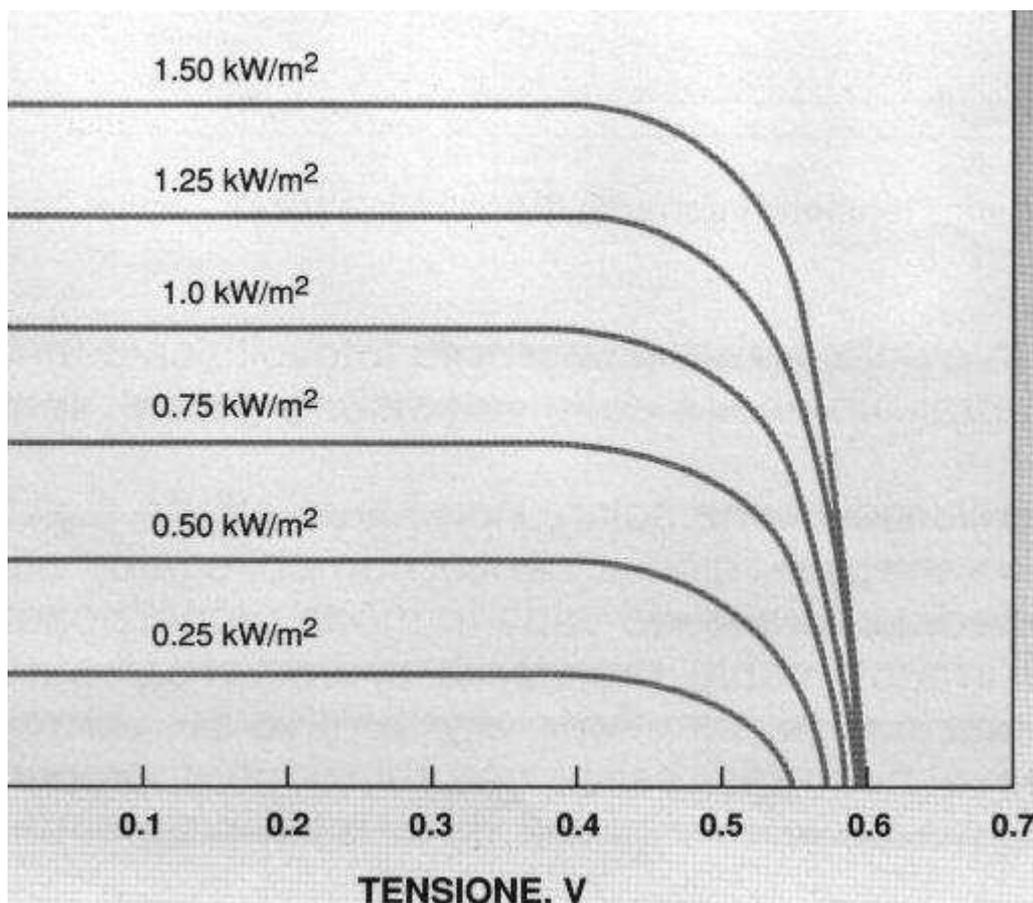


Fig. 10 – caratteristica di una cella fotovoltaica illuminata, al variare della intensità di illuminazione

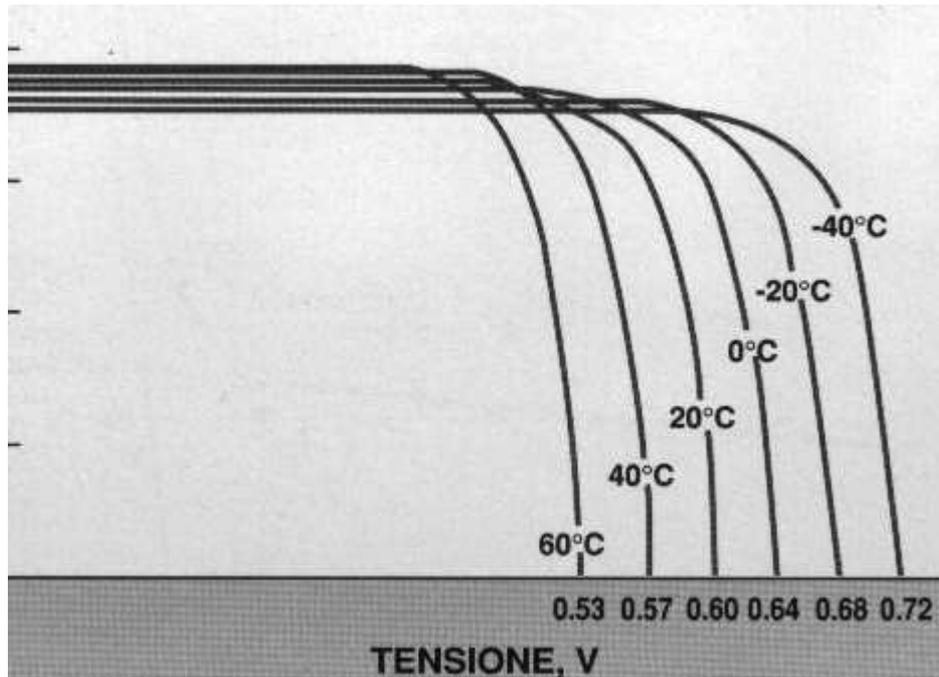


Fig. 11 – caratteristica di una cella fotovoltaica illuminata, al variare della temperatura.

È interessante notare come varia la caratteristica di una cella fotovoltaica al variare della temperatura.

Trascurando nella (E7) I_0 rispetto a I_L , e sostituendo a I_0 la sua espressione (E3) si ottiene

$$V_{oc} = \frac{NKT}{q} \ln \frac{I_L}{A_0 T^3 e^{-\frac{E_g}{KT}}} \quad (E8)$$

Trascurando sotto il segno di logaritmo, la dipendenza di I_L ed E_g da T , e derivando V_{oc} rispetto a T , si trova, con semplici passaggi

$$\frac{dV_0}{dT} = \frac{NK}{q} \left(\ln \frac{I_L}{I_0} - 3 + \frac{E_g}{KT} \right) \quad (E9)$$

Nel caso del silicio, $\frac{E_g}{KT}$, per valori ragionevoli della temperatura, ha un valore prossimo a 40, che

non può mai essere compensato dal termine $\ln \frac{I_L}{I_0}$ che ha segno rispetto ad esso opposto; essa è una

funzione fortemente crescente della temperatura, come risulta dalla (E3).

Dalla figura 6, risulta che E_g diminuisce all'aumentare della temperatura. Ciò comporta che una frazione maggiore dello spettro solare contiene fotoni sopra-soglia cioè per cui $h\nu \gg E_g$, con conseguente aumento della corrente I_{cc} a parità di intensità di illuminazione. In conclusione, ci

aspettiamo dunque che all'aumentare della temperatura diminuisca da un lato V_{OC} ma aumenti I_{cc} almeno quando lo spettro di luce incidente è uno spettro continuo come quello solare.

1.5 Efficienza delle celle solari

L'efficienza di una cella commerciale al silicio è tipicamente compresa fra il 10 e il 15%. La maggior parte degli altri tipi di celle presenta un'efficienza minore; e solo alcune celle per concentrazione, assai costose e realizzate per ora solo in campioni di laboratorio, hanno toccato efficienze dell'ordine del 20% ed anche leggermente superiore.

Le cause di inefficienza sono molte, e possono essere classificate in quattro principali categorie:

- ▶ a- inefficienza di penetrazione dei fotoni all'interno della cella.
- ▶ b- inefficienza di conversione dell'energia dei fotoni in energia della coppia elettrone-lacuna.
- ▶ c- inefficienza di conversione dell'energia posseduta dalle coppie elettrone-lacuna in energia elettrica.
- ▶ d- inefficienza di trasferimento al carico della energia fotoelettrica prodotta.

Consideriamo questi vari tipi di contributi all'inefficienza con qualche maggior dettaglio.

(a) Non tutti i fotoni incidenti sulla cella fotovoltaica penetrano al suo interno: in parte infatti vengono riflessi sulla superficie della cella, e in parte vengono intercettati dall'elettrodo frontale che pur essendo realizzato in modo da coprire in piccola parte la faccia frontale della cella, ne ombreggia comunque una parte della superficie.

Il silicio monocristallino ha un indice di rifrazione molto alto ($n \approx 3.4$), la interfaccia frontale aria-silicio tenderebbe dunque a riflettere indietro una rifrazione notevole della radiazione incidente: oltre il 30% nel caso di luce solare. Per limitare quanto più possibile questa fonte di inefficienza, la cella viene rivestita con qualche materiale di indice di rifrazione intermedio tra quello del silicio con quello dell'aria.

Questo raccordo ottico può essere ulteriormente migliorato dal materiale utilizzato per inglobare la cella nei moduli. In un modulo ben fatto, l'efficienza di penetrazione della luce nella cella può essere dell'ordine di 0.92. L'effetto di ombreggiatura dell'elettrodo frontale dipende ovviamente dalla sua geometria che deve realizzare un compromesso fra lo schermo che esso presenta alla luce incidente e la efficienza di raccolta delle cariche fotogenerate (efficienza che è uno degli elementi che influenzano la resistenza serie della cella). Nelle celle commerciali da usare senza concentrazione, normalmente l'elettrodo frontale intercetta circa il 7-10% della radiazione

incidente; il suo coefficiente di trasmissione è pertanto superiore al 90%. L'effetto schermo dell'elettrodo frontale e della riflessione all'interfaccia aria-cella è pertanto compreso tra il 10 e il 15%.

(b) Non tutta l'energia posseduta dai fotoni che penetrano nella cella può essere convertita in energia potenziale della coppia elettrone-lacuna. Come abbiamo già accennato in precedenza, i fotoni sotto soglia, per cui cioè $h\nu < E_g$, non possono produrre una coppia elettrone-lacuna, mentre nel caso di fotoni sopra soglia, la coppia elettrone-lacuna, pur nascendo con energia $h\nu$, dissipa rapidamente in effetti termici – e quindi in modo non utile al fine della conversione in energia elettrica – l'eccesso di energia $h\nu - E_g$.

L'efficienza di conversione dell'energia dei fotoni in energia della coppia elettrone-lacuna (efficienza quantica) dipende dunque, chiaramente, dal valore della banda proibita E_g , e quindi dal tipo di giunzione e dalla temperatura. Inoltre, essa dipende dalle caratteristiche della luce incidente. In particolare, nel caso della luce solare, l'efficienza quantica dipende dalle condizioni atmosferiche e dall'altezza del sole sull'orizzonte; parametri da cui dipende (se pure fortunatamente in modo da non incidere molto sulla efficienza), lo spettro solare al livello del suolo. In quanto segue faremo riferimento allo spettro solare AMI (Air Mass One), cioè lo spettro solare quale si ha per sole allo zenit a livello del mare ed atmosfera standard.

Lo spettro AMI è mostrato in figura 12.

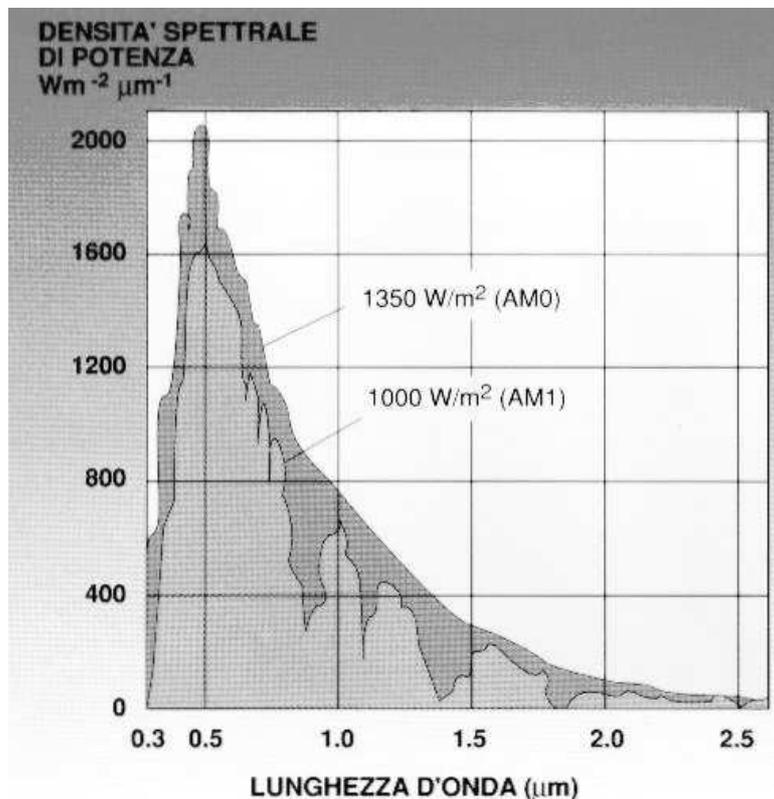


Fig. 12a – variazione densità spettrale rispetto alla lunghezza d'onda.

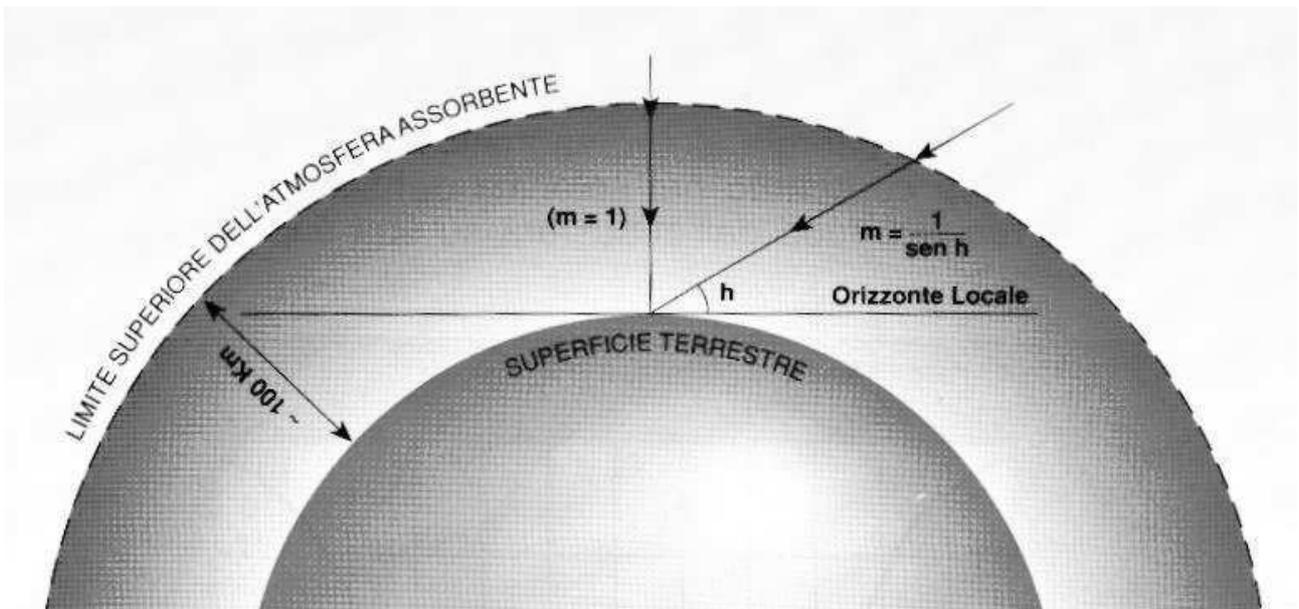


Fig. 12b – determinazione dello spettro solare

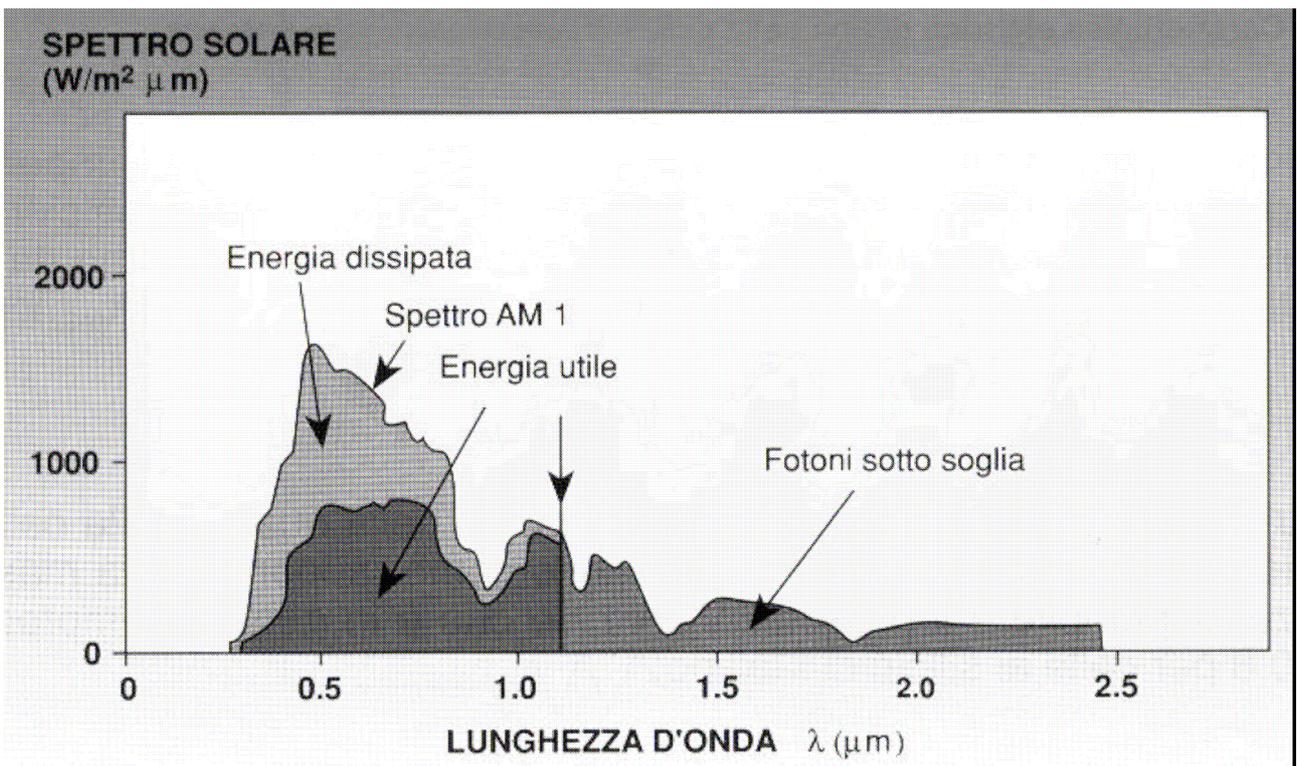


Fig12 – lo spettro solare AM1. Viene indicata anche la soglia di generazione di coppie elettrone-lacuna in silicio. La porzione di spettro sotto soglia viene indicata nella parte più a destra della figura, mentre è rappresentata a sinistra e in alto la zona che indica l'effetto di dissipazione di energia $h\nu - E_g$ da parte delle coppie generate da fotoni sopra soglia. In basso a sinistra è rappresentata la porzione di energia luminosa convertita in energia elettrica.

I fotoni utili sono quelli per cui $h\nu > E_g$, cioè $\nu > \frac{E_g}{h}$. Per il silicio a temperatura ambiente,

$E_g \approx 1.12 \text{ eV} \approx 1.75 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$. Tenuto conto inoltre della relazione che lega λ a ν ($h\nu = hc/\lambda$), si ha che risultano sotto soglia di creazione della coppia elettrone-lacuna tutti i fotoni dello spettro per cui

$$\lambda > \frac{hc}{E_g} = 1.15 \text{ } \mu\text{m}$$

La parte dello spettro inefficace perché sotto soglia per il silicio è stata indicata nella figura 12. A causa di questo effetto, solo il 75% circa dello spettro solare risulta utile al fine della creazione di coppie elettrone-lacuna.

L'altra sorgente di inefficienza connessa con la monocromaticità dello spettro di radiazione incidente è la dissipazione termica dell'eccesso di energia $h\nu - E_g$ posseduta dagli elettroni generati da fotoni sopra soglia. Questa dissipazione di energia è rappresentata dalla porzione gialla dello spettro in figura 12. In media, circa il 42% dell'energia dei fotoni sopra soglia va dissipata in questo modo, per cui il 58% della loro energia resta utile per la conservazione di energia elettrica. Sommando questi due effetti, la sola non monocromaticità dello spettro incidente pone un limite superiore alla efficienza teoricamente ottenibile con una cella al silicio dato da

$$\eta_q = 0.58 \times 0.75 = 0.44 .$$

(c) Solo una parte dell'energia E_g acquisita dall'elettrone che è saltato in banda di conduzione viene trasformata in energia elettrica ai capi del carico. I principali effetti che contribuiscono a questa fonte di inefficienza sono due: i) alcune coppie elettrone-lacuna si ricombinano prima di essere separate dal campo elettrico di giunzione (perdite per ricombinazione); ii) nelle coppie che vengono separate, una parte della loro energia potenziale è inefficace ai fini della conservazione in energia elettrica, sicché la tensione a vuoto della cella (V_{OC}) risulta inferiore ad E_g/q . Chiameremo queste perdite "fattore qV_{OC}/E_g ". Le perdite per ricombinazione dipendono soprattutto dalla purezza del silicio. In linea di principio, esse possono essere ridotte a valori trascurabili, come è stato dimostrato fra l'altro in prototipi realizzati in laboratorio; nella pratica, tuttavia, occorre trovare un compromesso fra l'efficienza e il costo, e ciò impone l'uso del silicio a basso costo ma con un contenuto di impurezze limitato. Nelle celle commerciali, le perdite per ricombinazione riducono l'efficienza della cella di un fattore almeno 0.80. Nel vicino futuro, il maggiore sforzo tecnologico non sarà indirizzato a diminuire queste perdite ma a non aumentare pur diminuendo il costo delle celle. Il fattore qV_{OC}/E_g dipende dalla quantità e dalla qualità del drogante. Nelle normali celle, qV_{OC}/E_g è dell'ordine di 0.62.

(d) La quarta fonte di inefficienza è dovuta alla necessaria partizione della corrente I_L (prodotta dalla radiazione incidente) fra il carico e il diodo interno alla cella. In conseguenza di ciò, se si porta la tensione di uscita al massimo valore $V_R = V_{OC}$ si ha corrente nulla nel carico; mentre se si vuole portare la corrente al valor massimo I_{CC} occorre porsi in condizioni di tensioni al carico nulla (vedi figura 11). In entrambi questi casi estremi la potenza erogata è nulla. La condizione di lavoro ottimale per la cella è rappresentata da quel punto M della caratteristica per cui il prodotto $V_M I_M$ risulta massimo.

Il rapporto $\frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{CC}}$ viene detto fill-factor (fattore di riempimento) della cella, e nelle normali celle vale intorno a 0.75. Va notato che molto spesso, in condizioni di lavoro, la cella può venire portata per motivi vari a lavorare fuori dal punto ottimale di lavoro (ad esempio al variare dell'illuminazione, o della temperatura, ecc.). Solo in sistemi progettati e realizzati con molta cura, e mediante inserimento di dispositivi particolari di regolazione (power-tracking: dispositivi di inseguimento del punto di massima potenza) si riesce a mantenere la cella in condizioni ottime di lavoro (matched load condition). Le altre perdite di potenza nel trasferimento di I_L al carico e conseguenti alla presenza di una resistenza serie, possono essere di solito trascurate.

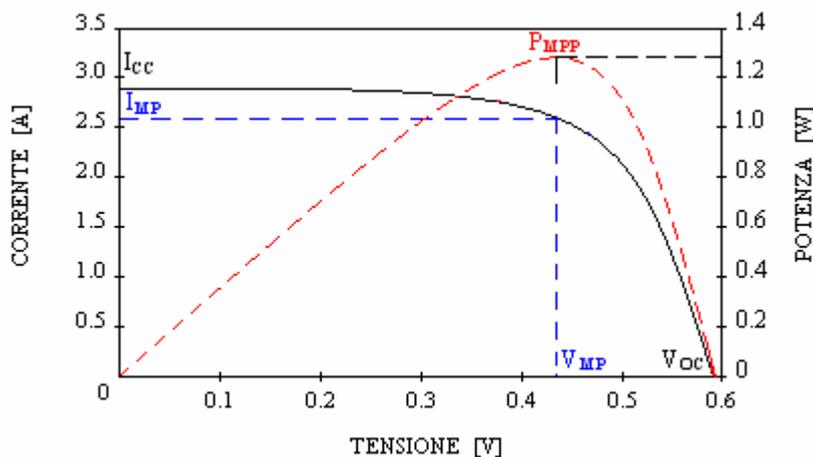


Fig. 13 – Andamento tipico della curva caratteristica di una cella illuminata. L'andamento della potenza della cella è rappresentato in rosso. È rappresentato anche il punto M di massima potenza sulla caratteristica della cella. L'area tratteggiata in blu rappresenta la massima potenza estraibile dalla cella fissato I_{CC} (cioè fissata l'illuminazione). Il

rapporto $\frac{I_m V_m}{I_{CC} V_{OC}}$ viene detto "fill factor".

Riassumendo, l'efficienza di una buona cella al silicio risulta composta dai seguenti fattori principali:

- Efficienza di penetrazione della luce (η_p)	0.86
- Efficienza quantica (η_q)	0.44
- Efficienza di ricombinazione (η_r)	0.80
- Fattore $\frac{qV_{OC}}{E_g}$ (η_E)	0.62
- Fill-factor (η_F)	0.75
- Efficienza complessiva	0.14

Il prodotto $\eta_q \cdot \eta_E \cdot \eta_F$ (escludendo cioè l'efficienza di penetrazione della luce e l'efficienza di ricombinazione) viene spesso preso come indice della massima efficienza η_M ottenibile per un determinato tipo di cella.

1.6 Collegamento in serie delle celle.

Il circuito equivalente di n celle collegate in serie è mostrato in figura 14.

L'equazione di continuità della corrente, Secondo Principio di Kirkhoff, impone che la corrente I erogata da ogni cella verso l'esterno sia la stessa per tutte le celle della serie. Tuttavia solo nel caso in cui tutte le celle siano identiche risulteranno fra di loro identiche anche tutte le I_{cci} da un lato e dall'altro tutte le I_{oi} .

Analogamente, le varie tensioni V_i che si sommano a dare la tensione V al carico, saranno tra loro uguali solo nel caso che le celle siano tra loro identiche e si trovino nelle stesse condizioni di illuminazione e temperatura.

La tensione ai capi del carico avrà la seguente espressione (considerando $N=1$):

$$V = V_T \sum_{i=1}^n V_i = V_T \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{I_{cci} - I + I_{oi}}{I_{oi}}\right) \quad (E10)$$

Quest'equazione è da prendere in considerazione però solo nei casi di celle uguali sia come caratteristiche sia come illuminazione. Quando queste condizioni non sono verificate possiamo ottenere la caratteristica della serie operando così come viene esemplificato per il caso di tre celle, in figura 15.

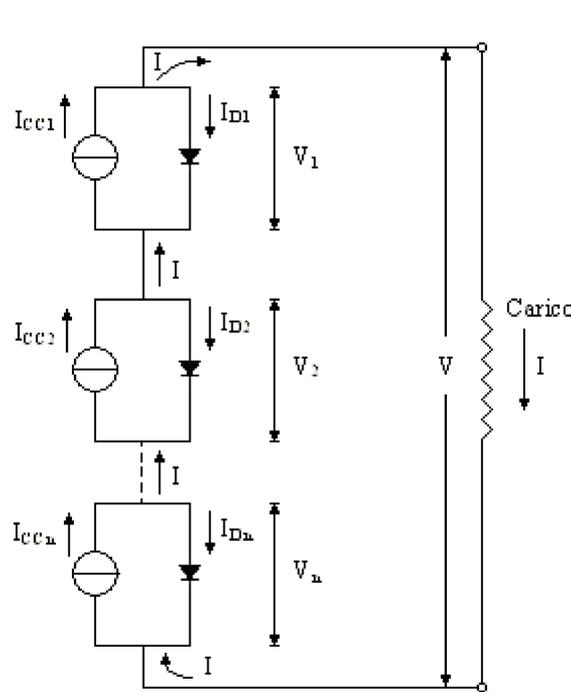


Fig. 14 – circuito equivalente di n celle in serie

Per ogni valore della corrente richiesta dal carico, si traccia una retta orizzontale ($I=\text{cost}$): la tensione della serie è pari alla somma delle tensioni erogate separatamente dalle tre celle per quel valore di corrente.

Quando alla serie di celle viene richiesta una corrente I maggiore della corrente di corto circuito della cella con caratteristica più bassa, quest'ultima ovviamente non è in grado di erogare tale corrente.

Si noti tuttavia che la retta orizzontale corrispondente alla situazione $I_2=\text{cost}$, interseca la caratteristica della cella a bassa corrente di corto circuito nel secondo quadrante. In tale quadrante la cella in oggetto funziona da carico e non da generatore. La tensione ai suoi capi si è, infatti, invertita di segno mentre la corrente non ha cambiato segno.

Nel caso riportato in figura, se è richiesta in uscita una corrente I_2 , la tensione in uscita sarà pari alla somma delle tensioni erogate dalle singole celle meno la tensione sulla cella che funziona da carico, se tale somma risulta positiva è ancora possibile che la corrente I_2 sia erogata dalla serie di celle.

In tale caso la cella contropolarizzata funzionando da carico può assorbire anche una potenza considerevole ed il riscaldamento che in essa ha luogo per effetto Joule può danneggiare non solo la cella ma anche il materiale plastico utilizzato per inglobarla.

La tensione di rottura della cella è detta tensione di break-down ed oscilla per le celle commerciali tra i 20 e i 50V. Considerando che ogni cella può fornire una tensione intorno a 0,5V, saranno necessarie da 40 a 100 celle in serie perché si abbia il fenomeno del break-down della cella

contropolarizzata, quindi nei normali pannelli (che hanno circa 36 celle in serie) questo non avviene.

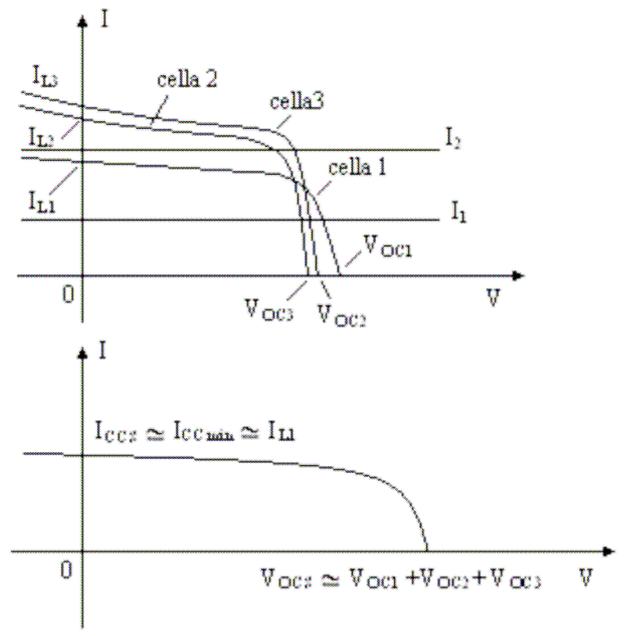


Fig. 15 – costruzione grafica della caratteristica della serie di tre celle le cui caratteristiche sono singolarmente rappresentate nella parte alta. Nella parte bassa è rappresentata la caratteristica della serie.

In sintesi si può affermare che una serie di celle ha un comportamento qualitativamente simile a quello di una singola cella che abbia tensione a circuito aperto (per $I = 0$) pari alla somma delle tensioni a circuito aperto delle singole celle, e una corrente in corto circuito in pratica coincidente con la corrente di corto circuito della cella che eroga la corrente più bassa.

Le equazioni che riassumono il comportamento di una serie di n celle sono:

$$V_{ocs} \approx \sum_i V_{oci} \tag{E11}$$

$$I_{ccs} \approx (I_{cci})_{\min}$$

Ove il pedice s indica che ci si riferisce alla corrente ed alla tensione della serie di celle.

Pertanto solo nel caso di celle identiche fra loro, una serie eroga una potenza uguale alla somma delle potenze erogate dalle singole celle; in generale invece, la serie eroga una potenza uguale a n volte quella erogata dalla cella di potenza minima.

Consideriamo ora una serie di n celle, le cui caratteristiche supponiamo siano praticamente identiche. In questo, la E11 diviene

$$V = nV_i = nV_T \ln \left(\frac{I_{cci} - I + I_{oi}}{I_{oi}} \right) \tag{E12}$$

Si vede che la serie si comporta come una cella che per ogni valore della corrente eroghi una tensione n volte maggiore rispetto a quella erogata da ogni singola cella. La caratteristica della serie può dunque essere ottenuta dalla caratteristica della cella singola semplicemente moltiplicando per n la scala delle ascisse (vedi figura 16).

1.6.1 Oscuramento o rottura di una delle celle della serie

Supponiamo ora che una fra le celle di una serie costituita da celle identiche venga oscurata (ad esempio a causa di una ombreggiatura accidentale). Ricordando l'equazione caratteristica della cella ideale:

$$I = I_{cc} - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_r}} - 1 \right) \quad (E13)$$

e tenendo presente che in caso di oscuramento risulta $I_{cc}=0$, si ha che la caratteristica della cella oscurata è quella di un normale diodo a semiconduttore. Si ha che la corrente di tutta la serie viene ridotta al valore I_o . La prima conclusione che traiamo che basta oscurare una sola delle celle di una serie per ridurre a valore trascurabili la corrente erogata dall'intera serie. Anche la potenza erogata dalla serie diviene così trascurabile. Graficamente il fenomeno è illustrato in figura 16.

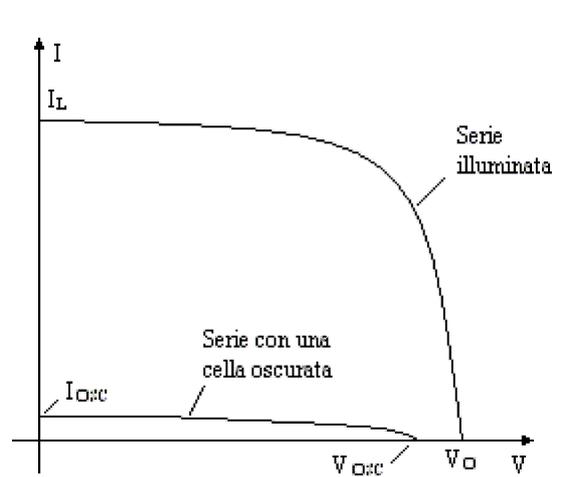


Fig. 16 – caratteristica di una serie di celle tutte illuminate, e della stessa serie quando una sola cella è oscurata.

Si nota facilmente che mentre nel caso della serie con tutte le celle illuminate è $I_{ccs} = I_{cci}$ e $V_{ocs} = nV_{oc}$, nel caso che una cella sia oscurata si ha $I_{osc} \approx I_o$ e $V_{osc} = (n-1)V_{oc}$.

1.7 Celle in parallelo

Il circuito equivalente di n celle in parallelo è mostrato nella figura seguente:

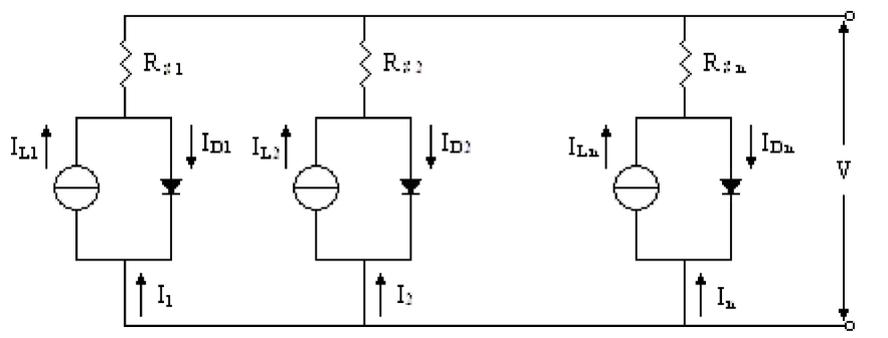


Fig. 17 – circuito equivalente di n celle in parallelo.

La curva caratteristica può essere, come nel caso di celle in serie, determinata sia analiticamente che graficamente.

Per ciascuna delle celle, si può scrivere l'equazione (E13)

$$I_i = I_{cci} - I_{oi} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{E14})$$

dove V è la tensione comune a tutte le celle del parallelo.

Eseguendo la somma membro a membro si ottiene

$$I = \sum I_i = \sum I_{cci} - \sum I_{oi} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{E15})$$

Ovvero, esprimendo rispetto a V :

$$V = V_T \ln \frac{\sum I_{cci} - I + \sum I_{oi}}{\sum I_{oi}} \quad (\text{E16})$$

La (E15), o la (E16) rappresentano l'equazione caratteristica del parallelo delle n celle.

Da queste si vede che il parallelo si comporta come una unica cella che ha come corrente inversa di saturazione, la somma delle correnti inverse di saturazione delle singole celle I_{oi} e come corrente di corto circuito la somma delle medesime delle singole celle.

La tensione a vuoto si ottiene analiticamente annullando la corrente I nelle precedenti espressioni, oppure per via grafica, in maniera analoga alla serie (vedi figura 18).

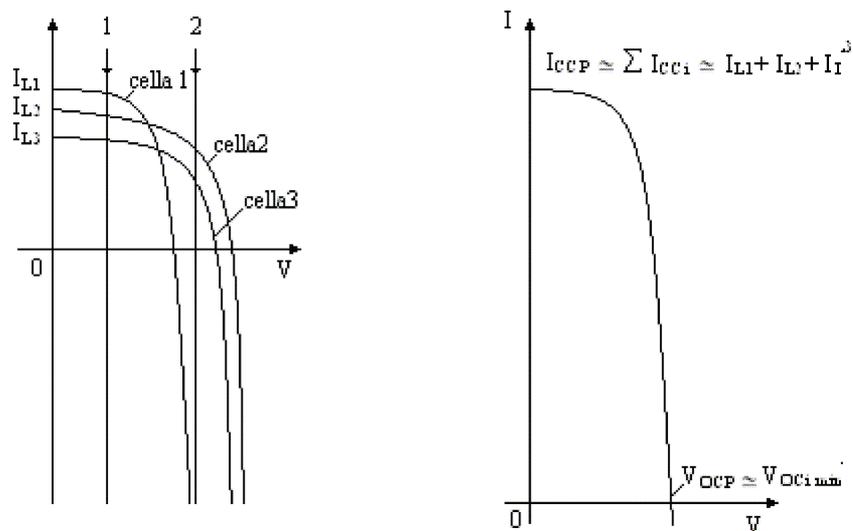


Fig. 18 – costruzione grafica della caratteristica del parallelo di tre celle.

Come si vede, il parallelo ha una caratteristica analoga a quella di una singola cella che abbia come corrente di corto circuito la somma delle correnti di corto circuito delle singole celle, e come tensione a circuito aperto una tensione molto vicina a quella della cella peggiore (cioè della cella che ha la più bassa tensione a circuito aperto).

In altri termini, si può dire che

$$I_{ccp} = \sum I_{cci} \tag{E17}$$

$$V_{ocp} = (V_{oci})_{\min}$$

Nel caso di n celle fra di loro identiche, si ottiene la caratteristica del parallelo moltiplicando per n la scala delle ordinate (corrente) a partire dalla caratteristica della cella singola.

Analiticamente, abbiamo

$$I = nI_{cc} - nI_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \tag{E18}$$

Se una cella viene oscurata, viene a mancare il contributo della sua corrente di illuminazione; mentre resta il contributo della sua corrente di diodo che è negativo. Se le celle sono tutte uguali, la curva caratteristica dell'intero parallelo diviene

$$I = (n-1)I_{cc} - nI_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \tag{E19}$$

In condizioni normali di lavoro, la corrente di diodo $I_0 \left(e^{\frac{v}{V_T}} - 1 \right)$ è notevolmente più piccola della corrente di illuminazione I_{cc} . Per n abbastanza grande la (E19) diventa

$$I \approx (n-1)I_{cc} - (n-1)I_0 \left(e^{\frac{v}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{E20})$$

da cui si può concludere che quando una cella è oscurata, il parallelo di n celle si comporta come se fosse un parallelo di $(n-1)$ celle illuminate.

Possiamo notare, quindi, che il funzionamento del parallelo è meno drasticamente influenzato dalla uscita di servizio di una cella di quanto non accada per la configurazione serie. Però la tensione di uscita del parallelo, pari alla tensione della singola cella è dell'ordine di mezzo volt, e quindi inadeguata ai fini della maggior parte delle esigenze applicative. Quest'ultima osservazione rappresenta il maggior inconveniente della configurazione serie.

CAPITOLO 2

INTERAZIONE FRA RADIAZIONE SOLARE E PANNELLO FOTOVOLTAICO- EFFETTO DELLA TEMPERATURA.

Un pannello ha, sulla faccia esposta al sole, una superficie trasparente la quale protegge le celle fotovoltaiche, comunemente costituita da una lastra di vetro.

La radiazione che raggiunge il pannello si suddivide nel modo seguente: una parte viene riflessa mentre la parte rimanente (cioè $I_C = I(1 - r)$) penetra nel vetro, attraversa gli strati sottostanti di materiale senza subire assorbimento o riflessioni rivelanti e raggiunge la cella.

Se indichiamo con η_c il rendimento di conversione della cella (misurata in assenza di vetro di protezione e per radiazione incidente normalmente alla cella), allora la potenza convertita in elettricità è $I_e = I_C \eta$.

La parte non convertita della radiazione può essere divisa in due parti: una parte attraversa la cella, senza interazione e raggiunge il contatto posteriore e può essere riemessa dal pannello e l'altra assorbita dal contatto stesso trasformandosi in calore all'interno di esso.

La parte assorbita dalla cella e trasformata in calore è data da $I_T = I_C(1 - \eta)$.

Noto I_T si può calcolare la temperatura della cella adottando un modello che tenga conto dei soli fenomeni di convezione fra pannello e aria esterna in presenza di vento.

Tuttavia, esiste una notevole incertezza nella stima della radiazione che si converte in calore, I_T , la quale dipende dalla tecnologia di fabbricazione delle celle, inoltre, si ha una notevole variabilità nel modo in cui diversi moduli scambiano calore con l'ambiente esterno. Per queste ragioni si preferisce basare il calcolo della temperatura delle celle in un pannello esclusivamente su base sperimentale attraverso la formula seguente:

$$T_C = T_{amb} + (NOCT - 20) \frac{I_C}{0.8} \quad (E21)$$

ove T_{amb} è la temperatura ambiente espressa in gradi celsius ; *NOCT* (Nominal Operating Cell Temperature) che viene misurata convenzionalmente con temperatura ambiente di 20°C, radiazione incidente perpendicolarmente sul pannello di 0.8 kw/m^2 , velocità del vento 1 m/s e in condizioni di circuito aperto.

2.1 Prestazioni elettriche e ottiche dei moduli

Nelle reali condizioni di funzionamento, ci sono molto parametri che influenzano le prestazioni elettriche dei moduli, causando perdite di efficienza. possiamo citare quattro fattori principali di perdita di efficienza:

a) distribuzione angolare della luce

A causa del moto del sole e delle componenti diffuse della radiazione, la luce non incide perpendicolarmente sul modulo, mentre le misurazioni e il calcolo dell'efficienza nominale sono fatti con luce incidente normalmente sul modulo.

b) Contenuto spettrale della luce

Lo spettro della luce del sole varia con la sua posizione, la risposta spettrale della cella varia al variare dello spettro.

c) Irradianza del sole

A temperatura costante, la efficienza del modulo decresce con il diminuire dell'irradianza.

d) Temperatura della cella

La temperatura dell'ambiente varia e a causa dell'isolamento termico fornita dall'incapsulamento, la luce del sole provoca un riscaldamento del modulo.

Un aumento di temperatura significa riduzione di prestazione.

Questo fattore costituisce il più importante nella perdita di efficienza. Studiamo un modello di calcolo che ci permetta di simulare e determinare con più precisione le prestazioni reali di un modulo.

CAPITOLO 3

Codice di calcolo "AQUILA" per la simulazione delle prestazioni reali di un modulo fotovoltaico piano.

È un codice basato sull'applicazione di cinque modelli indipendenti di perdita energetica, mediante i quali vengono analizzati i cinque effetti fondamentali che sono alla base delle reali prestazioni del modulo fotovoltaico. Questa operazione ci permette poi di determinare qual è il datasheet (dati di targa) di un modulo fotovoltaico.

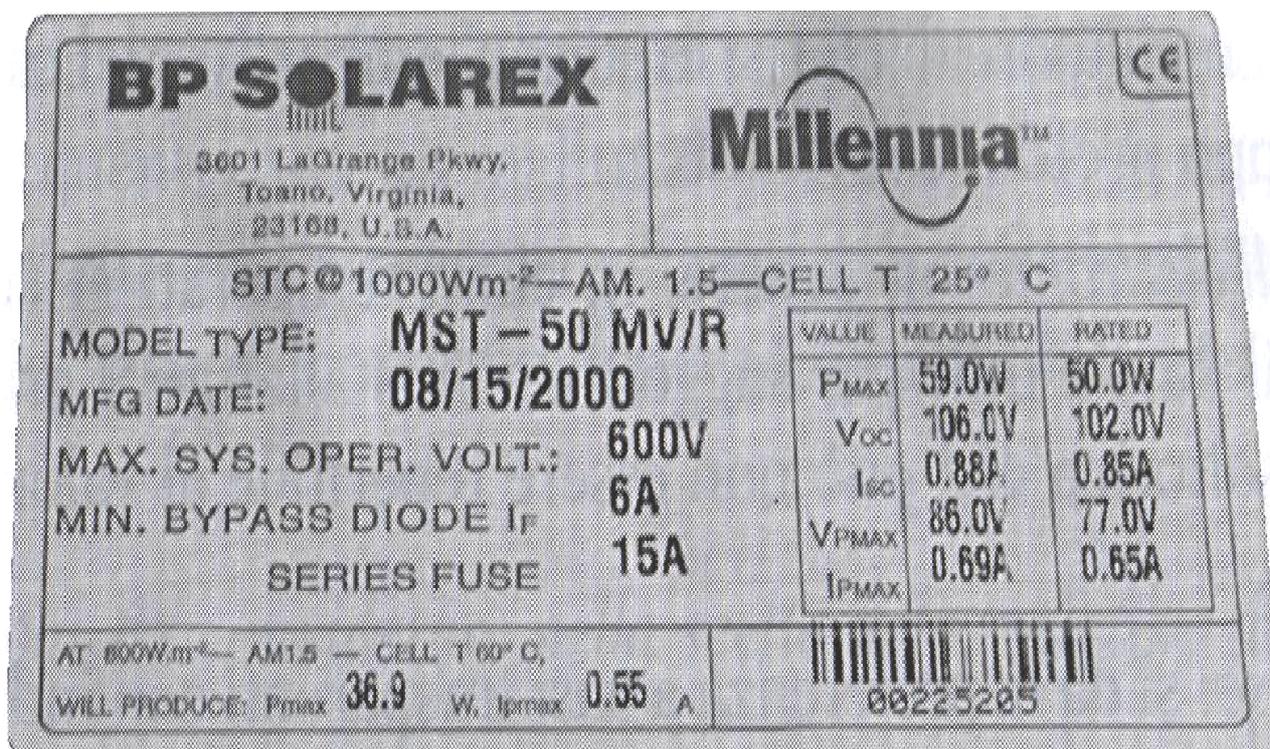


Fig. 19 – dati di targa di un modulo fotovoltaico di 36 celle in serie.

La condizione in cui si opera per ottenere i dati di targa è STC(Standard Test Condition),quindi ci sono situazioni ben precise da rispettare:

- ✓ Luce ad incidenza normale
- ✓ Luce non polarizzata

- ✓ Spettro AM1.5G
- ✓ Intensità di 1000 W/m^2
- ✓ Temperatura di 25^0 C

E' chiaro che in condizioni reali(outdoor)è impossibile poter rispettare tutti questi punti; è per questo che c'è una divergenza,spesso considerevole,tra i dati presenti sul datasheet e ciò che effettivamente accade in condizione operative esterne.

I moduli sono divisi in diverse classi in base alle prestazioni che sono in grado di offrire;dato un modulo,una volta che si è accertato a quale classe appartenga, i dati di targa presenti è raro che siano proprio di quel modulo;infatti spesso vengono inseriti valori che sono il risultato della media per quella classe.

In laboratorio viene utilizzato il simulatore solare,capace di emanare un'irradianza di 1000 W/m^2 . I moduli fotovoltaici in commercio vengono testati in base alla normativa IEC61215(c-Si) o IEC61646(a-Si), per determinarne le caratteristiche elettriche e meccaniche. I test al simulatore solare forniscono la caratteristica I/V in condizioni di insolazione standard, e quindi le grandezze η_{STC} , V_{OC} , I_{SC} , V_m , P_m (espressa in W_p , ovvero Watt di picco). La NOCT(Normal Operating Cell Temperature)è la temperatura raggiunta da un modulo fotovoltaico irraggiato a 800 W/m^2 , a $T_{amb}=20^0 \text{ C}$ e con $v_{vento}=1 \text{ m/s}$.

NOTA: per comodità, d'ora in avanti nel corso di questa tesi, indicherò il modulo fotovoltaico con FV, le Standard Test Condition con STC e le Real Reporting Condition (condizioni reali, outdoor) con RRC.



Fig. 20 – simulazione di prestazione di un modulo fotovoltaico in laboratorio.

Lo spettro della luce del simulatore deve coincidere al meglio con quella della radiazione globale misurata a cielo sereno con AirMass=1.5.

A tal fine si impiegano simulatori solari con lampade allo Xenon, opportunamente filtrate.

3.1 Potenza STC e RRC

Come precedentemente accennato, la potenza varia a seconda delle condizioni in cui ci si trova; una volta che si ha a disposizione l'efficienza del modulo in condizioni reali e quella in condizioni standard, si può facilmente ricavare le rispettive potenze erogabili nel modo seguente:

$$P_{ero} = \eta_{STC} \cdot G_{inc} \cdot S_{mod} \quad \text{se sono in STC}$$

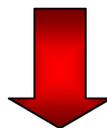
$$P_{ero} = \eta_{RRC} \cdot G_{inc} \cdot S_{mod} \quad \text{se sono in RRC}$$

Come si è visto il rendimento di una cella al silicio può raggiungere al massimo il 17%; la maggior parte delle celle però al massimo arriva al 12-13%. Le cause di inefficienza sono molte, e possono essere classificate in 4 principali categorie; quindi si ha efficienza di:

- a) Penetrazione dei fotoni all'interno della cella;
- b) Conversione dell'energia dei fotoni in energia della coppia elettrone-lacuna;
- c) Conversione dell'energia posseduta dalle coppie elettrone-lacuna in energia elettrica;
- d) Trasferimento al carico dell'energia fotoelettrica prodotta.

L'efficienza di una buona cella al silicio risulta composta dai seguenti fattori principali:

➤	Efficienza di penetrazione della luce(η_p)	0.86
➤	Efficienza quantica(η_q)	0.44
➤	Efficienza di ricombinazione(η_r)	0.80
➤	Fattore $\frac{(q \cdot V_{OC})}{E_g}$ (η_E)	0.62
➤	Fill-Factor(η_F)	0.75



$$\text{Efficienza totale} = 0.14$$

3.2 I meccanismi di perdita

La differenza tra le prestazioni che un modulo è in grado di offrire secondo il datasheet e quanto effettivamente produce in condizioni outdoor può essere denominata “perdita”. Essa deriva da 5 punti fondamentali:

- ❖ Perdita per riflessione della luce (si ha con incidenza della luce non perpendicolare al piano del modulo);
- ❖ Perdita per polarizzazione (si ha con luce polarizzata);
- ❖ Effetti spettrali;
- ❖ Perdita per basso irraggiamento;
- ❖ Effetto della temperatura

3.3 Il programma Aquila

È stato così sviluppato il codice “AQUILA” allo scopo di valutare tutti e cinque i meccanismi di “perdita energetica” cui è sottoposto un modulo fotovoltaico in condizioni operative reali. Il modello matematico è stato descritto in maniera sufficientemente dettagliata in alcuni lavori pubblicati su rivista o presentati a congresso [1-3]. In nessuno di questi lavori è stato esposto il codice. Il programma di base è in grado di trattare dati istantanei radiometrici e di temperatura del modulo allo scopo di calcolare l'efficienza e la massima potenza del modulo stesso. Esso è stato validato confrontando tra loro i dati sperimentali tratti da campagne di misura svolte a Monte Aquilone (ENEA) su vari tipi di moduli, e i dati teorici ricavati dal programma stesso, operante con dati radiometrici sperimentali e con misure dirette di temperatura del modulo.

L'accordo tra i due tipi di dati è risultato molto soddisfacente e, considerando che i dati sperimentali si riferivano a condizioni meteorologiche miste di tempo sereno e di tempo nuvoloso, ha costituito una prova della validità dei modelli di perdita energetica sviluppati col codice AQUILA. Tutti i dati di ingresso al programma sono ricavati da misure precise sul campo, ad esempio i dati radiometrici relativi alle componenti istantanee, misurate da piranometri e pireliometri, della radiazione globale, (diffusa + diretta) su piano orizzontale, oltre che della radiazione globale (diffusa + diretta + albedo) su piano modulo. Anche i dati istantanei di temperatura del modulo sotto test si riferiscono a misure istantanee della temperatura del modulo stesso.

Il programma di base del codice AQUILA è quindi in grado di stimare con grande precisione ed accuratezza l'efficienza reale e la potenza massima di un modulo fotovoltaico piano, se i dati di ingresso di radiazione e di temperatura del modulo sono altrettanto precisi ed accurati.

La simulazione dell'efficienza e della potenza massima del modulo come valori medi giornalieri su base mensile o annuale, basata sulla conoscenza dei dati di targa del modulo e dei dati radiometeorologici medi mensili storici della località in questione, senza misure dirette sul campo, è un obiettivo futuro di una versione aggiornata di tale programma.

Le perdite energetiche del modulo sono definite come la differenza tra la potenza attesa, calcolata all'efficienza nominale, e la potenza misurata sul campo:

$$Loss = P_{STC} - P_{mis} = (\eta_{STC} - \eta_{REAL}) \cdot G^{\perp}_{inc} \quad (E22)$$

La potenza reale erogata dal modulo dipende sia da fattori esterni al sistema FV, quali orientazione, latitudine e condizioni climatiche locali, sia da fattori interni quali la tecnologia specifica di fabbricazione del modulo. Il codice AQUILA presenta un modello per il calcolo delle perdite energetiche di moduli FV piani commerciali mostrando in particolare i risultati di prove effettuate su moduli FV piani commerciali al Silicio cristallino. Le perdite energetiche considerate sono quelle relative ai seguenti 5 meccanismi di perdita:

- ❖ Riflessione e assorbimento della luce sullo strato finestra del modulo (front cover), caratterizzata da incidenza non perpendicolare. Questo meccanismo di perdita è sempre presente a causa della distribuzione della luce su 2π steradiani e può essere una frazione rilevante della perdita totale per valori elevati di AM (Air Mass).
- ❖ Polarizzazione della luce incidente. Questo meccanismo di perdita interviene in presenza di una porzione della volta celeste sgombra da formazioni nuvolose. Infatti il contributo principale di luce polarizzata proviene dalla componente diffusa dall'atmosfera, in condizioni di cielo sereno.
- ❖ Effetti spettrali. Sono osservati quando lo spettro della luce incidente differisce sensibilmente da quello di riferimento AM1.5G. A causa delle variazioni spettrali della luce solare durante il giorno, questo effetto è sempre presente e può contribuire sia come perdita che come guadagno rispetto alla potenza di uscita.
- ❖ Basso irraggiamento. Un livello d'irraggiamento inferiore a 1000 W/m^2 determina sempre una perdita d'efficienza, relativa alla condizione standard, che è strettamente correlata con la forma della curva corrente/tensione del modulo.

- ❖ Riscaldamento del modulo al di sopra di 25°C. Questa perdita è importante ad alti livelli d'irraggiamento, basso angolo d'incidenza della componente diretta (ovvero componente diretta quasi perpendicolare al modulo), ed è trascurabile in condizioni di cielo coperto (overcast).

3.3.1 Procedura di calcolo

Si parte dall'efficienza nominale, η_{STC} , e si calcola, nota l'irradianza G_{inc} , la potenza massima totale $P_m(STC)$:

$$P_m(STC) = \eta_{STC} \cdot G_{inc}^{\perp} \cdot A_{normale} \quad (E23)$$

Questa è la potenza attesa se il modulo fosse illuminato con luce non polarizzata di irradianza totale G_{inc} , di spettro AM1.5G, incidente normalmente sul modulo, quest'ultimo mantenuto a 25°C. Chiamo questo step iniziale come “step 0” e la corrispondente efficienza e potenza sono:

(STEP 0)

$$\eta_0 = \eta_{STC} \quad (E24)$$

$$P_0 = P_m(STC) \quad (E25)$$

Ora aggiorniamo l'efficienza e la potenza calcolando singolarmente, e secondo una precisa sequenza, i cinque meccanismi di perdita.

I. Perdite ottiche per polarizzazione. Queste perdite influiscono sulla radiazione assorbita dal modulo. Esse producono una variazione relativa dell'efficienza data da:

$$\eta_{pol} = G_{abs}^{pol} / G_{inc} \quad (E25)$$

L'efficienza e la potenza erogata dopo le perdite per polarizzazione diventano:

(STEP 1)

$$\eta_1 = \eta_{STC} \cdot G_{abs}^{pol} / G_{inc} = \eta_{STC} \cdot \eta_{pol} \cdot A_{normale} \quad (E26)$$

$$P_1 = \eta_{STC} \cdot G_{abs}^{pol} = \eta_1 \cdot G_{inc} \cdot A_{normale} \quad (E27)$$

II. Perdite ottiche per incidenza non perpendicolare. Anche queste perdite influiscono sulla radiazione assorbita dal modulo; esse producono una variazione relativa dell'efficienza data da:

$$\eta_{opt} = G_{abs} / G_{abs}^{pol} \quad (E28)$$

L'efficienza e la potenza erogata dopo le perdite per luce non perpendicolare diventano:

(STEP 2)

$$\eta_2 = \eta_{STC} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{opt} \quad (E29)$$

$$P_2 = \eta_2 \cdot G_{inc} \cdot A_{normale} \quad (E30)$$

III. Effetti spettrali. Sono considerati calcolando la fotocorrente I_{ph} corrispondente allo spettro attuale della luce incidente e confrontandolo con la fotocorrente I_{ph}' calcolata per lo spettro AM1.5G. Gli effetti spettrali producono una variazione relativa dell'efficienza data dal fattore:

$$\eta_{sp} = I_{ph}' / I_{ph} \quad (E31)$$

L'efficienza e la corrispondente massima potenza erogata dopo le perdite per effetti spettrali diventano:

(STEP 3)

$$\eta_3 = \eta_{STC} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{sp} = \eta_2 \cdot \eta_{sp} \quad (E32)$$

$$P_3 = \eta_3 \cdot G_{inc} \cdot A_{normale} \quad (E33)$$

IV. Basso irraggiamento. Poichè gli effetti di basso irraggiamento sono calcolati per una sorgente con spettro AM1.5G, dobbiamo correggere il valore dell'irradianza assorbita, corrispondente allo spettro attuale, con un altro valore, G_{abs}' , corrispondente allo spettro AM1.5G:

$$G_{abs}' = G_{abs} \cdot \eta_{sp} \quad (E34)$$

Gli effetti di basso irraggiamento sono quindi calcolati sul valore di G_{abs}' . Una variazione relativa dell'efficienza è quindi calcolata e chiamata η_{li} (dove il pedice "li" indica low irradiance). L'efficienza e la corrispondente massima potenza erogata dopo le perdite per effetti spettrali diventano:

(STEP 4)

$$\eta_4 = \eta_{STC} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{sp} \cdot \eta_{li} = \eta_3 \cdot \eta_{li} \quad (E35)$$

$$P_4 = \eta_4 \cdot G_{inc} \cdot A_{normale} \quad (E36)$$

V. Effetti di temperatura. La temperatura della cella modifica l'efficienza nel seguente modo: se $\alpha(K^{-1})$ è la riduzione relativa della potenza per un incremento unitario della temperatura al di sopra dei 25°C, allora abbiamo:

$$P(T) = P(25) \cdot [1 - \alpha \cdot \Delta T] \quad (E37)$$

$$\Delta T = T(^{\circ}C) - 25 \quad (E38)$$

Chiamiamo η_{temp} la variazione relativa dell'efficienza del modulo dovuta agli effetti termici, abbiamo:

$$\eta_{temp} = P(T) / P(25) \quad (E39)$$

L'efficienza e la corrispondente massima potenza erogata dopo le perdite per temperatura diventano:

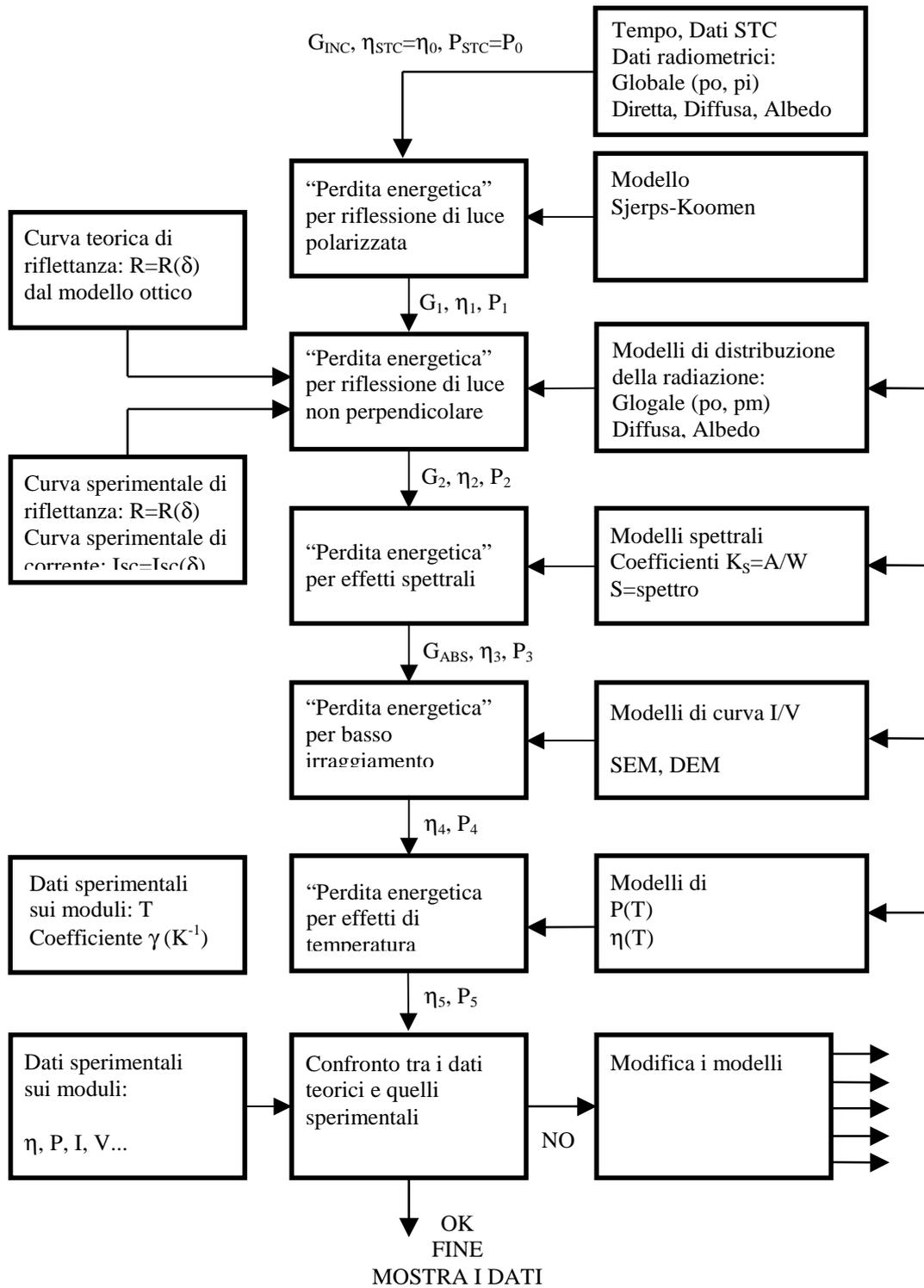
(STEP 5)

$$\eta_5 = \eta_{STC} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{sp} \cdot \eta_{sp} \cdot \eta_{li} \cdot \eta_{temp} = \eta_4 \cdot \eta_{temp} \quad (E40)$$

$$P_5 = \eta_5 \cdot G_{inc} \cdot A_{normale} \quad (E41)$$

P_5 è la potenza finale predetta dal modello teorico ed è confrontata con la potenza sperimentale $P_m(\text{exp})$. La differenza tra questi valori può essere minimizzata modificando, per ciascun modello di perdita, i parametri che entrano nel modello di perdita o il modello stesso. Discutiamo ora, nei prossimi paragrafi, i cinque meccanismi di perdita energetica.

Il seguente diagramma di flusso riproduce la sequenza di calcolo del codice AQUILA per le cinque perdite.

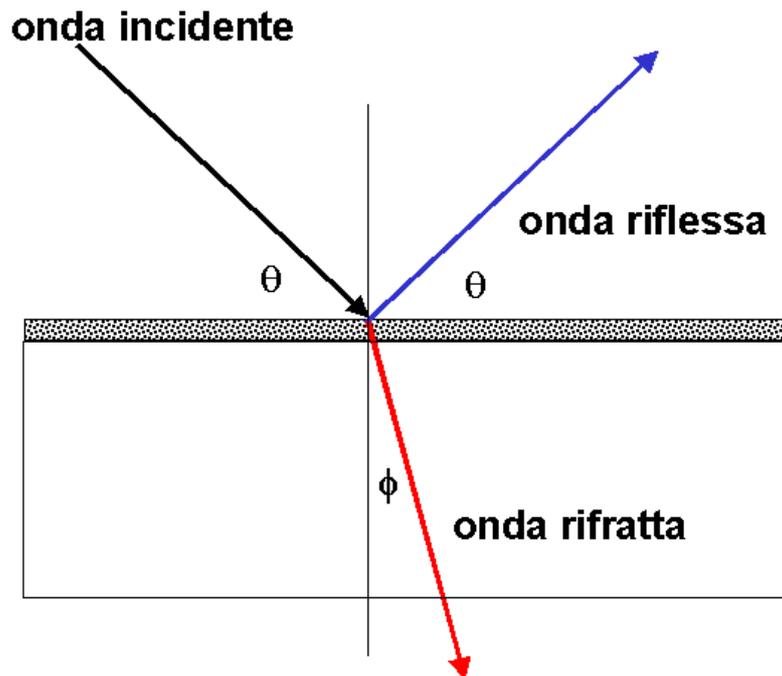


3.3.2 perdita per riflessione della luce

La luce si propaga nel vuoto alla velocità $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; in qualunque altro mezzo trasparente, la velocità della luce è sempre di poco inferiore a questo valore; nell'acqua è di circa $2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ e nel vetro è $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Si definisce indice di rifrazione n il rapporto fra la velocità della luce nel vuoto c e la velocità della luce v misurata in un altro mezzo:

$$n = \frac{c}{v}$$

Esistono quindi tanti indici di rifrazione n quanti sono i mezzi trasparenti; un raggio luminoso che si propaga in un mezzo trasparente (ad esempio aria) con indice di rifrazione n_1 , ed incontra un altro mezzo pure trasparente, con indice n_2 diverso (ad esempio, maggiore di n_1 , come il vetro) viene in parte riflesso e in parte rifratto come indicato in figura.



La prima legge di Snell riguarda la riflessione e dice che il raggio incidente e il raggio riflesso formano lo stesso angolo con la normale e sono tutti e tre complanari; la seconda legge di Snell riguarda il fenomeno della rifrazione legando l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione con gli indici di rifrazione: $\text{sen } \theta / \text{sen } \phi = n_2 / n_1$

Le perdite che qui vengono considerate sono quelle che il modulo subisce in condizioni outdoor a causa della distribuzione angolare, su $2\pi \text{ sr}$, della luce incidente. Modelli accurati di perdita per luce inclinata sono già stati elaborati e si basano sul modello ottico completo del modulo (Kramer); altri autori invece considerano che la semplice interfaccia aria/vetro sia adeguata alla descrizione delle perdite ottiche per moduli al silicio cristallino. Noi abbiamo applicato questa idea, con la differenza

che l'indice di rifrazione da considerare non sia quello del vetro ($\approx 1,5$), bensì quello equivalente, n_{eq} , di un dielettrico semi-infinito che riassume in sé le proprietà ottiche relative del modulo. Il valore corretto da assegnare al dielettrico scaturisce dai risultati di misure ottiche di riflettanza effettuate precedentemente in funzione dell'angolo di incidenza della luce.

L'indice di rifrazione di un materiale è un parametro macroscopico, che rappresenta il fattore numerico per cui la velocità di propagazione di una radiazione elettromagnetica viene rallentata, rispetto alla sua velocità nel vuoto, quando questa attraversa un materiale. Essendo funzione della lunghezza d'onda λ della radiazione elettromagnetica e della natura del materiale attraversato, la sua misura in condizioni controllate può essere utilizzata per identificare il materiale stesso.

Se $R(\delta)$ è la riflettanza in luce bianca del modulo per l'angolo d'incidenza δ , nell'ipotesi di basso assorbimento da parte del vetro e dell'incapsulante EVA (Etil Vinil Acetato), che è il parametro comunemente usato per sigillare le celle all'interno del modulo, la frazione di luce trasmessa alla cella solare (materiale attivo) diventa:

$$T(\delta) = 1 - R(\delta)$$

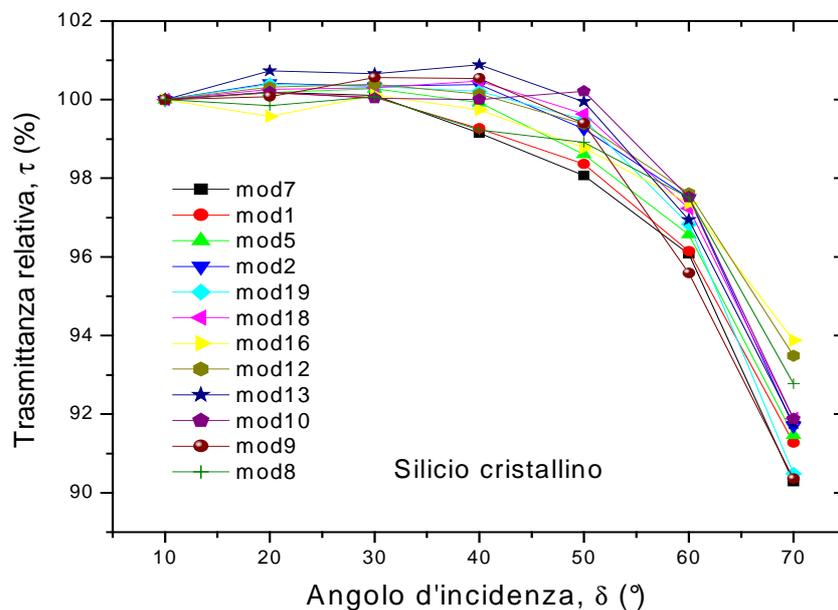
Considerando che la trasmittanza in condizioni STC è data da $T(0)$, la trasmittanza relativa alle condizioni STC si può scrivere come:

$$\tau(\delta) = \frac{T(\delta)}{T(0)} = \frac{1 - R(\delta)}{1 - R(0)}$$

e la corrispondente perdita ottica relativa diventa:

$$\text{Loss}_{il}(\delta) = 1 - \tau(\delta)$$

Dove il suffisso "il" sta per "inclined light". Graficando la grandezza $\tau(\delta)$ per diverse classi di moduli al c-Si (single-crystal), si ottengono le curve mostrate nella seguente figura:



Nell'ipotesi che il modulo sia assimilabile a un dielettrico semi-infinito con indice di rifrazione n_{eq} , i valori di $\tau(\delta)$ teorici si ottengono ancora dall'equazione (g), dove la trasmittanza $T(\delta)$ è ottenuta applicando all'interfaccia aria/dielettrico le equazioni di Fresnel:

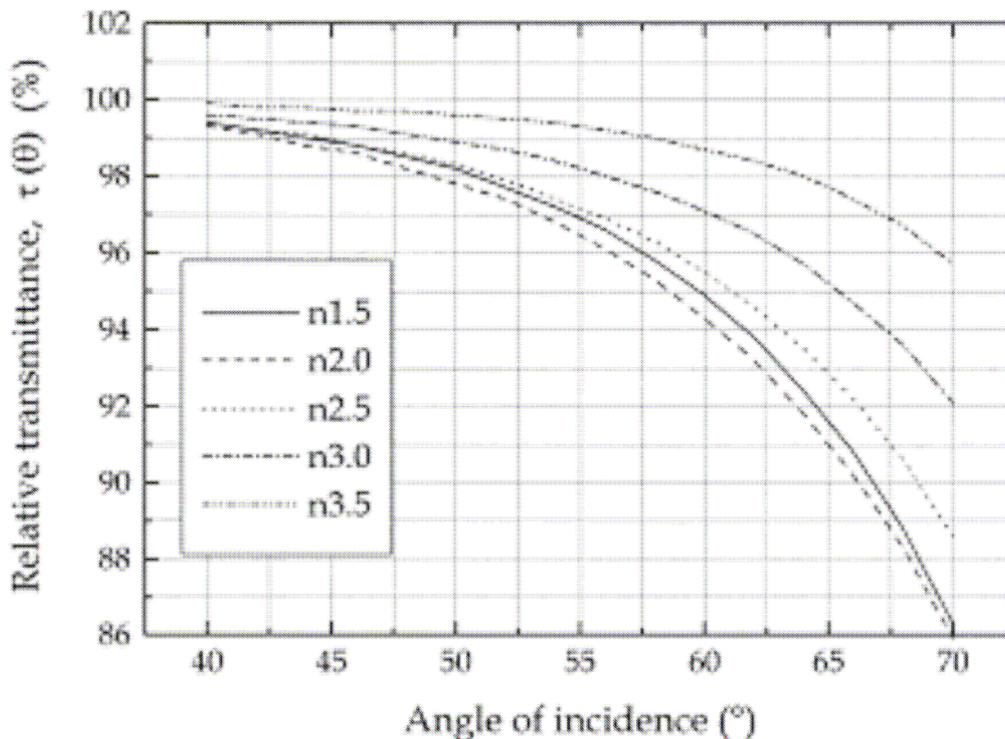
$$T(\delta) = 1 - R(\delta) = 0,5 \cdot n_{eq} \cdot (\cos \delta_i / \cos \delta_t) \cdot (\tau_p^2 + \tau_s^2)$$

dove

$$\tau_p = (2 \cdot \sin \delta_i \cdot \cos \delta_t) / [\sin(\delta_i + \delta_t) \cdot \cos(\delta_i - \delta_t)]$$

$$\tau_s = (2 \cdot \sin \delta_i \cdot \cos \delta_t) / \sin(\delta_i + \delta_t)$$

con δ_i angolo di incidenza e δ_t angolo di trasmissione (rifrazione). La seguente figura mostra le curve teoriche di $\tau(\delta)$ calcolate per alcuni valori di n_{eq} .



Se si sovrappongono i dati sperimentali di $\tau(\delta)$ della penultima figura alle curve teoriche dell'ultima, si trova un interessante risultato; ovvero che le curve di trasmittanza relativa si accordano abbastanza bene con le curve teoriche per certi valori di n_{eq} . L'accordo non trova invece un buon riscontro se si confrontano tra loro le curve sperimentali e teoriche di $T(\delta)$, il che è per noi insignificante, essendo interessati a valutare la trasmittanza del modulo relativamente all'incidenza normale. I risultati sono mostrati nella prossima tabella, dove a ciascun modulo è associato un particolare valore di indice di rifrazione equivalente. Si trovano valori di n_{eq} tra 2.5 e 3.5, ma per la maggior parte all'interno dell'intervallo tra 2.5 e 3.

Se si classificano i moduli in funzione della loro struttura , si possono individuare sei classi o categorie, ciascuna caratterizzata da un valore di indice di rifrazione equivalente medio, come riportato nella seguente tabella.

Categories of the tested mono-Si modules, in relation to their front structure. The reference to the glass is made only for the top surface. The table contains also the type of spot of the specularly reflected beam and the average equivalent refractive index, n_{eq}

Category	Front structure	Reflectance spot	n_{eq}
A	Flat-glass/text-Si	dot	≈ 3.0
B	Flat-glass/ARC/text-Si	dot	≈ 2.5
C	Flat-glass/ARC/flat-Si	dot	≈ 2.5
D	Text-glass/text-Si	fractal	≈ 3.0
E	Text-glass/ARC/flat-Si	fractal	≈ 3.0
F	Text-glass/ARC/text-Si	fractal	≈ 3.0

Una volta che sia stata assegnato un valore di n_{eq} al modulo FV, le perdite ottiche per riflessione da luce inclinata si ottengono di conseguenza. Il calcolo è semplice per le perdite di luce diretta, in quanto è sufficiente utilizzare le equazioni (i)-(m). Per il calcolo delle perdite ottiche per luce diffusa e di albedo, occorre applicare un modello numerico più complesso, discusso qui di seguito.

3.3.3 Perdita per luce diffusa

In questo modello la luce diffusa è considerata isotropa per semplicità; modelli più precisi di distribuzione sono disponibili e possono essere applicati al seguente modello numerico. Le simulazioni con il programma AQUILA dimostrano però che l'ipotesi isotropa conduce a risultati soddisfacenti. Il modello per l'assorbimento della luce diffusa da parte di un modulo comunque orientato rispetto al piano orizzontale, ovvero inclinato dell'angolo di tilt (l'angolo azimutale non è significativo nell'ipotesi di modello isotropo), ha come risultato l'equazione:

$$G_{abs}(tilt) = G_{abs}(0) - \frac{1}{\pi} G_{diff}^0 \cdot \sum_i T(\delta_i) \cdot \cos \delta_i \cdot (A_i + 2B_i) + \dots$$

$$\dots - \frac{1}{\pi} G_{diff}^0 \cdot T(\delta_{i0}) \cdot \cos \delta_{i0} \cdot [2 \cdot tilt - \sum_i (A_i + 2B_i)]$$
(E42)

dove:

$$G_{abs}(0) = G_{diff}^0 \cdot 2 \cdot \sum_i T(\delta_i) \cdot \cos \delta_i \cdot (\cos \delta_i - \cos \delta_{i+1})$$
(E43)

$$\begin{aligned}
A_i &= \Psi_i \cdot (\cos \delta_i - \cos \delta_{i+1}) \\
B_i &= [(\Psi_{i+1} - \Psi_i) / 4] \cdot (\cos \delta_i - \cos \delta_{i+1})
\end{aligned}
\tag{E44}$$

$$\Psi_i = 2 \cdot \cos^{-1} [tg(\pi / 2 - tilt) / tg(\delta_i)]
\tag{E45}$$

E dove l'indice "i0" è tale che l'angolo δ_{i0} è quella immediatamente inferiore a $(\pi/2 - tilt)$. L'angolo tilt nella equazione (n) è espresso in radianti. $T(\delta_i) = 1 - R(\delta_i)$ è la trasmittanza del modulo all'angolo d'incidenza δ_i . $T(\delta_i)$ possono essere dati sperimentali ottenuti dal modello della fotocorrente o dati teorici ottenuti dal modello di Fresnel.

3.4 Modello per effetti spettrali

Il modello per gli effetti spettrali introduce dei coefficienti k' che sono specifici del modulo sotto esame e del particolare spettro della sorgente. Se si indica con k_s la costante di proporzionalità tra la densità di corrente $J_{sc}(s)$ e l'irradianza $G_{abs}(s)$ assorbita dal modulo in corrispondenza alla radiazione di spettro s :

$$K_s = J_{sc}(s) / G_{abs}(s)
\tag{E46}$$

Allora, in condizioni nominali, il modulo presenta un coefficiente k_{STC} dato da:

$$\begin{aligned}
k_{STC} &= J_{sc}(STC) / G_{abs}(STC) = J_{sc}(STC) / [G_{inc}(STC) \cdot T(0)] = \dots \\
&\dots = J_{sc}(STC) / [1000 \cdot T(0)]
\end{aligned}$$

dove $T(0)$ è la trasmittanza dello strato finestra del modulo e può essere derivata dalle equazioni di Fresnel (i)-(m) utilizzando come parametro un indice di rifrazione equivalente, n_{eq} , specifico del modulo esaminato.

La risposta in corrente di un modulo generico, comunque orientato all'esterno, è data da:

$$I_{SC} = k_{dir} \cdot G_{abs(dir)} + k_{diff} \cdot G_{abs(diff)} + k_{alb} \cdot G_{abs(alb)}$$

Dove $G_{abs(dir)}$, $G_{abs(diff)}$, $G_{abs(alb)}$, sono le irradianze misurate rispettivamente per la componente diretta, per la componente diffusa dall'emisfero celeste (comprendente anche quella riflessa) e per l'albedo, dai rispettivi pireliometri (dir) e piranometri (diff e alb).

3.4.1 I piranometri

Un piranometro è un sensore che misura la radiazione solare globale (W/m^2), cioè l'energia dovuta alla radiazione diretta e a quella diffusa e riflessa dal cielo e dai sistemi nuvolosi. L'elemento sensibile ha un principio di funzionamento basato sull'effetto fotovoltaico. Tale elemento è inglobato in una resina siliconata ad alta stabilità e protetto da un vetro ottico piano. Uno schermo bianco ad anello protegge lo strumento dal riscaldamento; le radiazioni misurate sono quelle della gamma di lunghezze d'onda comprese tra 0,3 e 2 μm .



3.4.2 I pireliometri

Il pireliometro è uno strumento usato per misurare l'intensità della radiazione solare diretta; in genere è costituito da un lungo tubo all'estremità del quale, perpendicolarmente, è posizionato il sensore. Quest'ultimo è generalmente un corpo nero che assorbe tutta la radiazione solare riscaldandosi; da una misura della temperatura del corpo si può risalire all'energia assorbita ovvero all'intensità della radiazione che l'ha colpito.



I piranometri e pireliometri hanno una risposta spettrale piatta da ~300 a ~2800 nm. Le irradianze G_{abs} si riferiscono a valori di flusso radiante incidente contenuto nell'intervallo di lunghezze d'onda: 300 ÷ 2800 nm. Lo spettro di riferimento STC, AM1.5G, integrato da 305 nm all'infinito, è posto uguale a 1000 W/m² (mentre è pari a 988 W/m² nell'intervallo 305 ÷ 2800 nm). A questo valore debbono essere normalizzate le irradianze spettrali $E_s(\lambda)$ relative al generico spettro "s". Per applicare il modello spettrale, è necessario allora misurare lo spettro delle varie sorgenti e normalizzarlo a 1000 W/m². Gli spettri presi come riferimento sono quelli della componente diretta e della diffusa per vari valori di Air Mass (AM), nonché gli spettri dell'albedo per diversi tipi di materiali: erba, grano, terra, asfalto, cemento, neve, ecc. Ognuno di questi spettri dovrà essere tabulato e normalizzato a 1000 W/m². Il modello spettrale lavora sulle grandezze relative k'_s :

$$\begin{aligned}
k'_s &= \frac{k_s}{k_{STC}} = \frac{\int_{305}^{\infty} d\lambda \cdot SR_{ext}(\lambda) \cdot E_s(\lambda)}{\int_{305}^{\infty} d\lambda \cdot E_s(\lambda)} \cdot \frac{\int_{305}^{\infty} d\lambda \cdot E_{STC}(\lambda)}{\int_{305}^{\infty} d\lambda \cdot SR_{ext}(\lambda) \cdot E_{STC}(\lambda)} = \dots \\
&\dots = \frac{\int_{305}^{\infty} d\lambda \cdot SR_{ext}(\lambda) \cdot E_s(\lambda)}{\int_{305}^{\infty} d\lambda \cdot SR_{ext}(\lambda) \cdot E_{STC}(\lambda)} = \frac{\int_{305}^{\lambda_G} d\lambda \cdot SR_{ext}(\lambda) \cdot E_s(\lambda)}{\int_{305}^{\lambda_G} d\lambda \cdot SR_{ext}(\lambda) \cdot E_{STC}(\lambda)}
\end{aligned} \tag{E47}$$

L'effetto spettrale è dato quindi dal coefficiente k'_s che contiene, non solo l'informazione della convoluzione (dell'accordo) tra risposta spettrale e spettro della sorgente rispetto alla convoluzione (all'accordo) tra risposta spettrale e spettro di riferimento (STC), ma anche l'informazione del contenuto energetico dello spettro "s", normalizzato rispetto allo spettro STC, nell'intervallo di sensibilità del modulo, ovvero tra 305 nm e λ_G , lunghezza d'onda di taglio del materiale attivo delle celle del modulo. Il coefficiente k'_s è stato calcolato per alcuni moduli al Silicio cristallino e per alcuni spettri di radiazione diretta, diffusa e di albedo ed è riportato in tabella.

Coefficients k' calculated for different module technologies and different spectra

Module	AM1.5G (k_{STC})	AM1.5Dir (k_{dir})	AM1.5Diff (k_{diff})
BP585	1.0	0.98	1.07
mono-Si [12]	1.0	0.99	1.04
poly-Si [13]	1.0	0.98	1.05
poly-Si [14]	1.0	0.99	1.02

The reported references are for the spectral response data.

In sintesi il coefficiente k'_s sintetizza l'effetto spettrale e rappresenta l'incremento subito dalla corrente I_{sc} del modulo per effetto di una sorgente luminosa con quel particolare spettro.

Valori di $k'_s < 1$ indicano una riduzione della corrente I_{sc} (spectral loss) mentre valori di $k'_s > 1$ indicano un aumento della I_{sc} (spectral gain) rispetto ad una sorgente con spettro di riferimento AM1.5G.

3.5 Perdite per basso irraggiamento

La riduzione del livello d'irraggiamento da 1000 W/m^2 comporta generalmente la riduzione dell'efficienza di un modulo piano. Soltanto nei moduli a concentrazione è possibile che alla riduzione dell'irraggiamento segua un aumento dell'efficienza. Questo succede perché la curva di efficienza in funzione della concentrazione solare presenta un massimo; quindi, soltanto operando oltre il massimo dell'efficienza si può registrare una riduzione dell'efficienza.

Per calcolare le perdite per basso irraggiamento (b.i. loss), è necessario derivare un'equazione per la corrente del modulo in funzione della tensione in uscita, ovvero per la curva I/V del modulo alla luce. Un modello semplice è quello della equazione con singolo esponenziale:

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \cdot [\exp(V / A_0 V_T) - 1] \quad (\text{E49})$$

dove I_{ph} è la fotocorrente, I_0 è la corrente di saturazione inversa, $V_T = kT/q$ e A_0 è il fattore di qualità del diodo. La (18) è un'equazione semplificata, che deriva dall'aver posto $R_{sh} = \infty$, $R_s = 0$ nell'equazione:

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \cdot [\exp((V + I \cdot R_s) / A_0 V_T) - 1] - (V + I \cdot R_s) / R_{sh} \quad (\text{E50})$$

che comporta l'eguaglianza: $I_{sc} = I(V=0) = I_{ph}$, da cui la I(V) diventa:

$$I(V) = I_{sc} - I_0 \cdot [\exp(V / A_0 V_T) - 1] \quad (\text{E51})$$

I due parametri non noti, A_0 e I_0 possono essere derivati imponendo indipendentemente le due condizioni: $I=0$ e $I=I_m$:

$$0 = I_{sc} - I_0 \cdot [\exp(V_{oc} / A_0 V_T) - 1] \quad (\text{E51})$$

$$I_m = I_{sc} - I_0 \cdot [\exp(V_m / A_0 V_T) - 1] \quad (\text{E52})$$

dove le quantità I_{sc} , V_{oc} , I_m e V_m in corrispondenza a $G = 1000 \text{ W/m}^2$ sono ricavati dal datasheet del modulo o da misure al simulatore solare.

Si ottiene finalmente per i parametri A_0 e I_0 :

$$A_0 = (1/V_T) \cdot (V_m - V_{oc}) / \ln(1 - I_m / I_{sc}) \quad (E53)$$

$$I_0 = I_{sc} / [(1 - I_m / I_{sc})^{V_{oc}/(V_m - V_{oc})} - 1] \quad (E54)$$

La (E54) si può anche approssimare come:

$$I_0 \approx I_{sc} / [(1 - I_m / I_{sc})^{V_{oc}/(V_m - V_{oc})}] \quad (E55)$$

Il fattore “Performance Ratio” per il basso irraggiamento, PR_G , è definito come:

$$\begin{aligned} PR_G &= \eta(G) / \eta(STC) = [P_m(G) / G] / [P_m(STC) / 1000] = [P_m(G) / P_m(STC)] \cdot (1000 / G) = \dots \\ &= \{ [I_{sc}(G) \cdot V_{oc}(G) \cdot FF(G)] / [I_{sc}(STC) \cdot V_{oc}(STC) \cdot FF(STC)] \} \cdot (1000 / G) \end{aligned} \quad (E56)$$

Per effetto della dipendenza lineare tra I_{sc} e G : $I_{sc}(G) = k \cdot G$, abbiamo:

$$PR_G = [V_{oc}(G) \cdot FF(G)] / [V_{oc}(STC) \cdot FF(STC)] \quad (E57)$$

La grandezza $V_{oc}(G)$ si ricava dalla (E56) nel seguente modo:

$$I(V, G) = I_{sc}(G) - I_0 \cdot [\exp(V(G) / A_0 V_T) - 1] \quad (E58)$$

$$I(V, G) = S_{mod} \cdot k \cdot G - I_0 \cdot [\exp(V(G) / A_0 V_T) - 1]$$

Ponendo $I=0$, abbiamo:

$$I(V_{oc}, G) = 0 = S_{mod} \cdot k \cdot G - I_0 \cdot [\exp(V_{oc}(G) / A_0 V_T) - 1]$$

da cui:

$$V_{OC}(G) = A_0 \cdot V_T \cdot \ln\left[\frac{S_{mod} \cdot k \cdot G}{I_0} + 1\right]$$

Da cui, ponendo: $k = I_{sc}(STC) / (S_{mod} * 1000)$ abbiamo:

$$V_{OC}(G) = A_0 \cdot V_T \cdot \ln\left[\frac{I_{sc}(STC) \cdot (G/1000)}{I_0} + 1\right] \quad (E59)$$

La grandezza FF(G) è espressa da:

$$FF(G) = \frac{V_m(G) \cdot I_m(G)}{V_{OC}(G) \cdot I_{SC}(G)} \quad (E60)$$

dove $V_{oc}(G)$ è espresso dalla (E56) e $I_{sc}(G)$ è data da:

$$I_{SC}(G) = I_{sc}(STC) \cdot G / 1000 \quad (E61)$$

Le grandezze $I_m(G)$ e $V_m(G)$ si ricavano anch'esse applicando la (E50).

Si scrive dapprima l'equazione per la potenza:

$$P(G) = V(G) \cdot I(G)$$

(E62)

$$P(G) = V(G) \cdot \left\{ \frac{I_{sc}(STC)}{1000} \cdot G - I_0 \cdot [\exp(V(G) / A_0 V_T) - 1] \right\}$$

(E63)

Derivando rispetto a $V(G)$ si trova:

$$\begin{aligned} \frac{dP(G)}{dV(G)} = & \left\{ \frac{I_{SC}(STC)}{1000} \cdot G - I_0 \cdot [\exp(V(G)/A_0V_T) - 1] \right\} + \dots \\ & \dots + V(G) \cdot \left\{ -\frac{I_0}{A_0V_T} \cdot \exp(V(G)/A_0V_T) \right\} \end{aligned} \quad (E64)$$

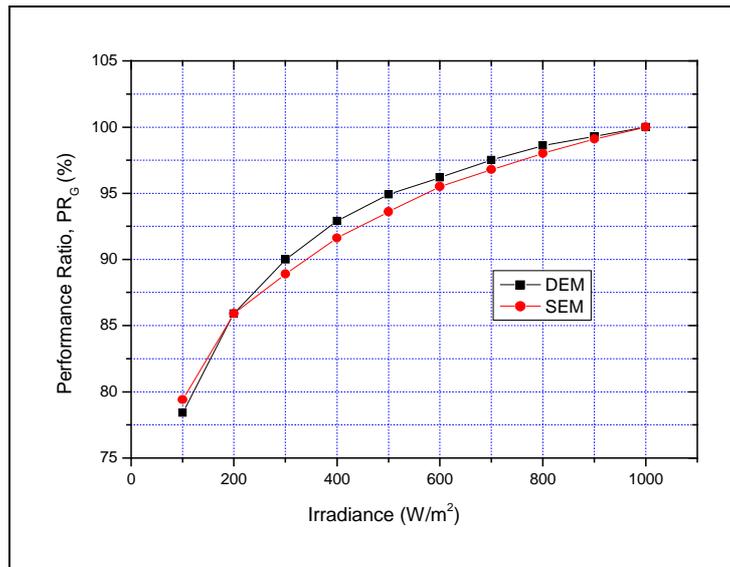
Ponendo $\frac{dP(G)}{dV(G)} = 0$, si hanno le condizioni di massima potenza:

$$\begin{aligned} \frac{I_{SC}(STC)}{1000} \cdot G - I_0 \cdot [\exp(V_m(G)/A_0V_T) - 1] = & \frac{V_m(G) \cdot I_0}{A_0 \cdot V_T} \cdot \exp(V_m(G)/A_0V_T) \\ \dots & \\ \frac{I_{SC}(STC)}{1000} \cdot G + I_0 - I_0 \cdot [\exp(V_m(G)/A_0V_T)] \cdot & \left\{ \frac{V_m(G)}{A_0 \cdot V_T} + 1 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (E65)$$

Risolvendo numericamente la (28), si ricava $V_m(G)$. Nota la $V_m(G)$, la $I_m(G)$ si ricava dalla Eq. (18'). Noti in tal modo tutti e quattro i termini della Eq. (24), si ricava finalmente $FF(G)$ e infine PR_G dalla Eq. (22'). Il modello a singolo esponenziale, SEM, contenente solo i parametri A_0 e I_0 , è stato confrontato con quello a doppio esponenziale, DEM, contenente cinque parametri:

$$I(V) = \frac{(V + R_S I)}{R_{SH}} + I_{01} \cdot \left[\exp\left(q \frac{V + R_S I}{kT} \right) - 1 \right] + I_{02} \cdot \left[\exp\left(q \frac{V + R_S I}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (30)$$

Il Performance Ratio PR_G è stato calcolato con entrambi i modelli a differenti livelli d'irradianza tra 100 e 1000 W/m^2 . I risultati sono mostrati in Fig. 6. La differenza media tra le due curve, calcolata su diversi valori d'irradianza è inferiore all'1%. Ne concludiamo che il nostro modello semplificato per la curva I-V del modulo è sufficientemente accurato.



SEM=Single exponential method
DEM=Double exponential method

3.6 Effetto della temperatura sul modulo

In questo caso si è visto come l'aumento di temperatura al di sopra dei 25 gradi Celsius (STC=standard test condition) determina una riduzione lineare della potenza erogata, e quindi di efficienza. Per stimare realmente tale potenza erogata mi servo della seguente formula, da cui vedo che il riferimento preso è proprio quello delle condizioni standard: $P(T) = P(25^{\circ}) \cdot [1 - \alpha \cdot \Delta T]$ dove

$\Delta T = T(^{\circ}C) - 25^{\circ}C$ e $\gamma = (4 \cdot 10^{-3})^{\circ}C^{-1}$. È importante notare che le sei rette non sono parallele e hanno un'inclinazione k che può essere calcolata nei diversi casi come $K = P(25^{\circ}C) \cdot \gamma$. Nella seguente tabella riporto i diversi valori di tale inclinazione:

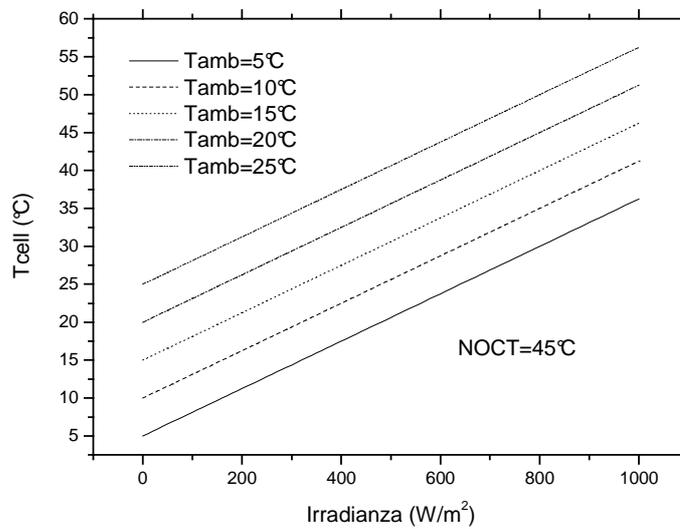
Potenza	50 Watt	60 Watt	70 Watt	80 Watt	90 Watt
K	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45

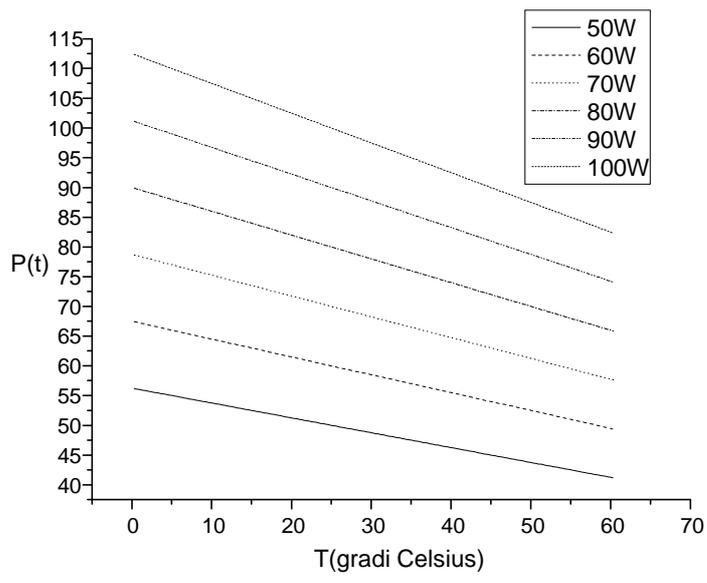
I valori di K riportati sono in valore assoluto poiché per trovare l'inclinazione delle rette si è derivato la funzione rispetto alla temperatura; così facendo avremmo un segno negativo davanti al valore di K . La potenza è riferita ai 25° C di temperatura. Nel caso della potenza a 100 W ottengo un valore di k pari a 0,5.

In quest'altro caso ho messo invece in relazione l'irradianza incidente sulla superficie terrestre (che al massimo può raggiungere il picco di 1000 W/m², valore usato dal simulatore solare AM1.5G) e la temperatura a cui effettivamente arriva il modulo data la temperatura dell'ambiente circostante; è stato fissato il NOCT (Nominal Operative Cell Temperature) a 45°C e le cinque rette rappresentano

la situazione che si crea a diverse temperature dell'ambiente esterno,partendo da 5°C fino a 25°C a intervalli di 5°C.Il NOCT è la temperatura rilevata sulla cella in condizioni di irraggiamento a 800 W/m² ,sottoposto a un vento con velocità di 1 m/s e temperatura dell'ambiente di 20°C;sono condizioni standard che vengono riprodotte solo in laboratorio.Per costruire il grafico ci siamo serviti della seguente relazione: $T_c=T_a+(NOCT-20)*I/800$ dove T_c è la temperatura della cella e T_a è quella dell'ambiente circostante.

Il Performance Ratio per temperatura è $PR_T=1-\gamma \cdot \Delta T$





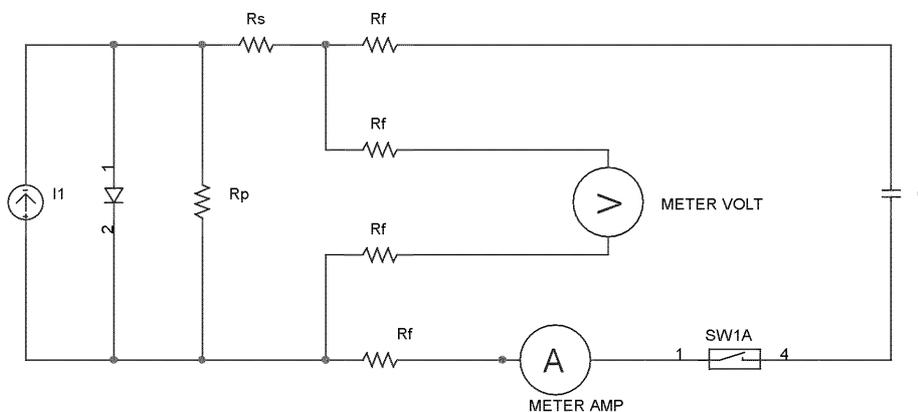
Capitolo 4

Prove sperimentali

Cui sono riportate delle misure fatte su un modulo piano composto di 36 celle in serie. Queste misure sono state effettuate sul tetto del dipartimento di fisica dell'università degli studi di ferrara, in una giornata molto serena fra le ore 11 e le ore 12 nel mese di agosto. Inoltre, in questo paragrafo è spiegato il modo in cui sono state acquisite le misure.

4.1 Sistema di acquisizione i-v

I sistemi di misura della caratteristica corrente tensione delle celle solari e dei pannelli fotovoltaici, sono generalmente effettuati con sistemi di misura a quattro terminali:



In questo caso, utilizzando un voltmetro ad alta impedenza, la corrente che circola nel ramo risulta trascurabile, di conseguenza è trascurabile la caduta di tensione ai capi del filo conduttore con resistenza parassita R_f . Quindi la tensione misurata è quasi esattamente quella che si trova agli estremi della cella.

La corrente viene misurata su un altro ramo tramite un amperometro. Tuttavia per far sì che la corrente i , e quindi anche la tensione v ai capi della cella, legati dalla relazione semplificata

$$i = i_0 \left(e^{\frac{v}{kT}} - 1 \right)$$

coprano tutti i valori da 0 a i_{sc} e da v_{oc} a 0, occorre applicare alla cella un carico variabile. Questo può essere di tipo passivo, ovvero tramite una reostato ad alta potenza. Tuttavia in questo caso sorgerebbero diversi problemi legati ai contatti striscianti, e quindi alle relative perturbazioni sulla misura, ed alla usura meccanica. Una strada alternativa è l'utilizzo di un alimentatore stabilizzato; variando la tensione dell'alimentatore, varia la tensione ai capi della cella e la corrente che questa eroga. Le limitazioni di questo metodo riguardano soprattutto la necessità di avere a disposizione una rete di alimentazione fissa, che ne limita quindi l'utilizzo sul campo, e la limitazione della corrente e della tensione massima erogabili dall'alimentatore.

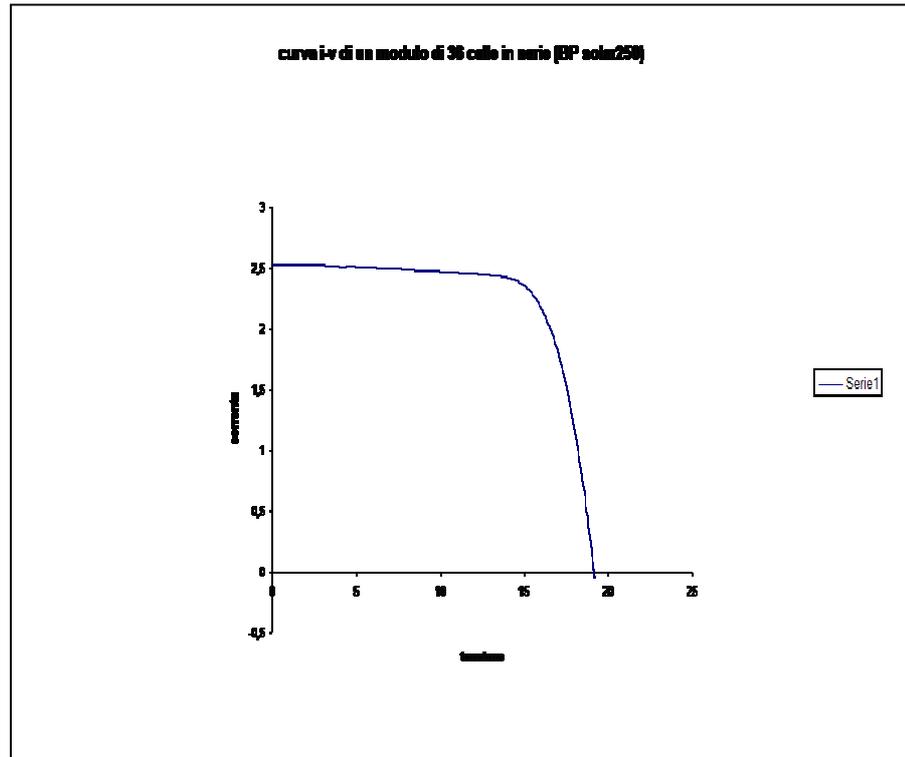
Una strada per superare queste limitazioni può essere quella di utilizzare come carico un condensatore. Supponendo il condensatore inizialmente scarico, e chiudendo ad un certo istante un interruttore, il condensatore si caricherà tramite la corrente erogata dalla cella, variando però anche la tensione ai suoi capi secondo la relazione:

$$V(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = \frac{1}{C} \int_0^t i_0 \left(e^{\frac{v(t)}{kT}} - 1 \right) dt$$

Adesso proviamo ad analizzare tutti i dati misurati in condizioni reali cerchiamo di capire quali sono le cause dello scostamento - se esiste - fra essi e le misure fatte in laboratorio.

4.2 Risultato delle misure

V(volt)	I(A)
0,04	2,533942
2,728248	2,528858
3,094356	2,523775
3,480802	2,523775
3,867249	2,523775
4,253695	2,513607
4,640142	2,518691
5,036758	2,513607
5,423205	2,508524
5,809651	2,508524
6,206268	2,50344
6,592714	2,498357
6,979161	2,498357
7,355438	2,498357
7,752054	2,493273
8,128331	2,488189
8,514777	2,483106
8,901224	2,483106
9,277501	2,483106
9,663948	2,478022
10,04022	2,472939
10,4165	2,472939
10,80295	2,467855
11,17923	2,462772
11,5555	2,462772
11,92161	2,457688
12,29789	2,452604
12,67416	2,447521
13,04027	2,442437
13,40638	2,437354
13,77249	2,427186
14,12842	2,417019
14,48436	2,396685
14,81996	2,371267
15,15556	2,340765
15,47082	2,28993
15,77591	2,23401
16,05049	2,16284
16,3149	2,081503
16,55897	2,000165
16,77253	1,908661
16,97592	1,817156
17,15898	1,720568
17,33186	1,62398
17,49458	1,522308
17,63695	1,42572
17,76916	1,334215
17,89119	1,242711
18,00306	1,15629
18,10475	1,069869
18,18611	0,993615
18,26747	0,917361
18,34883	0,846191
18,42001	0,780104
18,48103	0,719101



Il datasheet del modulo considerato contiene i valori di tensione, corrente, e potenza, misurate durante una simulazione fatta in laboratorio con luce incidente perpendicolarmente sul modulo ad una temperatura di 25°C con un valore di irradianza di 1000w/m².

Il datasheet riporta:

- la massima potenza erogabile dal modulo Pmax=50w
- il potenziale ottenuto alla massima potenza Vmp=17V
- la corrente ottenuta alla massima potenza Imp=2.94A

Ora, considerando le misure ottenute con il nostro modulo, abbiamo una potenza massima di 35.27w prodotto di Vmp=15.47V e di Imp=2.28A.

Questa perdita di potenza proviene da tre fattori principali:

- * la luce del sole è polarizzata mentre quella usata durante la simulazione non lo è;
- * l'irradianza misurata (circa 890w/m²) è molto più bassa di quella ottenuta in laboratorio;
- * infine la temperatura del modulo superiore a 45°C è sicuramente la causa principale della perdita di potenza verificata. Ovviamente tutto ciò provoca anche una perdita di efficienza.

CONCLUSIONI

L'obbiettivo di questo lavoro era di approfondire la tematica del solare fotovoltaico partendo dai fondamenti della teoria di una cella solare e proseguendo fino a descrivere il funzionamento di un modulo fotovoltaico sia in condizioni ottime di funzionamento che in presenza di disturbi esterni. Nella parte introduttiva, è stato approfondito il concetto di equazione della curva caratteristica della cella solare (curva I-V) sia al buio, sia alla luce nel caso del singolo dispositivo e nel caso del modulo. In particolare sono stati evidenziati con dettaglio gli effetti provocati, sulla curva I-V, dai parametri di intensità di irraggiamento, composizione spettrale della luce e temperatura.

Nella seconda parte della tesi è stata studiata l'influenza che i vari parametri ambientali quali modalità di installazione del modulo e condizioni climatiche e di irraggiamento hanno sulle effettive prestazioni del modulo in termini di potenza erogata.

Non sono affrontati i problemi legati al sistema fotovoltaico nel suo complesso, che comprende il generatore fotovoltaico e il BOS*.

Per studiare questi effetti mi sono avvalso di uno studio precedente finalizzato alla determinazione dei meccanismi di perdita energetica subita da un modulo installato, rispetto alle condizioni nominali ricavate dalle caratteristiche indoor con un simulatore solare. Lo studio di questa parte mi ha permesso di acquisire una certa sensibilità sulla valutazione degli effetti che i vari parametri esterni hanno sulle capacità di erogazione della potenza.

L'ultima parte, molto interessante e utile, ha riguardato una breve sperimentazione dei concetti teorici acquisiti attraverso una campagna di misure svolte, all'istituto di fisica dell'università di ferrara, su un modulo al silicio cristallino. In questo caso ho contribuito personalmente a svolgere le misure delle curve caratteristiche del modulo in condizioni operative reali (outdoor).

L'esperienza acquisita con questo lavoro di tesi è stata per me molto benefica in quanto mi ha aperto nuovi orizzonti conoscitivi nel campo delle fonti energetiche rinnovabili che dovrebbe meritare maggiore attenzione vista la situazione di crisi energetica in cui ci troviamo. In secondo luogo, è stata benefica perché mi ha permesso di comprendere come integrare queste nuove conoscenze con quelle più tradizionali che fanno parte del bagaglio di base di un ingegnere.

* BOS (balance of system): termine usato per indicare le apparecchiature elettriche che servono al condizionamento dell'energia prodotta.

Ringraziamenti

Ringrazio sentitamente i professori G MARTINELLI e CESARE MALAGÙ per avermi dato la possibilità di svolgere questa tesi all'istituto di fisica, usufruendo anche delle aule delle apparecchiature esistenti.

Inoltre ringrazio poi il professore PARRETTA ANTONIO che è stato molto paziente e sempre disponibile a farmi capire i concetti che abbiamo sviluppato in questo lavoro.

Infine ringrazio ANDREA ANTONINI che mi ha permesso di sperimentare in maniera concreta i concetti teorici acquisiti durante lo studio.

