

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA PER
L'ENERGIA E L'INFORMAZIONE

TITOLO DELL'ELABORATO
**SIMULAZIONI DI MODULI FOTOVOLTAICI AD ELEVATE
PRESTAZIONI**

Elaborato in

Laboratorio di dispositivi e impianti fotovoltaici

Relatore

Chiar.mo Prof. Claudio Fiegna

Presentato da

Andrea Nicolini

Correlatori

Ing. Massimo Nicolai

Dott. Mauro Zanuccoli

Anno Accademico 2015-2016

PAROLE CHIAVE

Cella fotovoltaica

Modulo fotovoltaico

Slice

CTM

Diodo di bypass

LT-SPICE

Indice

Introduzione	1
1 Principi base dell'effetto fotovoltaico.....	6
1.1 Effetto fotovoltaico	7
1.1.1 Struttura dei semiconduttori	7
1.1.2 Assorbimento della radiazione luminosa e separazione delle cariche: la giunzione P-N.....	9
1.1.3 Principali meccanismi di ricombinazione.....	10
2 La cella e il modulo fotovoltaico	13
2.1 La cella solare fotovoltaica	14
2.1.1 Caratteristica I-V e figure di merito	16
2.1.2 Principali effetti resistivi	19
2.1.3 Circuito elettrico equivalente.....	23
2.2 Il modulo fotovoltaico.....	25
2.2.1 Caratteristica I-V e figure di merito di un modulo “standard”	26
2.2.2 Diodi di bypass	27
2.2.3 Cell-to-module losses (CTM).....	29
3 Approccio Sliced-cells.....	34
3.1 Introduzione: motivazioni ed aspettative	35
3.2 Confronto con l'approccio standard.....	36
3.2.1 Principali effetti resistivi	38
3.2.2 Modulo Sliced.....	41
3.2.3 Diodi di bypass	42
3.2.4 CTM.....	43
4 Simulazioni SPICE di celle e moduli.....	46
4.1 Funzionamento del simulatore	47
4.2 Simulazione modulo standard.....	48

4.2.1	Creazione e parametrizzazione del modello	48
4.2.2	Inserimento dei diodi di bypass e simulazione di condizioni di ombreggiamento	50
4.3	Simulazione modulo Sliced	52
4.3.1	Creazione e parametrizzazione del modello	52
4.3.2	Inserimento dei diodi di bypass e simulazione di condizioni di ombreggiamento	54
5	Risultati e discussione	57
5.1	Parametri realistici considerati e calcolo della resistenza serie	58
5.1.1	Validazione caso standard	60
5.1.2	Validazione approccio Sliced-cells.....	61
5.2	Simulazione SPICE di moduli fotovoltaici ad elevate prestazioni	64
5.2.1	Modulo standard: prestazioni e diodi di bypass.....	64
5.2.2	Modulo Sliced: prestazioni e diodi di bypass	66
5.3	Confronto tra i due approcci: impatto del CTM e diodi di bypass.....	71
5.3.1	CTM.....	71
5.3.2	Diodi di bypass	72
	Conclusioni e sviluppi futuri	75
	Bibliografia	78
	Ringraziamenti	82

Elenco delle figure e delle tabelle

Figura 1: Produzione di energia elettrica tramite fotovoltaico in Italia	2
Figura 1.1: Schema di base dell'effetto fotovoltaico	7
Figura 1.2: Bande di energia dei materiali	8
Figura 1.3: Band Gap diretto (sinistra) e Band Gap indiretto (destra) in una rappresentazione di energia in funzione del vettore d'onda K	9
Figura 1.4: Rappresentazione della giunzione P-N all'equilibrio	10
Figura 2.1: Esempio di cella fotovoltaica convenzionale al Silicio	14
Figura 2.2: Busbars e fingers di una cella classica (sinistra) e andamento della corrente (destra)	15
Figura 2.3: Esempio di cella fotovoltaica ad elevate prestazioni	16
Figura 2.4: Caratteristica I-V in condizioni dark e light	17
Figura 2.5: Raffigurazione delle figure di merito	18
Figura 2.6: Ribbons (in arancio) adibiti alla connessione inter-cella	21
Figura 2.7: Flusso di corrente attraverso base ed emettitore	23
Figura 2.8: Modello elettrico equivalente (a costanti concentrate) di una cella solare	23
Figura 2.9: Strati di assemblaggio di un classico modulo fotovoltaico	25
Figura 2.10: Confronto tra caratteristica I-V di una classica cella PV e di un generico modulo PV	26
Figura 2.11: Schematizzazione della connessione in serie tra celle (sinistra) e dell'effetto di spacing inter-cella e cella-bordo (destra)	27
Figura 2.12: Esempio di collegamento dei diodi di bypass	28

Figura 2.13: Esempio di CTM nel caso standard [29] per materiale multicristallino, dove sono evidenziati fattori di perdita (rosso) e di guadagno (verde), specificati in Tabella 2.1	31
Tabella 2.1: CTM utilizzato in questo lavoro per il caso standard, in accordo con [29], per materiale multicristallino, dove sono evidenziati i valori numerici e percentuali dei fattori di perdita (arancione) e di guadagno (verde)	32
Figura 3.1: Esempio schematizzato del front di una slice, dove si evidenziano pseudo-busbar (verticale) e fingers (orizzontali)	36
Figura 3.2: Visione del collegamento tra slices	37
Figura 3.3: Schematizzazione della connessione tra PAD e pseudo-busbar ...	40
Figura 3.4: Schematizzazione dell'assemblaggio del modulo Sliced (destra) e dell'effetto di spacing inter-stringa (sinistra)	41
Figura 3.5: Schematizzazione di due possibili configurazioni di connessione dei diodi di bypass	42
Tabella 3.1: CTM utilizzato in questo lavoro per il caso Sliced-cells, basato su CTM standard [29], dove sono evidenziati i valori numerici e percentuali dei fattori di perdita (arancione) e di guadagno (verde)	44
Figura 4.1: Modello SPICE del circuito equivalente di una cella fotovoltaica standard	48
Figura 4.2: Modello SPICE di un modulo fotovoltaico standard costituito da 60 celle in serie raggruppate in tre stringhe da 20 celle ciascuna	49
Figura 4.3: Sezione del modello SPICE di una stringa con una cella ombreggiata (sinistra) in presenza di un diodo di bypass (destra)	51
Figura 4.4: Sezione del modello SPICE di una stringa (sinistra) e modello SPICE di un mini-modulo (destra)	53
Figura 4.5: Modello SPICE di un modulo fotovoltaico Sliced costituito da due serie di cinque stringhe in parallelo, ciascuna di 39 slices in serie	53
Figura 4.6: Modello SPICE di un mini-modulo ombreggiato (sinistra) e di un modulo fotovoltaico Sliced dotato di un diodo di bypass in parallelo ad ogni mini-modulo (destra)	54
Tabella 5.1: Caratteristiche di celle e slices utilizzate per l'identificazione dei parametri di modello	58

Tabella 5.2: Contributi resistivi nel caso standard	59
Tabella 5.3: Contributi resistivi nel caso Sliced-cells	60
Tabella 5.4: Confronto tra figure di merito assunte come riferimento e simulate mediante LT-SPICE nell'approccio standard	60
Figura 5.1: Caratteristica I-V simulata nell'approccio standard	61
Tabella 5.5: Confronto tra figure di merito assunte come riferimento e simulate mediante LT-SPICE nell'approccio Sliced-cells	62
Figura 5.2: Caratteristica I-V simulata nell'approccio Sliced-cells	63
Tabella 5.6: Confronto tra figure di merito di cella e modulo nel caso standard	64
Figura 5.3: Curve I-V e P-V del modulo standard	64
Tabella 5.7: Effetto dell'ombreggiamento sulle figure di merito del modulo standard	65
Figura 5.4: Curve I-V e P-V del modulo standard in presenza di ombreggiamento e diodi di bypass	66
Tabella 5.8: Confronto tra figure di merito di slice e modulo	66
Figura 5.5: Curve I-V e P-V del modulo Sliced	67
Tabella 5.9: Effetto dell'ombreggiamento sulle figure di merito del modulo Sliced	67
Figura 5.6: Confronto tra caratteristiche I-V del modulo Sliced soggetto a vari casi di ombreggiamento	68
Figura 5.7: Confronto tra caratteristiche P-V del modulo Sliced soggetto a vari casi di ombreggiamento	69
Figura 5.8: Confronto tra caratteristiche di corrente del diodo di bypass nel modulo Sliced soggetto a vari casi di ombreggiamento	70
Tabella 5.10: Confronto tra figure di merito di un modulo standard e uno Sliced, trascurando il contributo CTM	71
Tabella 5.11: Influenza del contributo CTM sui valori di potenza ed efficienza dei moduli standard e Sliced	72
Tabella 5.12: Confronto tra figure di merito di un modulo standard ed uno Sliced a seguito dell'ombreggiamento parziale in presenza dei diodi di bypass	73

Introduzione

Fin dagli albori della civiltà, l'essere umano ha utilizzato l'energia solare per soddisfare alcune delle sue necessità. Basti pensare che già ai tempi dei Romani furono concepiti veri e propri sistemi di riscaldamento delle abitazioni e dell'acqua, basati sull'utilizzo dell'energia proveniente dal Sole e sull'effetto serra indotto dal vetro. Al giorno d'oggi, la luce solare continua ad essere utilizzata per varie applicazioni, come ad esempio per il riscaldamento dell'acqua (“*water heating*”) e, ancor di più, per la produzione di energia elettrica, attraverso il fenomeno chiamato conversione fotovoltaica.

La conversione fotovoltaica sfrutta il meccanismo di generazione di carica elettrica prodotto dall'interazione della radiazione luminosa con un determinato tipo di materiale, tipicamente semiconduttore.

A partire dall'800, con gli studi di Edmond Becquerel sulla cella elettrolitica, e proseguendo con quelli di Albert Einstein sull'effetto fotoelettrico (che gli valsero il premio Nobel nel 1921), venne di fatto scoperta la capacità di un materiale di produrre corrente una volta illuminato dalla luce del Sole.

Per lo sviluppo a larga scala di tecnologie che sfruttassero l'effetto fotovoltaico occorrerà aspettare le prime missioni spaziali, ma soprattutto la crisi energetica degli anni '70. Fino a quel periodo rimasero, infatti, ai margini del mercato a causa dell'intensivo utilizzo dei combustibili fossili come fonti di energia. Tuttavia, l'innalzamento esponenziale dei prezzi e la presa di coscienza che le loro risorse erano destinate ad esaurirsi spinsero a ricercare energie alternative e ad investire su di esse, tra le quali l'energia solare e quindi l'effetto fotovoltaico.

Successivamente, negli anni '90 del secolo scorso, un'ulteriore spinta allo sviluppo di tecnologie basate sull'utilizzo dell'energia solare per la produzione di energia elettrica fu data dalle stipulazioni di trattati internazionali, come ad esempio il *Protocollo di Kyoto* nel 1997 [1], il cui obiettivo era puntare a ridurre l'impatto ambientale dovuto alla produzione di energia elettrica.

La crescita dell'utilizzo del fotovoltaico è tutt'ora in corso in tutto il pianeta. I paesi del far-East (Cina e Taiwan su tutti), a causa delle gravi crisi di inquinamento ambientale, stanno incrementando la produzione di celle e moduli (circa il 50% di quella mondiale) e l'installazione di impianti fotovoltaici, così come anche gli Stati Uniti e l'Europa [2]. Anche in Italia l'installazione di impianti fotovoltaici è in costante crescita (9,6% della produzione nazionale di energia elettrica e 23,2% di tutta l'energia rinnovabile [2]), come riporta il GSE (Gestore Servizi Energetici) [3], Figura 1.

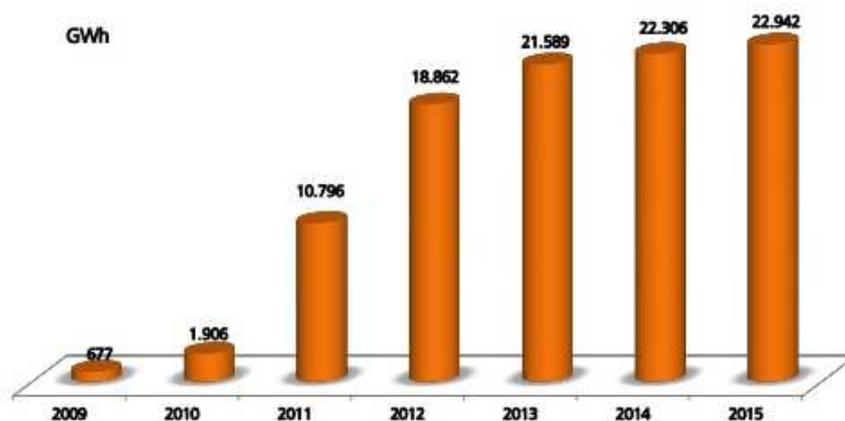


Figura 1: Produzione di energia elettrica tramite fotovoltaico in Italia [3]

La produzione di energia tramite effetto fotovoltaico necessita di particolari requisiti economici, tali da renderla competitiva se paragonata alle altre tipologie di produzione di energia elettrica. Per questo, la comunità fotovoltaica è impegnata in un continuo sforzo di ricerca e innovazione, con l'obiettivo di ridurre il costo di ogni Watt prodotto (*costo-per-Watt*) o più comunemente il rapporto *costo/efficienza*. Ciò significa poter ottenere un'efficienza (quantità di energia elettrica prodotta rispetto alla potenza solare incidente per irraggiamento) maggiore mantenendo inalterati i costi, oppure ridurre in maniera significativa la spesa per Watt prodotto a parità di efficienza di conversione.

Alla luce di quanto detto, problematiche che spaziano dall'utilizzo di diversi materiali a diverse architetture, sia a livello di singola *cella* sia a livello di moduli fotovoltaici (le celle solari sono viste come singole unità che formano il *modulo* o "pannello" fotovoltaico), sono alla base delle attività di ricerca attuali.

Obiettivi della tesi

Proprio l'ultima considerazione, riguardante lo studio di varie tipologie di modulo, visto come interconnessione di singole celle solari, è il concetto alla base della mia attività di tesi.

Il mio lavoro è basato sullo studio teorico e su simulazioni *SPICE* di due diverse tipologie di modulo fotovoltaico ad elevate prestazioni. In particolare, viene analizzata in dettaglio una metodologia innovativa di interconnessione di celle solari in modulo, ispirandosi a quanto riportato da *SunPower* (una fra le più importanti compagnie leader del mercato fotovoltaico) [4] [5]. Questo approccio, chiamato nel presente elaborato "approccio *Sliced-cells*" (il nome richiama a delle semplici "fette", vista la forma degli elementi che costituiscono il modulo), verrà confrontato con una tipologia di modulo standard comunemente installata e ben conosciuta in tutte le particolarità.

L'obiettivo è studiare una nuova soluzione di interconnessione, non più di celle complete, ma di piccole fettine (*slices*) connesse in modo tale da aumentare l'area offerta alla radiazione solare e incrementare le prestazioni a parità di area di modulo. Verrà mostrato come in questo modo, anche grazie alla riduzione di ulteriori perdite ottiche e resistive comunemente definite *Cell-to-Module losses (CTM)*, sia possibile prevedere dei valori di potenza più elevati rispetto al caso standard, a parità di dimensioni del modulo. Sarà inoltre considerato l'inserimento nella struttura di *diodi di bypass*, componenti necessari a garantire un corretto funzionamento dei moduli in condizioni di ombreggiamento.

Come detto, mi sono servito di simulazioni in ambiente *SPICE*, ovvero un simulatore di circuiteria elettronica mediante il quale mi è stato possibile simulare l'interconnessione di più parti a livello elettrico per ricreare una situazione realistica di moduli fotovoltaici realizzati mediante i due approcci (standard e *Sliced-cells*) presi in esame. Le analisi sono state effettuate a diverse condizioni di illuminazione, dopo una calibrazione dei modelli utilizzati, partendo da caratteristiche elettriche realistiche per i due blocchi fondamentali, ossia la cella fotovoltaica e la slice.

Struttura dell'elaborato

L'elaborato, che illustrerà in dettaglio i principi teorici utilizzati per investigare i vari approcci, i risultati ottenuti e la loro successiva analisi e discussione, è strutturato in questo modo:

- Nel primo capitolo, verranno spiegati i principi alla base dell'effetto fotovoltaico, la struttura dei semiconduttori ed il funzionamento di una *giunzione P-N*.
- Nel secondo capitolo, si richiamerà dapprima la struttura classica di una cella fotovoltaica, analizzandone in dettaglio i contributi resistivi che ne influenzano le figure di merito, per poi definire come essa può essere rappresentata da un circuito elettrico equivalente. Verrà spiegato come viene assemblato un modulo fotovoltaico, nonché quali sono e come le interconnessioni influenzano le figure di merito di esso. Inoltre, saranno illustrati gli effetti ottici e resistivi del passaggio da cella a modulo (CTM) e l'utilizzo dei diodi di bypass.
- Nel terzo capitolo, verrà presentato l'approccio Sliced-cells, sia a livello di parametri elettrici che di architettura, e si analizzeranno le principali differenze di un modulo realizzato con questa tecnologia rispetto al modulo standard.
- Il quarto capitolo racchiude la descrizione del flusso di lavoro svolto. Dopo una breve introduzione al simulatore utilizzato, verranno descritte le simulazioni e le analisi parametriche svolte nei due diversi approcci (caso standard e Sliced-cells). Inoltre, saranno descritte le diverse condizioni di ombreggiamento considerate.
- Nel quinto ed ultimo capitolo, verranno raccolti e discussi i risultati ottenuti dalle simulazioni SPICE. Verrà evidenziata la validità del modello e saranno analizzate le prestazioni delle due tipologie di modulo sia in condizioni di illuminazione completa che di ombreggiamento.

Buona lettura!

Capitolo 1

Principi base dell'effetto fotovoltaico

In questo capitolo introduttivo, si cercherà innanzitutto di spiegare come la luce solare incidente sulla superficie di un materiale possa generare cariche elettriche, ossia l'effetto fotovoltaico.

Verrà mostrato che questa proprietà è tipica dei materiali semiconduttori, come il Silicio, e si darà dunque una descrizione della loro struttura fisica e del loro comportamento in condizioni di illuminazione.

Si discuterà come, grazie alle proprietà della giunzione P-N, sarà possibile indirizzare le cariche fotogenerate verso i contatti. Infine, verranno elencati i meccanismi di ricombinazione limitanti per l'effetto fotovoltaico.

1.1 Effetto fotovoltaico

Il meccanismo di conversione fotovoltaica, ovvero la produzione di energia elettrica a seguito dell'interazione della luce con un materiale, è sostanzialmente suddiviso in tre fasi:

- Interazione della radiazione luminosa con un determinato materiale;
- Generazione di cariche elettriche (cariche fotogenerate);
- Separazione delle cariche elettriche fotogenerate e loro raccolta ai contatti.

È dunque necessario disporre di un materiale che, quando colpito dalla radiazione solare, generi cariche elettriche. Verrà in seguito mostrato come questa proprietà sia tipica dei materiali semiconduttori. Inoltre, è indispensabile un meccanismo che separi queste cariche fotogenerate e che le trasporti in zone dove possano essere raccolte e trasferite al circuito esterno (contatti).

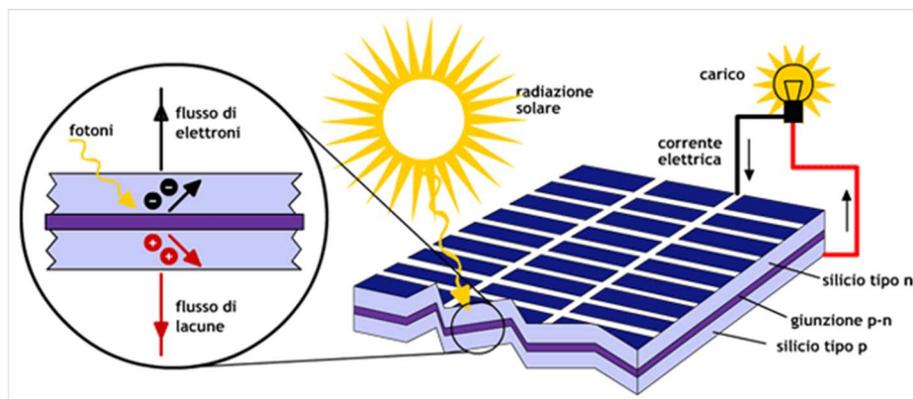


Figura 1.1: Schema di base dell'effetto fotovoltaico [6]

Nel seguito, saranno approfonditi i meccanismi alla base del processo di conversione, insieme ai principali effetti di ricombinazione che limitano l'efficienza di conversione fotovoltaica.

1.1.1 Struttura dei semiconduttori

Si definiscono semiconduttori quei materiali che dal punto di vista della conduttività hanno caratteristiche intermedie rispetto a materiali isolanti e conduttori. Il semiconduttore per eccellenza, per facilità di reperibilità e di lavorabilità, è sicuramente il Silicio (Si), solido cristallino di numero atomico 14, appartenente al IV gruppo. Possiede

dunque, per ogni atomo, quattro elettroni di valenza adibiti alla formazione di legami covalenti con gli atomi del cristallo ad esso adiacenti.

Nei solidi cristallini gli elettroni possono assumere valori di energia compresi all'interno di bande di estensione finita (Figura 1.2), separate da intervalli di valori proibiti (*GAP energetici* o *Band Gap*) [7].

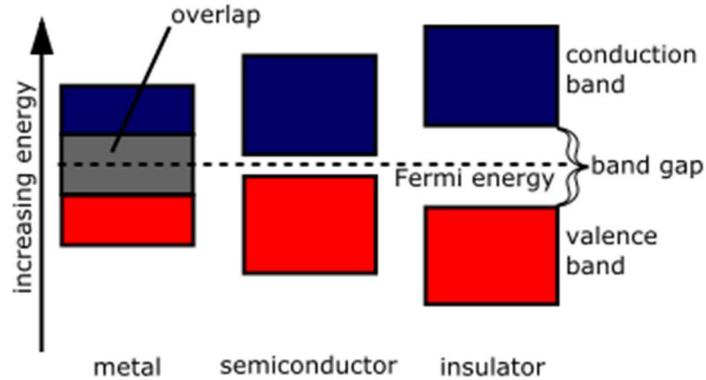


Figura 1.2: Bande di energia dei materiali [8]

In particolare, vengono definite due bande fondamentali: *di valenza* (*BC*) e *di conduzione* (*BV*). La prima, a più bassa energia, contiene gli elettroni destinati a formare i legami covalenti, ovvero a rendere “stabile” il cristallo; la seconda, ad energia maggiore, contiene quegli elettroni non vincolati da legami, quindi liberi di muoversi, cioè disponibili alla conduzione.

Un elettrone in banda di valenza, se acquisisce una quantità di energia almeno pari al gap energetico, può passare in banda di conduzione, rompendo il legame covalente. Viene alterata così la struttura del reticolo, e tale mancanza dell’elettrone di legame può essere identificata come una pseudoparticella di carica positiva, definita “*lacuna*” (*h*). Si parla quindi di generazione di una coppia elettrone-lacuna (*e-h*) [9] [10].

L’energia (*E*) in questione è ovviamente quella dei fotoni incidenti alla superficie del semiconduttore. Solo i fotoni con delle lunghezze d’onda (λ) adeguate potranno contribuire alla generazione di carica, in quanto:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} \quad (1.1)$$

dove: $h = 6,628 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$ è la *costante di Planck* [11], e c la *velocità della luce* ($c = 3 \cdot 10^8 [m/s]$).

Esistono in realtà due tipologie di gap energetico (Figura 1.3): il *gap diretto* (limite superiore della BV e limite inferiore della BC allineati) e il *gap indiretto* (non c'è allineamento). In questo elaborato non verrà approfondito il concetto, ma bisogna tener conto che, essendo il Silicio caratterizzato da un gap indiretto, per poter garantire il passaggio di un elettrone in banda di conduzione, oltre all'*Energy Gap* ($E_g \cong 1,12\text{eV}$) sarà necessaria un'ulteriore contemporanea interazione dell'elettrone con il reticolo [9] [10].

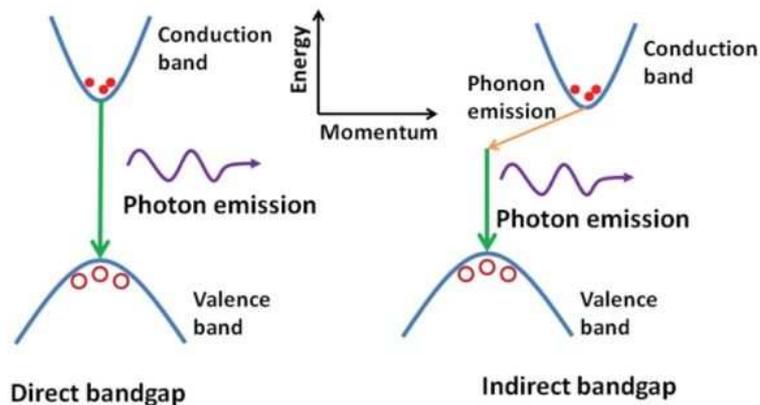


Figura 1.3: Band Gap diretto (sinistra) e Band Gap indiretto (destra) in una rappresentazione di energia in funzione del vettore d'onda K [12]

1.1.2 Assorbimento della radiazione luminosa e separazione delle cariche: la giunzione P-N

Sebbene in meno di un'ora il Sole invii sulla Terra una quantità di energia pari all'intero consumo mondiale annuo, buona parte di questi fotoni viene assorbita e deviata (*scattering*) dall'atmosfera terrestre. Inoltre, parte di quelli incidenti la superficie del semiconduttore attraversano l'intera cella fotovoltaica, altri ancora vengono riflessi. Solo l'energia associata alle particelle assorbite dal materiale promuove infatti la transizione degli elettroni dagli stati occupati a quelli ad alta energia, creando così una coppia elettrone-lacuna (o cariche fotogenerate).

Una volta create le cariche fotogenerate, è necessaria la presenza di un meccanismo che le riesca a separare e a trasportare in "zone di raccolta" per ottenere corrente. Le cariche fotogenerate, infatti, se non separate, tenderebbero a ricombinarsi tra loro per tornare a raggiungere una condizione di equilibrio del materiale (che era stata alterata al momento dell'interazione con la luce).

Al fine di realizzare un dispositivo in grado di separare le cariche fotogenerate, si ricorre al processo di *drogaggio* del semiconduttore: si

sostituiscono all'interno del cristallo alcuni atomi di Silicio con degli atomi estranei, anch'essi di materiale semiconduttore. Con un drogaggio di *tipo P* (“*accettore*”) si generano lacune in eccesso in BV grazie all'inserimento di atomi del III gruppo (tre elettroni di valenza, come il Boro), mentre con un drogaggio di *tipo N* (“*donatore*”) si generano elettroni in eccesso in BV grazie all'inserimento di atomi del V gruppo (cinque elettroni di valenza, come il Fosforo). Mediante questa variazione di concentrazione delle coppie e-h si riesce a controllare la conducibilità del materiale.

Realizzando la transizione fra due regioni di semiconduttore caratterizzate da drogaggi opposti si crea la cosiddetta giunzione P-N (Figura 1.4): gli elettroni in eccesso in regione N e le lacune in eccesso in regione P, diffondono contro gradiente nella regione adiacente attraverso la giunzione, al fine di ristabilire l'equilibrio di carica. In questo modo però, a ridosso della giunzione, si creano delle *regioni di svuotamento*, ovvero di parziale positività nella zona P e di parziale negatività nella zona N (differenza di potenziale). Ciò fa sì che si generi un campo elettrico (*built-in*) che tende a separare le cariche fotogenerate (essendo elettroni e lacune cariche di segno opposto) (Figura 1.4).

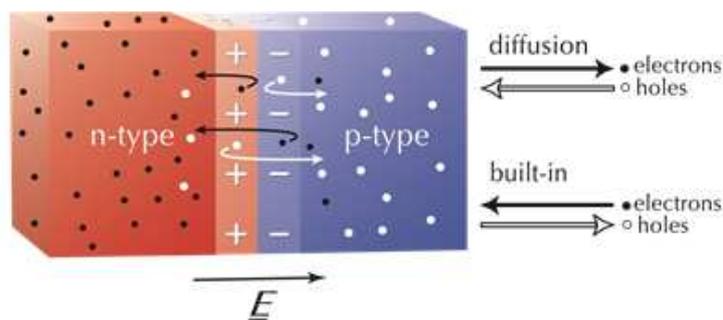


Figura 1.4: Rappresentazione della giunzione P-N all'equilibrio [13]

Le cariche così separate possono essere facilmente raccolte mediante opportuni contatti elettrici (elettrodi) posti alle estremità delle due *regioni quasi-neutre*.

1.1.3 Principali meccanismi di ricombinazione

Prima di parlare della cella fotovoltaica in se, è opportuno far luce su come un elettrone generato per effetto fotovoltaico possa ricombinarsi con la lacuna corrispondente, facendo così scomparire le cariche libere. Tali meccanismi sono dunque limitanti per la conversione

fotovoltaica e sono da considerare in fase di progettazione di una cella solare.

Gli effetti di ricombinazione possono infatti essere di molteplice natura, e tra i principali vale la pena riportare:

- *Ricombinazione radiativa*: il vero e proprio processo inverso della generazione della coppia e-h. Infatti, un elettrone in BC effettua una transizione in BV (liberando energia sotto forma di un fotone) tanto più probabilmente quanti più elettroni sono presenti nella BC stessa.
- *Ricombinazione Auger*: si verifica quando l'energia prodotta da una ricombinazione radiativa, anziché essere emessa sotto forma di fotone, viene ceduta direttamente ad un elettrone vicino; quest'ultimo perderà nuovamente tale energia (sotto forma di *fononi* [9] [10]) interagendo con il reticolo.
- *Ricombinazione a causa dei livelli di trappola – SRH*: è dovuta ai livelli di energia intermedi presenti nel *Band Gap*, detti appunto *livelli di trappola*, che rendono molto più probabile la discesa dell'elettrone in BC verso la BV. Può essere causata da atomi impuri presenti nel semiconduttore, o da atomi di drogaggio che non hanno raggiunto la posizione sostitutiva degli atomi di Silicio, ma che si sono posizionati in una locazione interstiziale (*drogaggio non-attivato*), oppure da difetti cristallografici delle superfici di contatto tra materiali differenti.

Capitolo 2

La cella e il modulo fotovoltaico

In questo capitolo, sarà inizialmente mostrata la struttura fisica di una cella fotovoltaica classica.

Sarà quindi analizzata la *caratteristica corrente-tensione (I-V)* della cella in presenza di illuminazione, e saranno definite le principali *figure di merito*, ovvero i parametri elettrici che regolano il comportamento del dispositivo.

Sarà quindi introdotto il modello circuitale equivalente della cella fotovoltaica, focalizzandosi in particolar modo sugli effetti resistivi parassiti.

Il capitolo si concluderà con la spiegazione di come vengono assemblate le celle solari in quello che viene chiamato modulo e come degradino le principali figure di merito a seguito di questo assemblaggio (Cell-To-Module losses). Infine, verrà analizzato l'effetto dell'inserimento dei diodi di bypass nella struttura.

2.1 La cella solare fotovoltaica

Come anticipato nelle pagine precedenti, le celle fotovoltaiche (o *celle PV*, da *PhotoVoltaic*) sono dispositivi di materiale semiconduttore riconducibili, nella loro realizzazione più comune, ad una giunzione P-N. La radiazione luminosa assorbita viene dunque convertita in un flusso di elettroni direzionato (corrente fotogenerata) e convogliato verso i contatti.

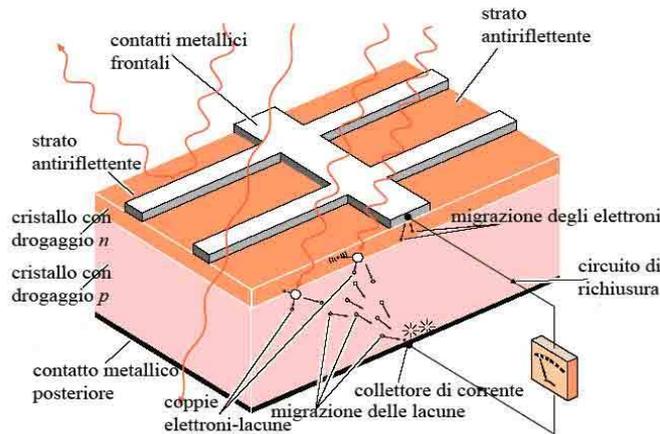


Figura 2.1: Esempio di cella fotovoltaica convenzionale al Silicio [14]

La tipica struttura di una cella PV (Figura 2.1) consta di uno strato di semiconduttore, nel caso proposto drogato di tipo P, detto *base* (o *bulk*), nel quale avviene l'effettivo assorbimento della radiazione luminosa (*regione attiva*), al di sopra del quale è posizionato uno strato più sottile di semiconduttore drogato N (ovvero a drogaggio opposto rispetto al bulk), detto *emettitore*, creando così la vera e propria giunzione P-N.

Per poter raccogliere le cariche, vengono posti un contatto metallico posteriore (tipicamente Argento o Alluminio), che può anche ricoprire la totalità dell'area della cella, e dei contatti metallici superiori. Questi ultimi, realizzati quasi sempre in Argento, sono tipicamente assemblati a formare una struttura a griglia, permettendo così alla luce di poter effettivamente interagire con il semiconduttore. Questa sarà la tipologia di cella standard utilizzata in questo lavoro.

Si distinguono due tipi di contatti superficiali: i *fingers*, stretti e sottili, sono distribuiti uniformemente sulla superficie della cella e servono a convogliare gli elettroni, e i *busbars*, piste metalliche più spesse e larghe, che hanno lo scopo di trasportare effettivamente la corrente generata verso l'esterno (Figura 2.2). Al fine di garantire un giusto

compromesso tra perdite resistive (minori all'aumentare della superficie metallizzata [11] [15]) e per ombreggiamento (in quanto i fotoni che colpiscono la superficie metallica non riescono ad attraversarle) dovute a questi contatti, la loro progettazione risulta di notevole importanza.

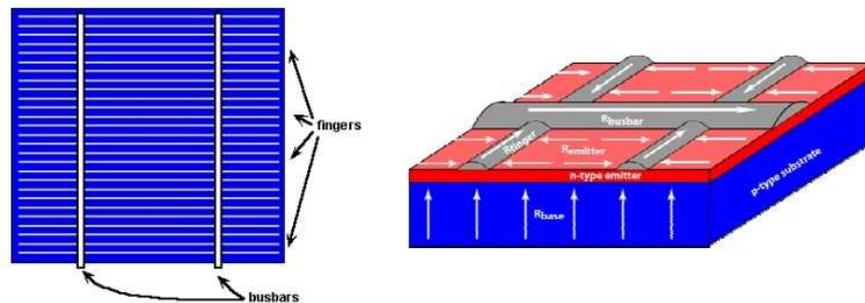


Figura 2.2: Busbars e fingers di una cella classica (sinistra) e andamento della corrente (destra) [16]

Le celle PV in commercio presentano, tuttavia, degli ulteriori accorgimenti strutturali che mirano ad aumentare l'assorbimento da parte del Silicio riducendo le perdite per riflessione e ricombinazione.

Per prima cosa, viene posto un sottile strato anti-riflettente (tipicamente ossido di Silicio) sulla superficie frontale non coperta dai contatti, detto *ARC (Anti Reflective Coating)*. Tale strato è spesso realizzato con la forma di piramidi rovesciate, detta *texturing* (Figura 2.3), modificando così anche la morfologia della giunzione P-N; in questo modo, per effetti ottici, la radiazione luminosa penetra più facilmente ed esce con più difficoltà dalla cella stessa. Inoltre, per garantire maggiore protezione dei contatti da fenomeni di ricombinazione, in prossimità di essi il semiconduttore N viene drogato più pesantemente (N^+), riducendo la percentuale di lacune presenti, le quali vengono spinte da un campo elettrico nella zona meno drogata (*Passivated Emitter*).

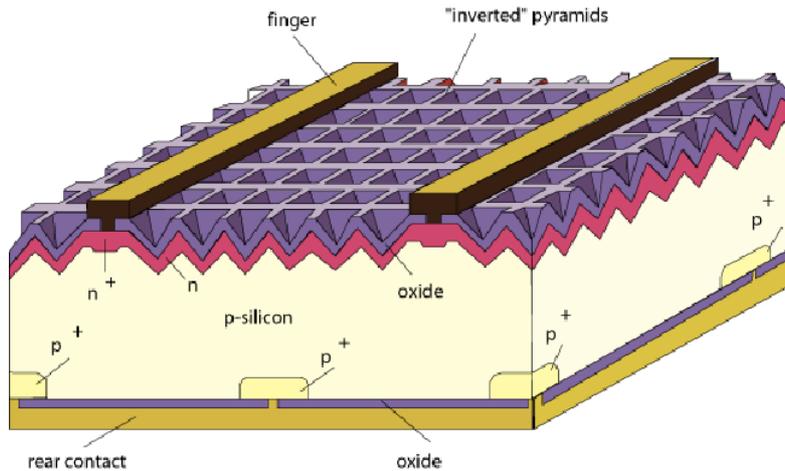


Figura 2.3: Esempio di cella fotovoltaica ad elevate prestazioni [17]

Un meccanismo analogo viene utilizzato sul *back* della cella: questa volta viene posto un sottile strato di ossido di Silicio fra la superficie metallizzata e il semiconduttore P, il quale viene drogato pesantemente (P+) in prossimità delle zone non ricoperte dall'ossido, facendo sì che aumenti la probabilità che i portatori minoritari vengano raccolti e non ricombinati, grazie al campo elettrico che nasce nella giunzione P-P+ (*BSF, Back Surface Field*).

Definita la struttura classica di una cella PV, per poterla analizzare dal punto di vista elettrico, occorre considerare la situazione in cui la giunzione P-N si trovi in condizione di illuminazione.

2.1.1 Caratteristica I-V e figure di merito

Una giunzione P-N è sostanzialmente un diodo. Evitando di riportare le equazioni che descrivono i processi delle cariche in questa situazione, per le quali si rimanda ai testi [9] [10], l'espressione della corrente del diodo è ben nota:

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{V}{n \cdot V_t} \right)} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Tale equazione corrisponde tuttavia ad una giunzione non illuminata, che ben sappiamo non produrre potenza, bensì dissiparla.

In condizioni di illuminazione, alla soprastante equazione va aggiunto un termine correttivo corrispondente alla corrente fotogenerata I_L , opposta alla corrente del diodo:

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{V}{n \cdot V_t}\right)} - 1 \right) - I_L \quad (2.2)$$

Questo contributo negativo di corrente si traduce in una traslazione verso il basso, per una quantità pari a I_L , della curva corrente-tensione (*caratteristica I-V*) del diodo tradizionale (Figura 2.4).

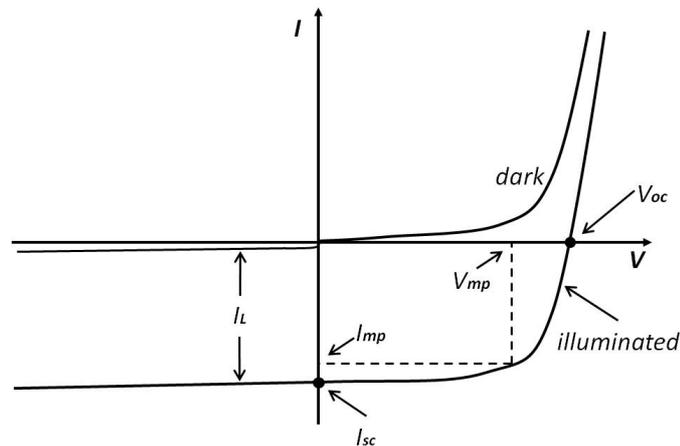


Figura 2.4: Caratteristica I-V in condizioni dark e light [18]

Si nota chiaramente come, per determinati valori di tensione, la potenza viene prodotta ($P = V \cdot I < 0$) e non dissipata. All'aumentare di V si riduce l'intensità del campo che si oppone alla corrente diffusiva del diodo. Il conseguente incremento della corrente di polarizzazione diretta della giunzione causa una progressiva riduzione della potenza elettrica messa a disposizione del carico.

Il valore limite che la tensione può assumere affinché la cella produca potenza è detta *tensione a circuito aperto* (V_{oc}), in quanto in corrispondenza di essa la corrente imposta su di un eventuale carico esterno è nulla. Essa costituisce una prima *figura di merito* della cella fotovoltaica, ossia una di quelle grandezze che descrivono il comportamento elettrico di questo dispositivo. Analiticamente è facilmente ricavabile dall'equazione (2.2) ponendo $I=0$:

$$V_{oc} = V_t \cdot \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.3)$$

Questo parametro è influenzato dalle caratteristiche del semiconduttore, essendo esso dipendente dalla *corrente di saturazione* I_0 , a sua volta correlata agli effetti di ricombinazione delle cariche nel semiconduttore.

Altra figura di merito è la *corrente di cortocircuito* (I_{sc}), praticamente coincidente con la corrente fotogenerata alle temperature tipiche di funzionamento del dispositivo. Questo parametro dipende dalla superficie della cella colpita dalla radiazione solare, perciò è importante definire anche una *densità di corrente di cortocircuito* (j_{sc}), ovvero gli Ampere per unità d'area generati dal dispositivo.

L'obiettivo di una cella fotovoltaica è quello di operare nella condizione di massima potenza (P_{max}) generabile, che definisce nella caratteristica I-V un punto di operatività ideale (V_{mp}, I_{mp}), detto *Maximum Power Point (MPP)*. Il rapporto tra l'area del rettangolo definito da questi due punti e quello definito dal prodotto $V_{oc} \cdot I_{sc}$ è detto *Fill Factor (FF)*, letteralmente *fattore di riempimento*:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.4)$$

Questa figura di merito identifica la bontà della caratteristica di uscita, ovvero quanto essa sia “quadrata” (Figura 2.5). Oltre a dipendere fortemente dal valore di tensione a circuito aperto, il Fill Factor risente parecchio anche del valore di resistenza serie parassita della cella (analizzata in dettaglio nel seguente sottocapitolo). Definendo infatti una *tensione normalizzata* $v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_t}$ ed una *resistenza serie normalizzata* $r_s = \frac{R_s}{r_{caratt}} [m^{-2}]$ (con $r_{caratt} = \frac{V_{oc}}{j_{sc}} [\Omega m^2]$ detta *resistenza caratteristica*), risulta [11] [15]:

$$FF = (1 - r_s) \cdot \left(\frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} \right) \quad (2.5)$$

Si trovano in letteratura altre espressioni riguardanti il Fill Factor che prendono in considerazione anche gli effetti che le resistenze parallele parassite hanno su di esso; tuttavia, per considerazioni che verranno fatte in seguito sui contributi resistivi, la (2.5) consente di ottenere valori molto attendibili di FF.

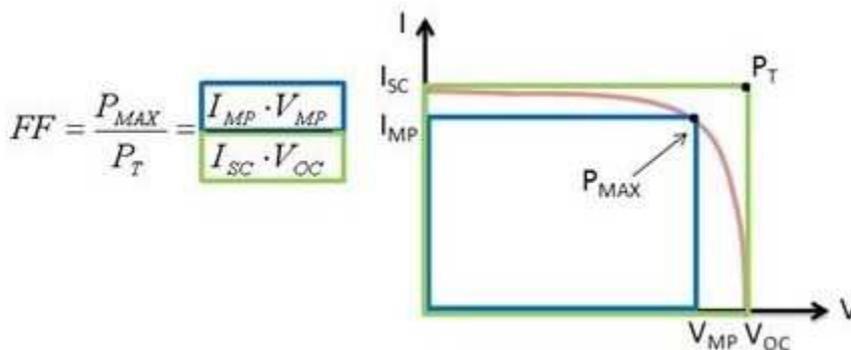


Figura 2.5: Rappresentazione delle figure di merito [19]

L'ultima figura di merito è l'*efficienza di conversione* (η), in sostanza quanta potenza viene effettivamente prodotta della cella a seguito di quella incidente sulla sua superficie (P_{in}). Analiticamente è descritta dalla seguente espressione:

$$\eta = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.6)$$

Da questa equazione è facile intuire come la resistenza serie, influenzando in maniera diretta sul Fill Factor, possa essere responsabile di perdite o guadagni in termini di efficienza, dunque di potenza generata, rendendo necessaria una sua analisi nel dettaglio.

2.1.2 Principali effetti resistivi

Le perdite resistive di una cella fotovoltaica sono differenziate in due contributi: una *resistenza parallelo* (R_p , o *Rsh* da *shunt resistance*), che perturba negativamente il valore di V_{oc} , ed una *resistenza serie* (R_s), la quale agisce direttamente sul Fill Factor, dunque su efficienza e potenza emessa dalla cella stessa.

La R_p rappresenta l'effetto di percorsi di conduzione interni alla cella che cortocircuitano localmente la giunzione, dovuti sostanzialmente a difetti di fabbricazione. Si aggira tipicamente su valori molto elevati ($\sim 10^5 \Omega$) ed i suoi effetti non sono tali da renderne opportuna un'analisi (ponendola di un ordine di grandezza maggiore o minore si riscontrerebbe una variazione della V_{oc} nelle prime cifre decimali).

Viceversa, anche una piccola variazione di R_s può indurre un cambiamento significativo delle figure di merito sopracitate. In particolare, più il suo valore cresce e più sarà la potenza dissipata internamente dalla cella ($P_d = R_s \cdot I^2$), causando un degrado delle prestazioni.

Verrà di seguito mostrato quali parametri influenzano il suo valore, ed emergerà in particolare come la scelta di un opportuno dimensionamento per fingers e busbars sia fondamentale per ridurre il fattore di perdita di potenza dovuto ad R_s .

Essa può essere analizzata esaminando separatamente i principali contributi che la caratterizzano, considerandoli in realtà come resistenze per unità d'area ($[\Omega m^2]$) [20]:

- **Resistenza dei fingers**

I fingers sono quei contatti posizionati sulla superficie frontale della cella che hanno lo scopo di convogliare le cariche fotogenerate raccolte in superficie verso i busbars. Essendo stretti e sottili (al fine di ridurre l'area inibita) dovranno avere lunghezza limitata per poter garantire una resistenza non troppo elevata.

L'espressione che viene comunemente usata in letteratura per modellare tale resistenza è la seguente [20]:

$$R_{fingers} = k_f \cdot \rho_f \cdot \frac{L_f}{W_f \cdot H_f} \cdot \frac{1}{N_f \cdot 2 \cdot N_{BB}} \cdot Area \quad (2.7)$$

dove appunto: k_f è una costante moltiplicativa generalmente uguale ad $\frac{1}{3}$, ρ_f è la resistività del materiale con cui è stato fabbricato, L_f la lunghezza, W_f la larghezza, H_f lo spessore, N_{BB} e N_f rispettivamente il numero di busbars e di fingers collegati al singolo busbar da uno dei due lati.

$k_f \cdot \rho_f \cdot \frac{L_f}{W_f \cdot H_f}$ rappresenta l'espressione generale della resistenza di un finger così come si trova in letteratura, mentre il fattore moltiplicativo $\frac{1}{N_f \cdot 2 \cdot N_{BB}}$ evidenzia che questi segmenti conduttivi sono tra loro in parallelo e connessi ad un busbar da entrambi i lati di esso.

- **Resistenza dei busbars**

I busbars sono quei contatti frontali che hanno lo scopo di raccogliere tutte le cariche fotogenerate e convogliarle verso altre celle o verso l'esterno. Sono dunque di sezione e lunghezza maggiore rispetto ai fingers, ed in fase di fabbricazione è opportuno spaziarli uniformemente, in modo tale da poter garantire la stessa lunghezza dei fingers e ridurre così eventuali effetti di *mismatch* (Figura 2.2).

Anch'essi sono tra loro in parallelo, e l'espressione che viene comunemente usata in letteratura per modellare il loro effetto resistivo è la seguente [20]:

$$R_{busbars} = k_{BB} \cdot \rho_{BB} \cdot \frac{L_{BB}}{W_{BB} \cdot H_{BB}} \cdot \frac{1}{N_{BB}} \cdot Area \quad (2.8)$$

I parametri in questione hanno lo stesso significato di quelli relativi ai fingers, così come assume lo stesso valore la costante moltiplicativa k_{BB} .

Come verrà mostrato nel capitolo 5, questo valore sarà il maggiore contributo alla resistenza serie totale della cella.

- **Resistenza degli extra-busbars**

Per *extra-busbars* (o *ribbons*) si intendono i nastri metallici adibiti alla connessione delle celle in serie tra loro al fine di costituire la struttura modulare (sottocapitolo 2.2). Questi connettono il *front* di una cella (essendo sostanzialmente appoggiati sopra una porzione di busbar) con il back della cella adiacente, come mostrato in Figura 2.6, permettendo così alla corrente di fluire attraverso le celle stesse e garantendo maggiore rigidità della struttura.

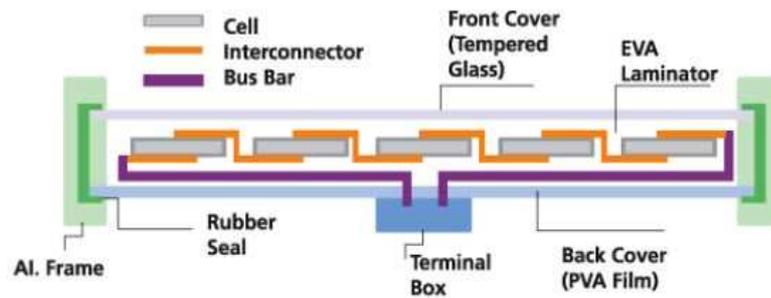


Figura 2.6: Ribbons (in arancio) adibiti alla connessione inter-cella [21]

L'espressione matematica della loro resistenza ha la stessa forma di quella di un busbar classico, con la sola differenza che questi sono molto più corti e leggermente più larghi (meno influenti in termini di resistenza serie, ma introducono un leggero ombreggiamento).

- **Resistenza di contatto**

È il contributo resistivo dovuto alla giunzione fra contatto metallico ed emettitore. Come si è detto, tale zona è critica anche ai fini della ricombinazione delle coppie e-h, tanto che si ricorre spesso alla soluzione di passivated emitter descritta in precedenza (Figura 2.3).

In letteratura viene proposta la seguente espressione [20]:

$$R_{contact} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_{contact}}{L_t \cdot L_f} \cdot coth\left(\frac{W_f}{2 \cdot L_t}\right) \cdot \frac{1}{N_f \cdot N_{BB}} \cdot Area \quad (2.9)$$

Il termine $L_t [m^{\frac{1}{2}}]$ è definito come *transport length* (letteralmente *lunghezza di trasporto*), e si rimanda al testo [20] per una trattazione dettagliata.

- **Resistenza dell'emettitore**

L'emettitore, in una cella fotovoltaica tipica, è la zona a drogaggio opposto a quello del bulk (nel caso proposto N) in cui le cariche vengono convogliate prima di essere effettivamente raccolte dai contatti. Essendo la metallizzazione disposta in modo uniforme nella superficie, la traiettoria che un generico portatore seguirà sarà praticamente verticale, dalla giunzione con la zona drogata P alla zona di contatto con i fingers (Figura 2.7).

$$R_{emitter} = \frac{1}{12} \cdot \frac{R_{sheet}}{N_f \cdot N_f} \cdot Area \quad (2.10)$$

Quella appena riportata è la formula utilizzata maggiormente in letteratura [20], dove si nota chiaramente come l'unico parametro geometrico da cui questo termine resistivo dipende è lo spessore della regione di emettitore $H_{emitter}$ (t in Figura 2.7). Infatti, la *sheet resistance* è definita come:

$$R_{sheet} = \frac{\rho_{emitter}}{H_{emitter}} [\Omega] \quad (2.11)$$

- **Resistenza della base**

L'ultimo contributo resistivo che influisce sul valore totale di resistenza serie è determinato dal semiconduttore a drogaggio P costituente la cella fotovoltaica. Questa regione è definita appunto base (o bulk) ed è la vera e propria zona dove avviene la generazione della coppia elettrone-lacuna, ovvero dove la radiazione luminosa viene assorbita (Figura 2.7).

I portatori minoritari generati in base diffondono verso l'alto in direzione dell'emettitore, percorrendo (nel caso peggiore) l'intero spessore della regione considerata (w), per cui nel caso peggiore vale [20]:

$$R_{base} = \rho \cdot w \quad (2.12)$$

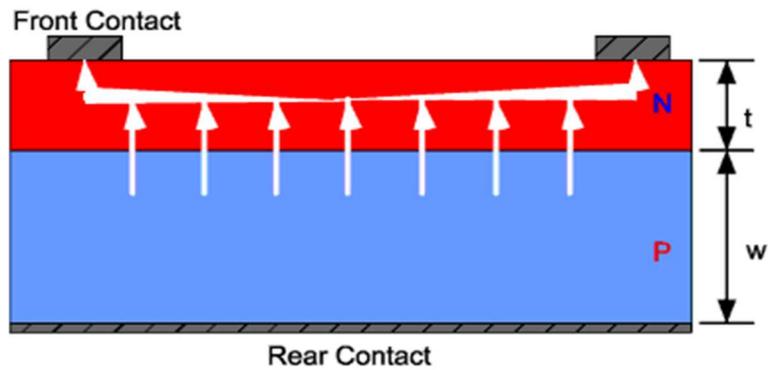


Figura 2.7: Flusso di corrente attraverso base ed emettitore [22]

2.1.3 Circuito elettrico equivalente

La cella solare è tipicamente rappresentabile attraverso un circuito elettrico equivalente. Esso è costituito da componenti in grado di rappresentare in maniera concentrata gli effetti fisici distribuiti in realtà su tutto il dispositivo (funzionamento della giunzione, effetti parassiti, generazione di corrente).

Lo schema classico è quello rappresentato in Figura 2.8:

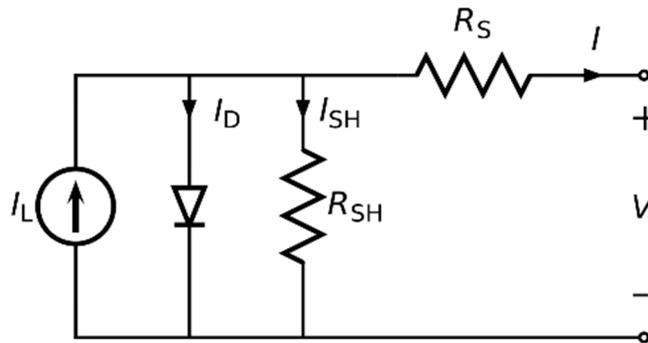


Figura 2.8: Modello elettrico equivalente (a costanti concentrate) di una cella solare [23]

Partendo da sinistra si possono evidenziare:

- Generatore di corrente ideale: rappresenta la corrente fotogenerata I_L , ovvero le cariche generate a seguito dell'interazione della radiazione luminosa con il materiale semiconduttore che potenzialmente possono essere raccolte agli elettrodi e mandate verso un circuito esterno. È un valore costante proporzionale all'area della cella, definito con

riferimento a condizioni di soleggiamento e temperatura standard (irradianza $G=1\text{KW/m}^2$, temperatura $T=25^\circ\text{C}$).

- Diodo: rappresenta la vera e propria giunzione P-N in condizioni di non illuminazione. Il *fattore di idealità* n (numero reale maggiore o uguale ad uno) che compare nell'equazione della corrente che lo attraversa (2.1), evidenzia i difetti dei substrati di Silicio generati in fase di fabbricazione.
- Resistenza parallelo (*Resistenza di shunt*): identifica le perdite ohmiche dovute ai cortocircuiti locali della giunzione P-N.
- Resistenza serie: la cui trattazione dettagliata è stata riportata nel sottocapitolo 2.1.2.

2.2 Il modulo fotovoltaico

Il modulo fotovoltaico, o *pannello fotovoltaico*, è costituito da più celle collegate in serie. Il processo di assemblaggio del modulo non è così semplice come potrebbe sembrare. Infatti, mentre dal punto di vista elettrico esso è riconducibile sostanzialmente al collegamento in serie di celle fotovoltaiche (Figura 2.11), esistono altre caratteristiche di tipo strutturale di importanza pratica fondamentale.

Dopo una prima fase di test e collegamento in serie delle celle funzionanti correttamente (collegamento *front-back* mediante ribbons), la struttura viene stratificata, posizionando sopra e sotto di esse uno strato di materiale polimerico trasparente (*incapsulante*), tipicamente *EVA (etilvenilacetato)*, necessario per fissare e proteggere le singole celle da urti. Inoltre, al fine di proteggere il modulo da agenti atmosferici esterni, viene posizionato uno strato di vetro (o materiale plastico trasparente) sulla superficie esposta. Un ultimo accorgimento che viene adottato prima del montaggio della cornice in Alluminio e il fissaggio dei terminali, è l'adagiamento della struttura su un materiale polimerico a bassa assorbenza, detto *tedlar*, che garantisce maggiore rigidità alla struttura (Figura 2.9).



Figura 2.9: Strati di assemblaggio di un classico modulo fotovoltaico [24]

Tutti questi accorgimenti strutturali influiranno non poco sulle prestazioni del modulo rispetto a quelle della singola cella “non-incapsulata”. Verrà in seguito mostrato come le perdite ottiche e resistive ad essi associati possano essere sintetizzati in un unico parametro, definito CTM (Cell-to-module losses), che influirà in maniera diretta sulla potenza generata dal dispositivo.

2.2.1 Caratteristica I-V e figure di merito di un modulo “standard”

I moduli più diffusi sul mercato hanno una superficie attorno a 1m^2 e sono costituiti dalle 36 alle 72 celle (tipicamente di Silicio multicristallino), garantendo una potenza nominale dagli 80Wp ai 250Wp e un rendimento tipico del 16-17% (rispetto a circa il 20% raggiungibile da molte celle in commercio) [2].

La caratteristica corrente-tensione di un generico modulo fotovoltaico (Figura 2.10) è formalmente molto simile a quella di una singola cella.

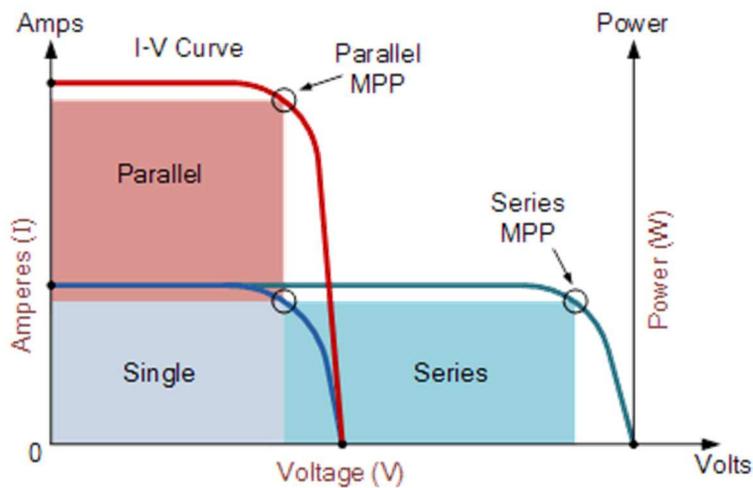


Figura 2.10: Confronto tra caratteristica I-V di una classica cella PV e di un generico modulo PV [25]

Ciò che si nota a primo impatto è che, a meno di perdite o guadagni ottici dovuti a riflessioni ed assorbimenti dell'incapsulante (come verrà mostrato nel sottocapitolo 2.2.3), il valore di *corrente di cortocircuito* è rimasto praticamente invariato rispetto a quello della singola cella. Infatti, come già accennato, dal punto di vista elettrico un modulo consiste nella connessione in serie delle singole celle fotovoltaiche, perciò la corrente che vi scorre equivale all'incirca a quella generata da una qualsiasi di esse.

Ciò che differenzia le due caratteristiche è infatti la *tensione a circuito aperto*, che grazie alla connessione in serie risulta essere la somma di tutte le V_{oc} delle celle costituenti il modulo, dando così una forma più “allungata” alla curva (viceversa per un eventuale connessione in parallelo) (Figura 2.10).

Analogamente si comportano corrente e tensione di massima potenza (I_{mp} e V_{mp}), dunque il valore di *potenza* P_{max} emessa dal modulo è la somma delle potenze prodotte dalle singole celle. L'MPP (punto di massima potenza), dunque, segue l'andamento della curva traslando verso tensioni sempre più elevate al crescere del numero di celle collegate in serie.

Tra le figure di merito si riporta anche il *Fill Factor*, nonostante esso abbia significato solo a livello di cella. Per questo motivo il suo valore non cambia.

Cambia invece significativamente il valore di *efficienza di conversione*, ovvero il rapporto tra potenza emessa e potenza incidente. Infatti, oltre che al contributo CTM, la perdita di efficienza è dovuta alla spaziatura fra le celle (*spacing*), in quanto, a differenza di quanto avviene per la singola cella, la superficie totale del modulo è superiore all'area utile (somma delle superfici delle celle costituenti il modulo), poiché queste ultime sono spaziate tra loro e dai bordi esterni del modulo, come si nota chiaramente in Figura 2.11.

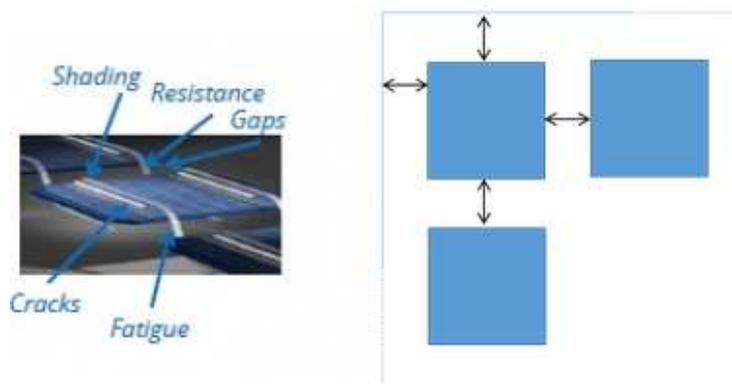


Figura 2.11: Schematizzazione della connessione in serie tra celle (sinistra) [5] e dell'effetto di spacing inter-cella e cella-bordo (destra)

2.2.2 Diodi di bypass

Nel collegamento in serie di celle solari è importante considerare che, essendo la corrente che vi scorre la stessa, essa sarà forzata al valore più basso generato all'interno della serie. Infatti, ogni singola cella non può essere percorsa da più corrente di quanto essa riesca a generare. In altre parole, la cella meno efficiente limita la corrente della serie, e quindi l'efficienza di conversione, dell'intero modulo.

Nasce dunque la necessità di attuare processi produttivi che assicurino il più possibile uniformità tra le celle e di classificarle in base a criteri di *matching* tra le caratteristiche dei dispositivi stessi.

Tuttavia, tali accorgimenti non bastano a garantire un corretto funzionamento del modulo in condizioni di ombreggiamento (*shadowing* totale o parziale) o di eventuale guasto di una o più celle. Infatti, nei casi appena citati, dove si immagina un modulo formato da n celle interconnesse in serie, la corrente che fluirebbe in esso sarebbe praticamente nulla (perdendo così il suo totale contributo in potenza) anche se una sola delle celle non funzionasse correttamente (ombreggiata). Inoltre, un fenomeno ancora più distruttivo sono i cosiddetti *hot-spot* (*punti caldi*): la cella ombreggiata (*shaded*), essendo polarizzata inversamente, si oppone infatti al flusso di corrente generato dalle celle illuminate, causando dissipazione di potenza. Il calore prodotto, per valori di corrente sufficientemente alti, potrebbe causare la rottura del singolo dispositivo o dell'intero modulo. Considerando che in un modulo di dimensioni tipiche $1 \times 1,5 \text{ m}^2$ (circa) installato tipicamente in zone dove eventuali ostacoli all'illuminazione (artificiali e non) possono essere comunque presenti, questa problematica necessita di essere affrontata.

Per far fronte a questi problemi, ogni modulo viene dotato dei cosiddetti diodi di bypass, inseriti a livello circuitale. Questi dispositivi, nell'approccio standard, vengono posizionati all'interno della struttura modulare in parallelo a gruppi di celle (*stringhe*), e orientati in accordo con il verso della corrente (Figura 2.12), dunque con l'anodo coincidente con il catodo del modulo (e viceversa). In questo modo, se il modulo fosse correttamente illuminato (polarizzazione diretta della giunzione), il diodo risulterebbe in condizione di interdizione; viceversa, una polarizzazione inversa causata dall'ombreggiamento di una o più celle, indurrebbe il diodo a condurre, preservando così le parti affette da shadowing.

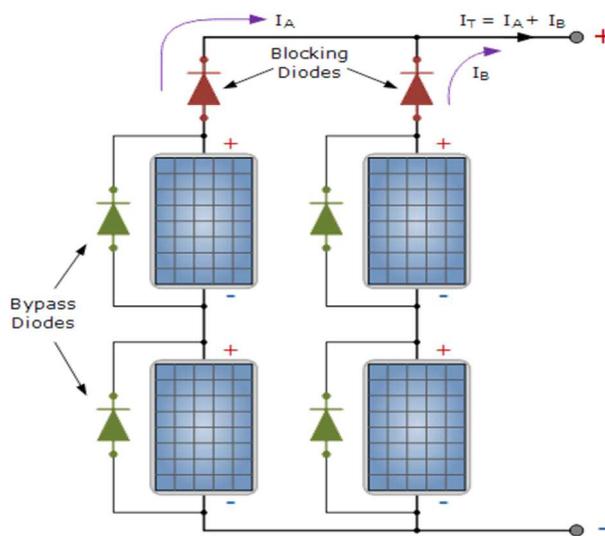


Figura 2.12: Esempio di collegamento dei diodi di bypass [26]

La scelta della tipologia di diodi da utilizzare e di quanti posizionarne per ogni modulo, ossia di quante celle mettere in parallelo ad ogni dispositivo, è un'importante parametro di progetto; nel farlo, si tiene conto del *trade-off* tra costo dei componenti, collegamenti (questi diodi si trovano tipicamente nella *junction box*), spazio occupato e beneficio ottenuto.

Infatti, ognuno di questi diodi deve poter sopportare una corrente (*Average Forward Current*) almeno pari alla corrente di cortocircuito ed una tensione di rottura (*breakdown*) non inferiore alla somma delle tensioni delle celle appartenenti alla stringa a cui è collegato in parallelo.

Uno tra i più comuni approcci in commercio è quello di associare ognuno di questi dispositivi al massimo a 20 celle [22]. I diodi che meglio si adattano a questo tipo di applicazione sono i cosiddetti *diodi Schottky* (diodo *metallo-semiconduttore drogato*), caratterizzati da una tensione di soglia leggermente inferiore ai classici diodi a giunzione, dunque da una più bassa dissipazione di potenza quando entrano in conduzione. A causa dell'orientazione e della natura passiva del dispositivo, infatti, la tensione ai suoi capi si sottrae, seppur di poco, alla somma delle V_{oc} delle stringhe illuminate (oltre alla perdita di tensione dell'intera stringa ombreggiata), così come la potenza da esso dissipata fa calare lievemente quella prodotta dal resto del modulo.

Un ulteriore dispositivo fondamentale per una corretta protezione di un modulo fotovoltaico è il *diodo di blocco* (*blocking diode*). Esso è fondamentale per garantire il corretto funzionamento a livello di impianto, ed è utilizzato sostanzialmente per ridurre conflitti e *leakage* di corrente che possono crearsi tra stringhe di moduli in parallelo diversamente illuminate. Pertanto, non verrà esaminato in questo elaborato, e per una sua trattazione nel dettaglio si rimanda ai testi [27] [22].

2.2.3 Cell-to-module losses (CTM)

Come si è detto in precedenza, gli accorgimenti strutturali attuati nell'assemblaggio di un modulo fotovoltaico influiscono in maniera diretta sulle prestazioni del modulo stesso. Importante è la definizione del contributo denominato Cell-to-Module losses (CTM), da considerare nel calcolo delle figure di merito di un modulo rispetto all'unità di cella fondamentale da cui è composto. Si tratta, infatti, di un fattore che tiene conto di come, nel passaggio da singola cella a interconnessione di più celle in modulo (e relativo incapsulamento) si

introducano meccanismi di perdita/guadagno, sia da un punto di vista ottico che resistivo.

In particolare, esso consta di diversi contributi [28]:

- **Perdite dovute all'incapsulante**

A causa del vetro protettivo e dell'EVA, non tutti i fotoni incidenti alla superficie del modulo riescono a penetrarvi. Parte di essi infatti viene riflessa da entrambi gli strati. Inoltre, una volta penetrate, tali particelle, se non hanno sufficiente energia, vengono assorbite dai materiali, non riuscendo così a raggiungere i veri e propri strati di semiconduttore.

Questi fenomeni di riflessione ed assorbimento determinano perdite non indifferenti in termini di potenza ed efficienza di conversione.

- **Perdite da ombreggiamento**

Un ulteriore fattore di perdita è dovuto all'ombreggiamento dei ribbons. Questi contatti, come è stato discusso in precedenza, vengono posizionati sopra i busbars per garantire la connessione tra le celle in serie. Tuttavia, al fine di assicurare una maggiore rigidità alla struttura, essi sono leggermente più larghi dei busbars, causando una lieve copertura di area utile a livello di modulo, cosa che nella caratterizzazione a livello cella non era presente. Anche in questo caso l'effetto è una diminuzione di corrente fotogenerata.

- **Guadagno di accoppiamento (*coupling*)**

Un terzo fattore a livello ottico che influisce sul CTM è dovuto all'accoppiamento che si instaura grazie all'interazione della luce con la superficie delle celle e sul *backsheet* del modulo. In questo modo il percorso dei raggi luminosi viene riflesso da più parti e aumenta la possibilità che venga assorbito dalla cella.

- **Perdite dovute alle interconnessioni**

Oltre a perdite e guadagni ottici, il CTM è fortemente influenzato da fattori resistivi. In un modulo, oltre alle resistenze serie delle singole celle fotovoltaiche, si hanno contributi associati alle interconnessioni tra le celle e a quelle

tra le stringhe, nonché alle eventuali connessioni di dispositivi come i diodi di bypass.

In definitiva, per un modulo realizzato con approccio standard, questi contributi costituiscono complessivamente un fattore di perdita in termini di efficienza di conversione e di potenza generata (Figura 2.13).



Figura 2.13: Esempio di CTM nel caso standard [29] per materiale multicristallino, dove sono evidenziati fattori di perdita (rosso) e di guadagno (verde), specificati in Tabella 2.1

Il valore netto di questo fattore è complessivamente negativo, in quanto il contributo dei meccanismi di perdita è maggiore in valore assoluto rispetto a quello dei termini di guadagno.

Studi sperimentali [29] confermano che, per un modulo costituito da celle di Silicio multicristallino (quelle esaminate in questo elaborato), la perdita relativa di potenza ed efficienza si attesta attorno al 3%, valore ben più basso di quello riscontrato per moduli di Silicio monocristallino. Il valore calcolato del fattore CTM utilizzato per il caso standard, con tutte le sue componenti, è riportato in Tabella 2.1.

Square STD mc	Relative Power and Efficiency gain/loss	Power gain/loss (W)	Efficiency gain/loss (%)
Glass reflection	-1,50%	-3,75	-0,25%
Glass absorption	-0,99%	-2,47	-0,16%
Encapsulant reflection	-0,13%	-0,33	-0,02%
Encapsulant absorption	-2,37%	-5,92	-0,39%
Shading of ribbon	-1,89%	-4,72	-0,31%
Coupling cell surface	5,03%	12,57	0,84%
Coupling backsheet	2,00%	5,00	0,33%
Cell interconnections	-2,97%	-7,42	-0,49%
String interconnections	-0,28%	-0,70	-0,05%
TOT	-3,10%	-7,74	-0,52%

Tabella 2.1: CTM utilizzato in questo lavoro per il caso standard, in accordo con [29], per materiale multicristallino, dove sono evidenziati i valori numerici e percentuali dei fattori di perdita (arancione) e di guadagno (verde)

Nel lavoro descritto in seguito, il CTM verrà considerato mediante post processing di simulazioni che non tengono conto dei meccanismi sopra elencati. Non verrà quindi simulato ogni singolo contributo ma verrà proposta e motivata una scelta fatta basandosi sulla letteratura a disposizione.

Capitolo 3

Approccio Sliced-cells

In questo capitolo, verrà discusso l'approccio Sliced-cells, spiegando in primis quali potrebbero essere le necessità che spingono verso lo sviluppo di tecnologie alternative e le aspettative che si hanno a riguardo. Questo approccio è stato individuato come degno di studio vista la sua particolare architettura, e verrà analizzato nell'elaborato prendendo come riferimento quanto riportato dalla compagnia SunPower [4] [5].

Successivamente verranno messe in mostra analogie e differenze con il più classico approccio standard, a partire dall'influenza che le modifiche strutturali hanno sui parametri elettrici dei nuovi dispositivi, in particolare esaminando nel dettaglio gli effetti resistivi parassiti.

Anche in questo caso, il capitolo si concluderà con la spiegazione di come viene assemblato un modulo fotovoltaico in questo nuovo approccio, e come variano i parametri elettrici a seguito di questo assemblaggio, evidenziando in particolare il contributo CTM (che sarà ben diverso da quello standard) e discutendo l'effetto dell'inserimento dei diodi di bypass nella struttura.

3.1 Introduzione: motivazioni ed aspettative

Come è emerso nel capitolo precedente, da un approccio standard scaturisce un contributo CTM negativo. Essendo fondamentale, nella progettazione di un modulo fotovoltaico, massimizzare la potenza generata per unità di superficie, nasce la necessità di studiare soluzioni strutturali alternative che intervengano su questo fattore senza snaturare completamente i processi di fabbricazione di celle e moduli, ossia mantenendo pressoché invariati i costi. È importante considerare, infatti, che uno degli obiettivi principali che questo settore si è posto nel corso degli anni è la massimizzazione del rapporto costo-efficienza di cui si è parlato nell'introduzione dell'elaborato.

L'approccio Sliced-cells pone le sue basi proprio sulle considerazioni appena fatte. Oltre a ridurre gli effetti di spacing, grazie a questa nuova tecnologia è possibile ridurre significativamente le perdite resistive. L'idea di base consiste, infatti, nel ridurre la corrente che scorre tra gli elementi costituenti il modulo basandosi sugli studi da letteratura riguardanti il sezionamento di una cella standard [30] [31], i quali trattano l'effettivo dimezzamento dell'area dei dispositivi in questione. In secondo luogo, ulteriori vantaggi in termini di efficienza e potenza emessa saranno garantiti dall'assemblaggio e dalla tipologia di interconnessione tra i singoli elementi costituenti il modulo.

Verrà mostrato nei seguenti sottocapitoli come queste variazioni vengano fatte sostanzialmente a costo zero, e come esse influenzino direttamente il valore del CTM.

Studi come quello proposto in questa tesi sono necessari a livello preliminare per capire quali variabili entrano in gioco in questo nuovo approccio, come e quanto esse influiscano sui parametri e quali vantaggi o svantaggi introducano.

3.2 Confronto con l'approccio standard

Una prima grande differenza tra i due approcci trattati in queste pagine è "l'unità di base" su cui essi si fondano. Mentre per il modulo standard l'unità fondamentale è rappresentata dalla singola cella fotovoltaica, in questo nuovo studio tale componente è la cosiddetta slice (letteralmente "fetta"). Questo nome, e di conseguenza il nome dell'approccio stesso, deriva direttamente dalla struttura che assumono i moduli, come sarà mostrato più avanti.

Come si è detto nell'introduzione al capitolo, i costi di fabbricazione rimangono praticamente invariati rispetto al caso standard. Infatti, questo approccio prevede la produzione di una cella fotovoltaica di dimensioni identiche a quelle standard, partendo dallo stesso materiale, con l'unica differenza che fingers e busbars avranno caratteristiche geometriche leggermente diverse, ma ininfluenti sul costo. A tal proposito, i busbars vengono sostituiti con degli *pseudo-busbars*, contatti stampati sul front della cella, con la stessa funzione di raccolta dei portatori di carica ma ben più sottili dei busbars classici.

Tale cella viene quindi tagliata mediante tecniche ad elevata precisione [30] [31]. Le "fettine" risultanti (assunte pari a sei in questo lavoro) sono appunto le slices (Figura 3.1).

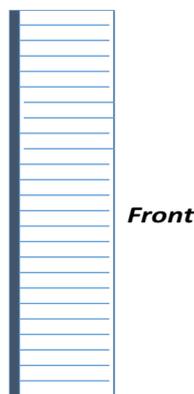


Figura 3.1: Esempio schematizzato del front di una slice, dove si evidenziano pseudo-busbar (verticale) e fingers (orizzontali)

Questi tagli non vengono effettuati in maniera casuale, poiché anche in questo caso è necessario garantire il più possibile l'uniformità tra le varie slices per ridurre gli effetti di mismatch risultanti dalla loro connessione.

Si suppone che sul back metallizzato delle slices vengono disegnate delle tracce equidistanti su cui verranno posizionati i *PAD*, ovvero dei

parallelepipedi che possono essere composti di una particolare pasta adesiva e conduttiva [32] [33] necessari al collegamento in serie tra slices (di cui si parlerà meglio nel sottocapitolo 3.2.1). Grazie ad essi è infatti possibile mettere in contatto gli pseudo-busbars sul front di una slice con il back della slice adiacente semplicemente appoggiandoli uno sopra l'altro, come fossero vere e proprie tegole di un tetto (Figura 3.2). Sostituiscono, in sostanza, gli extra-busbars utilizzati nell'approccio standard per il collegamento in serie delle celle.

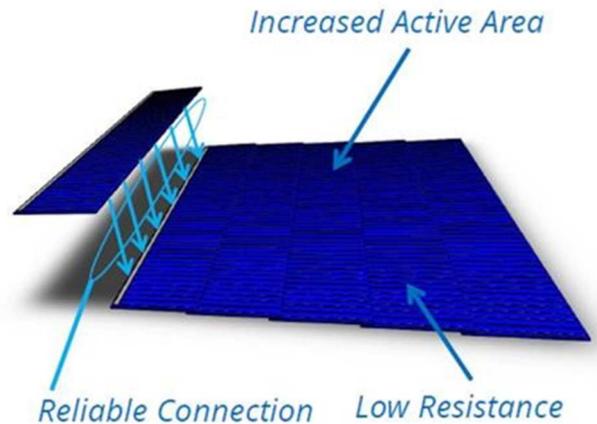


Figura 3.2: Visione del collegamento tra slices [5]

Iterando queste sovrapposizioni, si costruiscono dapprima delle stringhe di slices in serie, le quali vengono connesse poi in parallelo (sottocapitolo 3.2.2). Quello che è importante mettere in risalto in questa modalità di connessione è che si eliminano completamente le perdite dovute alle interconnessioni tra celle, ora sostituite dai PAD fra front e back delle slices. Inoltre, non essendoci più extra-busbars, si perde anche il fattore di ombreggiamento ad essi dovuto, riuscendo ad ottenere, a livello di modulo, più area utile a parità di dimensioni rispetto al caso standard.

A seguito delle variazioni strutturali introdotte, è ovvio che le caratteristiche elettriche di una slice non possono essere equivalenti a quelle di una cella standard. Infatti, mentre la *tensione a circuito aperto* di una singola slice rimane praticamente immune al taglio (valore che sarà poi moltiplicato per il numero n di slices il cui viene affettata la cella per operare un confronto a parità d'area con la cella standard), non è lo stesso per la *corrente di cortocircuito*. Avendo ridotto l'area utile, la I_{sc} sarà ridotta di un fattore circa pari a n rispetto al caso standard.

L'andamento della *caratteristica I-V* rimane pressoché identico, con l'unica differenza che la curva è più schiacciata verso l'asse delle

ascisse a causa della perdita di corrente. Di conseguenza, anche la *potenza generata* dalla singola slice è minore rispetto alla caso di singola cella standard. Tuttavia, si ottiene un guadagno non indifferente in termini di *efficienza di conversione* non indifferente a livello di modulo.

A causa dei diversi contributi resistivi, il *Fill Factor* (che rimane identico nel caso di singola slice e di n slices in serie) varia rispetto al caso standard. In particolare, si riscontra un lieve peggioramento di questo parametro dovuto alla resistenza serie più elevata, i cui contributi sono esaminati in dettaglio nel seguente sottocapitolo.

3.2.1 Principali effetti resistivi

Mentre la resistenza parallelo per unità di lunghezza, essendo dipendente dai difetti del materiale di cui è composta la giunzione, non viene perturbata dalla divisione in slices, non si può dire lo stesso per la resistenza serie.

Rispetto all'approccio standard sono stati effettuati importanti variazioni strutturali, come la sostituzione degli extra-busbars con i PAD, l'utilizzo di fingers e busbars geometricamente differenti e la diversa connessioni di essi, tutti cambiamenti che influiscono direttamente sul valore di resistenza serie.

Essa può essere analizzata esaminando separatamente i principali contributi che la caratterizzano, considerandoli in realtà come resistenze per unità d'area ($[\Omega m^2]$):

- **Resistenza dei fingers**

La cella fotovoltaica di partenza, ossia prima dell'affettamento, ha, come detto, una struttura leggermente diversa rispetto a quella standard. Una delle differenze, in questo senso, consta nella lunghezza dei fingers ridotta rispetto al caso standard, in quanto si presuppone che i tagli non vengono effettuati esattamente sul bordo dello pseudo-busbar, ma con un certo margine da esso.

L'espressione che viene dedotta è molto simile a quella che si trova in letteratura per una cella standard:

$$R_{finger} = k_f \cdot \rho_f \cdot \frac{L_f}{W_f \cdot H_f} \cdot \frac{1}{N_f} \cdot AreaSlice \cdot nSlices \quad (3.1)$$

dove i termini che compaiono hanno lo stesso significato di quelli del caso standard (formula 2.7)

Ciò che cambia è il fattore moltiplicativo, ora $\frac{1}{N_f}$, il quale evidenzia che questi segmenti conduttivi sono tra loro in parallelo e connessi ad un solo pseudo-busbar. Questo cambiamento sarà responsabile del notevole incremento di tale contributo rispetto al valore riscontrato per una cella classica, rendendolo il più significativo, come verrà mostrato nel capitolo 5.

- **Resistenza degli pseudo-busbars**

Nell'approccio Sliced-cells il termine busbar viene sostituito con pseudo-busbar, in considerazione della variazione della geometria. Come già anticipato all'inizio del sottocapitolo 3.2, infatti, questi contatti sono molto più sottili rispetto al caso standard, ed essendo tipicamente più numerosi, al fine di mantenere identità d'area occupata risultano anche meno larghi.

L'espressione che viene dedotta dall'analisi della struttura è la seguente:

$$R_{psBB} = k_{psBB} \cdot \rho_{psBB} \cdot \frac{\frac{L_{psBB} - N_{pad} \cdot W_{pad}}{2}}{W_{psBB} \cdot H_{psBB}} \cdot \frac{1}{2 \cdot N_{pad}} \cdot AreaSlice \cdot nSlices \quad (3.2)$$

I parametri in questione hanno lo stesso significato di quelli relativi ai fingers, così come assume lo stesso valore la costante moltiplicativa k_{psBB} , mentre compaiono anche il numero di PAD (N_{pad}) e lo spessore dei PAD stessi (W_{pad}).

Il termine $\frac{L_{psBB} - N_{pad} \cdot W_{pad}}{2}$ evidenzia il fatto che un portatore di carica, per passare dallo pseudo-busbar al PAD (da dove poi fluirà nel back della slice adiacente) deve percorrere, nel caso peggiore, una distanza pari alla metà di quella che divide due PAD. Di questi segmenti, tra di loro in parallelo, ce ne saranno in numero $2 \cdot N_{pad}$.

Verrà evidenziato nel capitolo 5 come, a seguito degli importanti cambiamenti strutturali apportati, questo contributo resistivo sia significativamente ridotto rispetto a quello corrispondente nel caso standard, pur rimanendo nel complesso un contributo fondamentale.

- **Resistenza dei PAD**

La presenza dei PAD (Figura 3.3) fornisce rigidità alla struttura in maniera proporzionale al loro numero, che per tanto è un parametro di progetto di grande rilevanza. Tuttavia, la presenza dei PAD, più che costituire in se un effetto resistivo degno di nota, influenza notevolmente, come visto, i contributi relativi a fingers e busbars.

Infatti, poiché i PAD hanno lunghezza ridotta rispetto alla sezione, ma ancor di più grazie alla natura fortemente conduttiva dei materiali di cui sono composti, il contributo resistivo ad essi associato risulterà praticamente trascurabile:

$$R_{pad} = \rho_{pad} \cdot \frac{L_{pad}}{W_{pad} \cdot H_{pad}} \cdot \frac{1}{N_{pad}} \cdot \frac{AreaSlice}{nSlices} \quad (3.3)$$

Per un'analisi dettagliata delle sue caratteristiche fisiche ed elettriche si consultino i documenti suggeriti [32] [33].

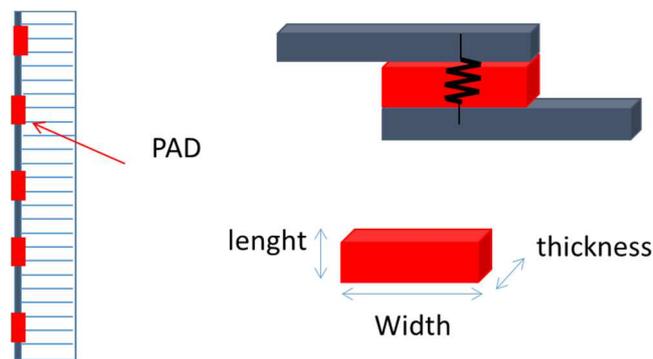


Figura 3.3: Schematizzazione della connessione tra PAD e pseudo-busbar

- **Resistenza di contatto**

Ha lo stesso significato di quella definita per una cella fotovoltaica standard, pertanto si rimanda al sottocapitolo 2.1.2 per una sua trattazione nel dettaglio.

Ciò che la differenzia rispetto all'approccio classico è il suo valore, che cambia in seguito alla variazione del numero di busbars utilizzati.

- **Resistenza di emettitore e di base**

Avendo mantenuto fissi la natura ed i parametri della giunzione, i contributi resistivi ad essa associati sono invariati sia concettualmente che per i rispettivi valori. Dunque, anche in questo caso, si rimanda al sottocapitolo 2.1.2 per una loro spiegazione.

3.2.2 Modulo Sliced

Essendo l'approccio Sliced-cells tutt'ora in fase di studio e sviluppo, in questo elaborato viene proposta una possibile e ragionevole struttura di modulo.

L'idea di base consiste nel mantenere le stesse dimensioni del modulo standard ed assemblare le slices in serie nella modalità descritta. Le stringhe così realizzate vengono poi connesse in parallelo.

Il numero di slices per stringa e di stringhe connesse in parallelo dipende da modulo a modulo: uno dei possibili approcci consiste nel considerare due serie di cinque stringhe in parallelo, ognuna costituita da 39 slices (Figura 3.4).

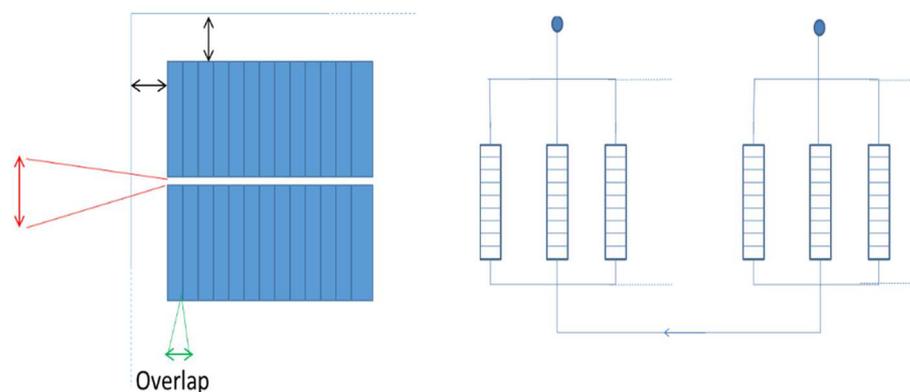


Figura 3.4: Schematizzazione dell'assemblaggio del modulo Sliced (destra) e dell'effetto di spacing inter-stringa (sinistra)

Questa configurazione nasce dal fatto di aver tagliato la cella di partenza in 6 slices, ed è l'unica esaminata nell'elaborato. In questo modo, infatti, le dimensioni del modulo risultano $0,96 \times 1,57 \text{ m}^2$, molto simili a $0,95 \times 1,58 \text{ m}^2$ del caso standard.

A livello di incapsulamento, si adottano gli stessi accorgimenti utilizzati nell'approccio standard, ossia EVA, vetro protettivo e backsheet (sottocapitolo 2.2).

Molto importanti a livello di modulo saranno il CTM e lo studio dell'inserimento dei diodi di bypass, come verrà spiegato nei prossimi sottocapitoli.

3.2.3 Diodi di bypass

Obiettivo del lavoro è stato anche quello di fornire linee guida riguardo l'inserimento di diodi di bypass nel modulo Sliced.

Come per il caso standard, questi componenti devono garantire il corretto funzionamento del modulo nel caso di parziale (o totale) ombreggiamento (o malfunzionamento) di esso. Dunque, viene di conseguenza la necessità di porre tali componenti in parallelo ad una o più stringhe. La scelta principale da fare è proprio a tale riguardo: è possibile utilizzare diodi dimensionalmente più piccoli ed in maggior numero (in parallelo ad ogni stringa) oppure un diodo unico più grande per ogni blocco di stringhe (Figura 3.5).

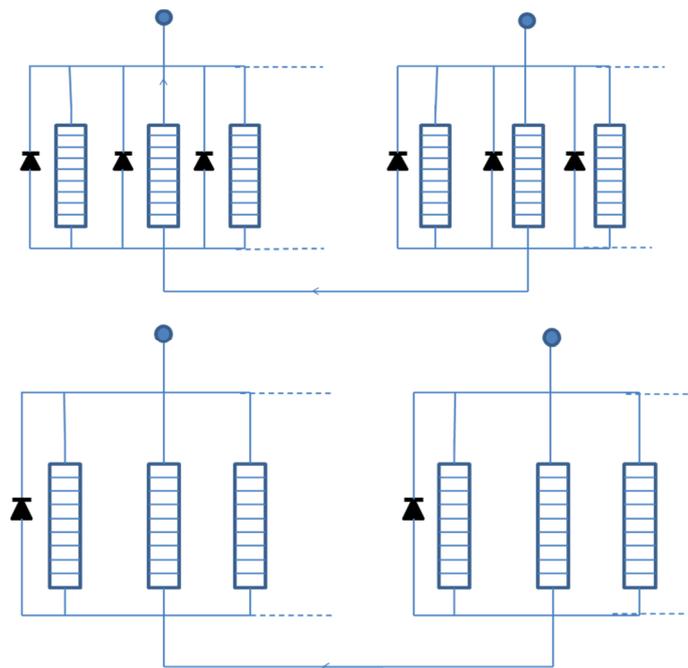


Figura 3.5: Schematizzazione di due possibili configurazioni di connessione dei diodi di bypass

Da qui nasce un secondo problema, ovvero quello delle connessioni. Tali componenti vanno infatti connessi alle stringhe, e la soluzione con meno diodi è sicuramente più vantaggiosa in questi termini, in quanto risparmia l'utilizzo di cavi.

Proprio per questo motivo, una soluzione che viene esclusa a priori è quella di connettere più diodi in parallelo per ogni stringa. Quello che si dovrebbe fare in questo caso, infatti, consisterebbe nel trovare possibili connessioni tra PAD e diodi stessi, soluzione al momento poco verosimile.

Queste considerazioni saranno più chiare quando verranno raccolti e commentati i risultati dovuti alle simulazioni SPICE di moduli ombreggiati in presenza di diodi di bypass (sottocapitolo 5.2.2).

3.2.4 CTM

Come per il caso standard, anche in un modulo Sliced l'assemblaggio del modulo influisce in maniera diretta sulla potenza emessa e l'efficienza di conversione. Ciò che rende fortemente vantaggioso l'utilizzo di questo approccio rispetto al caso standard è che questo fattore è profondamente diverso.

In dettaglio, mentre a livello di perdita dovuta all'incapsulante i valori rimangono identici a quelli determinati per il modulo standard (in quanto è assunta la stessa tipologia di incapsulante), le variazioni strutturali introdotte dall'approccio Sliced-cells fanno sì che gli altri fattori di perdita vengano sostanzialmente annullati.

Ciò che differenzia un modulo Sliced da uno classico è, infatti, la sostituzione degli extra-busbars con i PAD: questo cambiamento, all'apparenza svantaggioso in termini di valori di resistenza serie, si rivela estremamente importante in termini di modulo. Grazie all'utilizzo dei PAD, infatti, scompare la perdita dovuta all'ombreggiamento superficiale causato dal posizionamento dei ribbons sui busbars, ma ancor più importante, non è più presente il contributo negativo dovuto all'interconnessione delle celle. Inoltre, essendo la corrente fluente in ogni stringa molto inferiore rispetto al caso standard, la perdita di potenza dovuta alle interconnessioni tra stringhe è praticamente trascurabile (essendoci dipendenza dal quadrato della corrente).

I termini di guadagno sono sempre dovuti al coupling superficiale e nel backsheet, ma quest'ultimo termine è leggermente minore rispetto al caso standard. Infatti, il contributo dovuto al backsheet intra-cella

nel caso Sliced-cells è nullo e la distanza intra-stringhe è assunta (in questo lavoro) minore rispetto al caso standard (1 mm piuttosto che 2 mm), in quanto viene considerato un caso ottimistico di assemblaggio stringhe.

In definitiva, per un modulo realizzato con approccio Sliced-cells, questi contributi costituiscono complessivamente un fattore di guadagno in termini di potenza generata (CTM positivo), in quanto nel passaggio da cella a modulo i contributi di guadagno sono, in valore assoluto, maggiori rispetto a quelli di perdita.

In Tabella 3.1 è mostrato il calcolo del CTM nel caso Sliced-cells utilizzato in questo lavoro. Si nota come, rispetto al caso standard, si sono assunte, grazie alla tipologia alternativa di assemblaggio e alle dimensioni ridotte dei singoli elementi (che garantiscono una riduzione significativa di corrente), una riduzione di perdite resistive (assenza di busbar e, di fatto, assenza di perdite dovute alle interconnessioni) ed una riduzione di perdite ottiche (*shading* of ribbons), che si traducono in un fattore modulante complessivo maggiore di zero (+0.92%).

Square STD mc	Relative Power and Efficiency gain/loss	Power gain/loss	Efficiency gain/loss
Glass reflection	-1,50%	-3,88	-0,25%
Glass absorption	-0,99%	-2,56	-0,16%
Encapsulant reflection	-0,13%	-0,34	-0,02%
Encapsulant absorption	-2,37%	-6,12	-0,39%
Shading of ribbon	0%	0	0%
Coupling cell surface	5,03%	13,00	0,84%
Coupling backsheet	0,88%	2,27	0,15%
Cell interconnections	0%	0	0%
String interconnections	0%	0	0%
TOT	0,92%	2,38	0,15%

Tabella 3.1: CTM utilizzato in questo lavoro per il caso Sliced-cells, basato su CTM standard [29], dove sono evidenziati i valori numerici e percentuali dei fattori di perdita (arancione) e di guadagno (verde)

Capitolo 4

Simulazioni SPICE di celle e moduli

Questo capitolo descrive le metodologie adottate per il lavoro di tesi. Saranno infatti spiegate, dopo una breve introduzione al simulatore utilizzato, le varie analisi effettuate.

Per prima cosa verrà analizzato l'approccio standard, spiegando come è stato creato e parametrizzato il circuito elettrico di una cella fotovoltaica, che sarà il tassello di base delle modellizzazioni successive riguardanti stringhe e modulo fotovoltaico. Dopo il test di questo dispositivo, verrà infatti simulato il funzionamento di un modulo dalle dimensioni tipiche [27], esaminando anche il caso di parziale ombreggiamento e verificando il comportamento dei diodi di bypass.

Questo procedimento sarà poi reiterato per l'approccio Sliced-cells, con la sola differenza che il tassello di base delle varie modellizzazioni verrà rappresentato dalla slice. Ovviamente, come sarà mostrato nel corso del capitolo, la costruzione del modulo Sliced seguirà degli *step* diversi dallo standard, ed anche l'inserzione dei diodi di bypass differirà rispetto al caso precedente.

4.1 Funzionamento del simulatore

SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) è un programma di simulazione circuitale *open-source* sviluppato nel 1975 dall'*Electronics Research Laboratory* dell'Università della California, Berkeley, ed è divenuto nel tempo lo strumento standard per la simulazione di circuiti elettronici analogici. Versioni alternative sono state sviluppate nel corso degli anni, e quella utilizzata in questo studio è fornita da *Linear Technologies (LT)*, da qui il nome LT-SPICE.

Mediante questo software è infatti possibile costruire, via interfaccia grafica o via *netlist* (lista di comandi, l'effettivo linguaggio letto dal programma), dei modelli elettrici connettendo i vari componenti. Nello sviluppo di questo lavoro si è utilizzato il primo metodo, in quanto più diretto e flessibile a modifiche.

I modelli così implementati possono essere parametrizzati a seconda delle necessità, ed è possibile simularne le grandezze caratteristiche a seconda della loro natura e riportarne gli andamenti via grafica.

Grazie a questo simulatore, infatti, è stato possibile dapprima riprodurre le caratteristiche elettriche dell'elemento fondamentale (cella per il caso standard e slice per l'approccio Sliced-cells), calibrandone i parametri (quali la resistenza serie) in base a caratteristiche realistiche per i dispositivi in questione. Successivamente, è stata realizzata l'interconnessione dei blocchi fondamentali per ricreare una situazione realistica di moduli fotovoltaici.

Tra le principali tipologie di simulazione, per il fine di questo lavoro si è utilizzata solamente l'analisi in continua (DC), effettuata sulle varie grandezze in gioco al variare del valore di una di esse. Per un tutorial riguardo al simulatore, alle varie tipologie di simulazione ed ai costrutti usati nelle analisi che seguiranno si rimanda a [34].

I risultati ottenuti possono essere estratti mediante l'utilizzo di costrutti specifici [34], o esportati come file di testo esterni per poter essere analizzati nel dettaglio mediante software dedicati (quali *Excel*).

4.2 Simulazione modulo standard

Nei sottocapitoli che seguiranno verrà spiegato in cosa consiste il lavoro effettuato, ossia la costruzione di un modello equivalente di modulo fotovoltaico standard, realizzato partendo dall'implementazione circuitale della singola cella fotovoltaica, parametrizzata secondo assunzioni realistiche fatte sulle caratteristiche elettriche del dispositivo stesso. Nel far ciò, si è considerata una cella fotovoltaica *full-square* a tre busbars, realizzata con Silicio multicristallino, delle dimensioni tipiche di $15,6 \times 15,6 \text{ cm}^2$.

Il modulo simulato sarà costituito dalla ripetizione in serie di 60 celle (dimensione totale $0,95 \times 1,58 \text{ m}^2$), raggruppate in tre sottoblocchi da 20 celle per renderlo accessibile ad eventuali inserzioni dei diodi di bypass (come verrà mostrato nel sottocapitolo 4.2.2).

4.2.1 Creazione e parametrizzazione del modello

Come si è detto, per prima cosa è stato implementato il circuito equivalente di una tipica cella fotovoltaica. In base a quanto detto nel capitolo 2, esso appare nella forma di Figura 4.1.

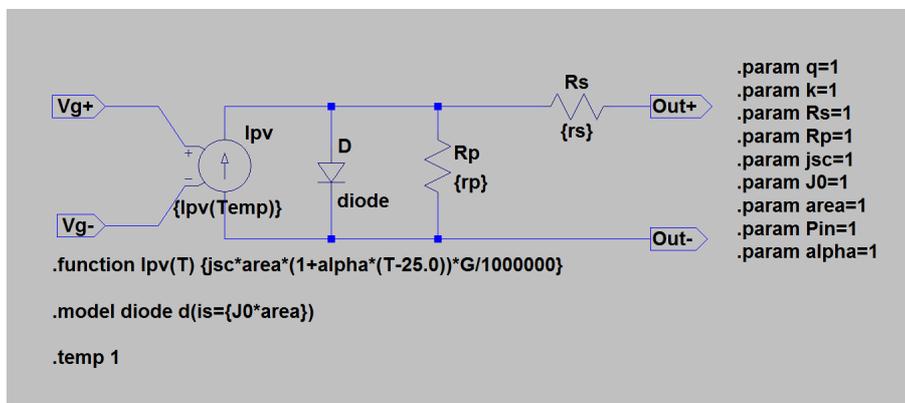


Figura 4.1: Modello SPICE del circuito equivalente di una cella fotovoltaica standard

Si notano chiaramente i vari componenti che lo contraddistinguono:

- Generatore di corrente fotovoltaica I_{pv} : nella condizione di soleggiamento standard (sottocapitolo 2.1.3), che è applicata nei test delle celle fotovoltaiche, dunque quella utilizzata in queste simulazioni, coincide con la corrente di cortocircuito I_{sc} . Per sottolineare la sua dipendenza della temperatura T

(esplicitamente, ed implicitamente attraverso $\alpha = \frac{\delta I_{sc}}{\delta T}$) e dall'irradianza G (evidenziata dalla differenza di potenziale Vg) è stata riportata la sua forma generale [35] [36].

- Diodo: viene parametrizzato a seconda dell'area della giunzione (quindi della cella) e della densità di corrente di saturazione inversa j0.
- Resistenze di shunt e serie.
- Differenza di potenziale in uscita.

Per rendere il modello portabile e adattabile, esso viene parametrizzato iniziando opportunamente i valori dei vari parametri, che verranno poi modificati a seconda della sua applicazione. Prima di passare alla costruzione del modulo, si è verificato il corretto funzionamento della singola cella calibrandola attraverso caratteristiche elettriche realistiche.

La costruzione del modulo prosegue con la definizione delle stringhe da 20 celle in serie. Per rendere la visualizzazione più leggibile, SPICE consente di definire un *simbolo* corrispondente al circuito creato, che se utilizzato in altri schematici assumerà la forma di un blocco rettangolare. Queste assunzioni vengono fatte sia per la singola cella che per la singola stringa.

L'ultimo passaggio consiste nel collegare in serie le tre stringhe da 20 celle (Figura 4.2):

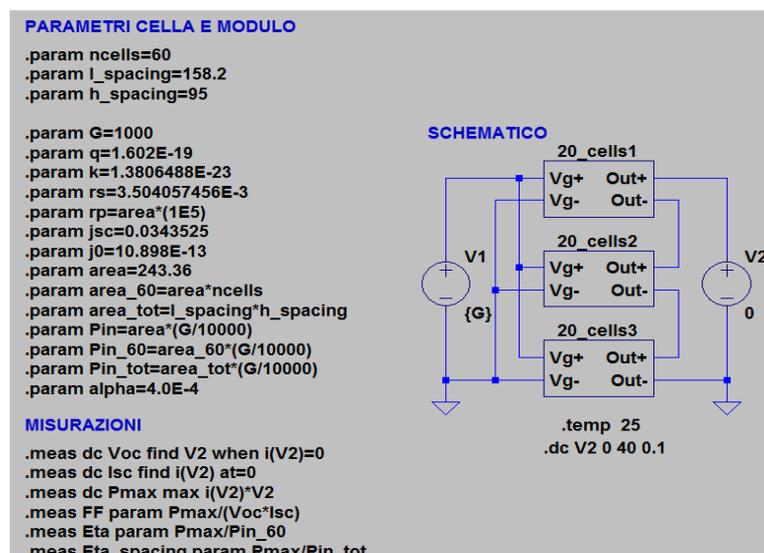


Figura 4.2: Modello SPICE di un modulo fotovoltaico standard costituito da 60 celle in serie raggruppate in tre stringhe da 20 celle ciascuna

Ad esse vengono collegate un generatore di tensione (V1) identificativo dell'irradianza (G) che colpisce la superficie ed un generatore di tensione nulla (V2), grazie al quale è possibile monitorare gli andamenti di corrente e tensione in uscita dalla cella stessa, ovvero determinare Voc e Isc mediante l'analisi DC.

A questo punto è necessario, per poter simulare il circuito, stabilire sia il valore di temperatura alla quale avviene la simulazione, sia il valore dei parametri delle singole celle in precedenza inizializzati e del modulo in se (nel seguente capitolo sarà data la spiegazione dei valori utilizzati). È possibile inoltre verificare i valori delle figure di merito mediante il costrutto “.meas” (si rimanda al tutorial di LT-SPICE [34] per la sintassi).

Tramite il comando “Run” viene ora fatta partire la simulazione. I risultati delle analisi effettuate vengono riportati nel foglio riassuntivo definito “SPICE Error Log”. Allo stesso tempo, è possibile riportare graficamente le varie grandezze in gioco in funzione della grandezza scelta al momento della definizione del tipo di analisi. In particolare, in questo lavoro, si sono studiati gli andamenti di curve I-V e P-V, e si è verificato l'andamento di corrente in alcuni nodi fondamentali, come nel caso dei diodi di bypass (capitolo 5).

4.2.2 Inserimento dei diodi di bypass e simulazione di condizioni di ombreggiamento

Per simulare l'ombreggiamento di una o più celle si collega un generatore di tensione nulla (irradianza di 0kW/m^2) a quelle che si vuole inibire, come mostrato in Figura 4.3. In particolare, avendo connesso un diodo di bypass in parallelo ad ogni stringa di 20 celle (Figura 4.3), basta oscurare una sola di esse per inibire la produzione di potenza di tutta la stringa a cui appartiene. Nel caso preso in esame si è scelto di oscurare una cella di una sola stringa, rendendo così inattivo un terzo del modulo.

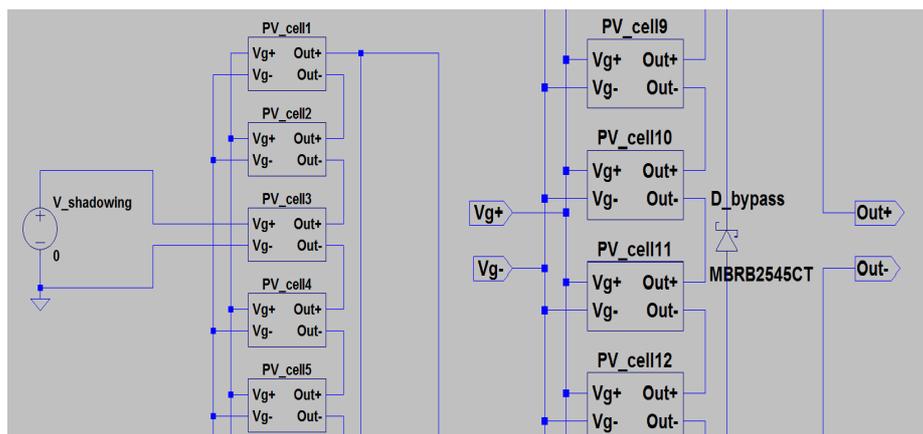


Figura 4.3: Sezione del modello SPICE di una stringa con una cella ombreggiata (sinistra) in presenza di un diodo di bypass (destra)

Anche in questo caso si sono simulati gli andamenti delle curve I-V e P-V, in quanto sono utili per chiarire l'intervento dei diodi in questione, il loro ruolo e come cambiano le performance del modulo in caso di parziale ombreggiamento (sottocapitolo 5.2.1).

Ognuno di questi diodi deve poter sopportare una corrente almeno pari alla corrente di cortocircuito ed una tensione di breakdown non inferiore alla somma delle tensioni delle celle appartenenti alla stringa a cui è collegato in parallelo. Per tanto, in base ai valori delle figure di merito in questione, si è scelto il modello *MBRB2545CT* (che riesce a garantire una corrente I_{ave} di 25A ed una tensione di breakdown V_{bk} di 45V), presente nella libreria di LT-SPICE (alla quale si rimanda per tutte le sue proprietà [34]), essendo questo il modello a disposizione che più si avvicina a quelli comunemente utilizzati per implementazioni reali ($V_{bk} \cong 30V$ e $I_{ave} \cong 15A$ [37]).

4.3 Simulazione modulo Sliced

Un procedimento analogo a quello utilizzato nell'approccio standard viene seguito per la creazione del modello di un modulo Sliced.

Esso viene infatti realizzato partendo dall'implementazione circuitale della singola slice, parametrizzata secondo caratteristiche elettriche realistiche. Nel far ciò, si è considerata una cella fotovoltaica *full-square* a sei pseudo-busbars, realizzata con Silicio multicristallino, delle dimensioni tipiche di $15,6 \times 15,6 \text{ cm}^2$, poi tagliata in sei slices equivalenti.

Il modulo in questione avrà area pressoché identica a quello standard, e sarà costituito, in linea con le specifiche suggerite, dalla ripetizione in serie di due blocchi, ciascuno costituito da cinque stringhe di 39 slices collegati in serie (dimensione totale $0,95 \times 1,58 \text{ m}^2$), alle quali verrà connesso in parallelo un diodo di bypass (come verrà mostrato nel sottocapitolo 4.3.2).

4.3.1 Creazione e parametrizzazione del modello

Il circuito equivalente di una slice è analogo a quello della cella fotovoltaica standard (Figura 4.1).

Ciò che differenzia i modelli è infatti la loro parametrizzazione: area, I_{sc} e V_{oc} sono stati scelti partendo da assunzioni realistiche su questo approccio. La R_s (necessaria per il calcolo del FF, dunque per il *fitting* della caratteristica I-V) è stata determinata con le formule analitiche utilizzate nell'approccio Sliced-cells (sottocapitolo 3.2.1), partendo da assunzioni verosimili sui valori dei parametri.

Verificata la validità del modello, si è proseguito con la costruzione del modulo, partendo dalla definizione della stringa da 39 slices in serie, e passando poi a quella del blocco di cinque stringhe in parallelo, chiamato mini-modulo (o *halfmodule*), mostrate in Figura 4.4.

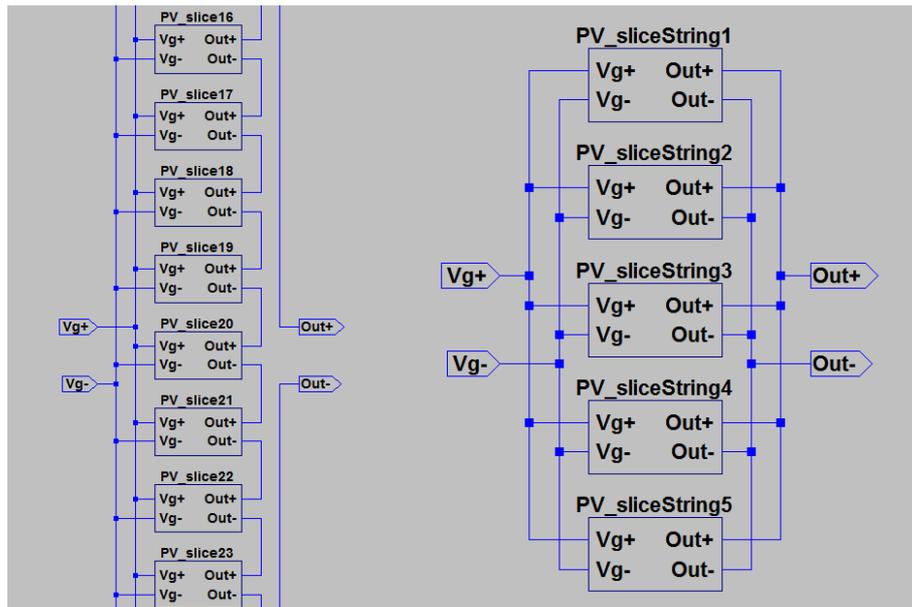


Figura 4.4: Sezione del modello SPICE di una stringa (sinistra) e modello SPICE di un mini-modulo (destra)

Viene infine assemblato e parametrizzato il modulo, dove si vedono i due mini-moduli in precedenza definiti (Figura 4.5):

PARAMETRI SLICE E MODULO	MISURAZIONI
<pre> .param series=2 .param parallel=5 .param nslices_cell=6 .param nslices_string=39 .param nslices_module=390 .param l_spacing=96.1 .param h_spacing=78.8 .param G=1000 .param q=1.602E-19 .param k=1.3806488E-23 .param rs=22.04851539E-3 .param rp=area_real*(1E5) .param jsc=0.035060178 .param j0=13.02E-13 .param area=38.22 .param area_real=40.56 .param area_mod=14929.2 .param area_tot=2*l_spacing*h_spacing .param Pin_mod=area_mod*(G/10000) .param Pin_tot=area_tot*(G/10000) .param alpha=4.0E-4 </pre>	<pre> .meas dc Voc find V2 when i(V2)=0 .meas dc Isc find i(V2) at=0 .meas dc Pmax max i(V2)*V2 .meas FF param Pmax/(Voc*Isc) .meas Eta param Pmax/Pin_mod .meas Eta_spacing param Pmax/Pin_tot </pre>
SCHEMATICO	

Figura 4.5: Modello SPICE di un modulo fotovoltaico Sliced costituito da due serie di cinque stringhe in parallelo, ciascuna di 39 slices in serie

Valgono le stesse considerazioni, fatte riguardo a parametrizzazione e misurazioni per il caso standard, e analizzando le caratteristiche I-V e P-V siamo in grado di stabilire analogie e differenze tra le due tipologie di moduli.

4.3.2 Inserimento dei diodi di bypass e simulazione di condizioni di ombreggiamento

Per simulare l'ombreggiamento di una o più slices si collega un generatore di tensione nulla (irradianza di 0kW/m^2) a quelle che si vuole inibire. In particolare, avendo connesso il diodo di bypass nella configurazione descritta, basta oscurare una sola di esse per inibire la produzione di potenza di tutta la stringa a cui appartiene.

In questo caso si è scelta, tuttavia, una gestione diversa dei diodi e generatori di ombreggiamento. Mentre per il caso standard essi erano contenuti all'interno del modello della stringa, per lo Sliced-cells vengono scorporati e posti direttamente a livello di modulo (Figura 4.6), rendendo il modello più flessibile a modifiche e facilitando il monitoraggio del corretto funzionamento dei diodi stessi (ovvero delle loro correnti).

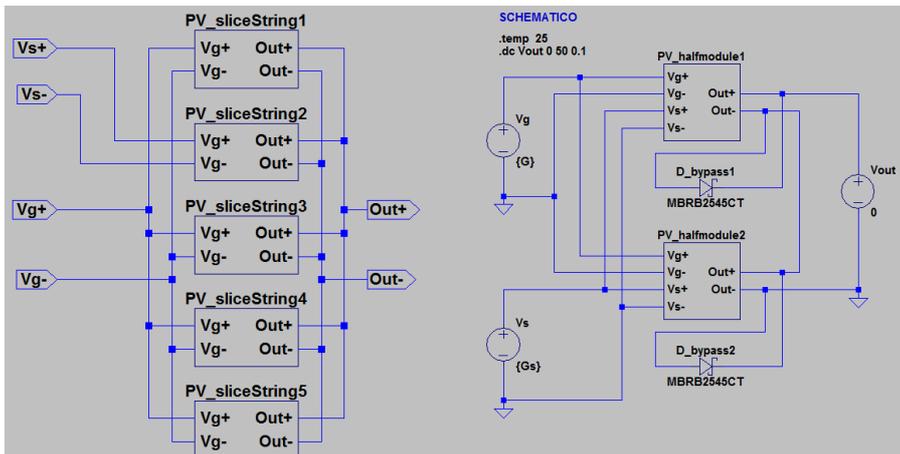


Figura 4.6: Modello SPICE di un mini-modulo ombreggiato (sinistra) e di un modulo fotovoltaico Sliced dotato di un diodo di bypass in parallelo ad ogni mini-modulo (destra)

Grazie a questo accorgimento è possibile effettuare molto più rapidamente, e quindi in maggior numero, le analisi sull'ombreggiamento e sul funzionamento dei diodi di bypass. Quanto detto risulta essere molto importante, in quanto, non essendo ancora stati effettuati studi riguardo all'utilizzo di questi componenti nei moduli Sliced, si possono ottenere dei primi dati simulati dai quali partire per sviluppi futuri.

Un altro aspetto degno di nota è il dimensionamento dei diodi di bypass. Il perché verrà discusso nei seguenti capitoli. Per le simulazioni di questo lavoro il tipo di diodo è lo stesso di quello adoperato nel caso standard (sottocapitolo 5.2.2).

In particolare, in questo studio, sono state fatte diverse prove di ombreggiamento nella configurazione descritta:

- Oscuramento di una stringa in uno dei due mini-moduli, altro totalmente illuminato;
- Oscuramento di due stringhe in uno dei due mini-moduli, altro totalmente illuminato;
- Oscuramento totale di cinque stringhe (un intero mini-modulo), altro totalmente illuminato.

Inoltre, per verificare il corretto funzionamento dei diodi, si è riportato graficamente l'andamento delle loro correnti nei tre casi analizzati.

Capitolo 5

Risultati e discussione

In quest'ultimo capitolo, verranno dapprima presentate ed analizzate le assunzioni effettuate con riferimento alle caratteristiche delle celle e delle slices simulate.

Il capitolo prosegue con la validazione del modello SPICE tramite un confronto con le caratteristiche inizialmente assunte per i dispositivi, dapprima per il caso standard e poi nell'approccio Sliced-cells.

Successivamente verranno riportati e commentati i risultati delle simulazioni SPICE del modulo standard e di quello Sliced in casi di totale illuminazione e anche di intervento dei diodi di bypass (ombreggiamento).

Il lavoro si concluderà con un bilancio finale dei due approcci presi in esame, focalizzandosi in particolar modo su che influenza hanno su di essi il contributo CTM e l'intervento dei diodi di bypass.

5.1 Parametri realistici considerati e calcolo della resistenza serie

Come si è detto nel capitolo precedente, per poter rendere i modelli creati adattabili al tipo di configurazione, essi sono stati parametrizzati. Prima di effettuare le simulazioni vere e proprie, si è dovuto identificare i parametri di cui non esiste conoscenza diretta. Questo è stato necessario per il calcolo della resistenza serie del modello SPICE per entrambi gli approcci considerati (modulo standard e Sliced).

Le caratteristiche assunte per le celle e le slices analizzate sono riportate in Tabella 5.1:

Cell	
Area (cm ²)	243,36
Voc (V)	0,629
Isc (A)	8,36
FF	79,14%
Slice	
Area (cm ²)	40,56 (attiva: 38,22)
Voc (V)	0,625
Isc (A)	1,34
FF	79,05%

Tabella 5.1: Caratteristiche di celle e slices utilizzate per l'identificazione dei parametri di modello

In particolare, per la cella standard sono stati assunti i seguenti dati:

- Cella full-square di Si-multi, di dimensioni 15,6x15,5cm² e spessore 180μm;
- Tre busbars di spessore 0,15cm e lunghezza 15,6cm;
- 105 fingers connessi ai due lati di ogni busbar, di spessore 50μm e lunghezza 2,53cm;
- Resistenza parallelo per unita d'area pari a 10⁵ Ωcm².

Mentre per l'approccio Sliced-cells:

- Cella full-square di Si-multi, di dimensioni 15,6x15,6cm² e spessore 180μm;
- Sei pseudo-busbars di lunghezza 15,6cm, ovvero sei slices per cella di dimensioni 2,6x15,6cm;
- 105 fingers connessi ad un solo lato dello pseudo-busbar, di spessore 50μm e lunghezza 2,46cm;
- Resistenza parallelo per unita d'area pari a 10⁵ Ωcm²;
- Larghezza degli pseudo-busbars di 0,75 mm.

Per il calcolo della resistenza serie da inserire nel modello SPICE, alcune informazioni erano mancanti. Per poter utilizzare le formule descritte nel capitolo 2, sono state quindi fatte ragionevolmente le seguenti scelte:

- Doping del semiconduttore, resistività dei materiali utilizzati e *lifetime* [38] del substrato (tempo “di vita” dei fotoni, dopo il quale perdono l’energia necessaria a generare le coppie e-h);
- *Rsheet* dell’emettitore;
- Densità di corrente di saturazione inversa (j_0) e fattore di idealità (n) del diodo (ossia della giunzione);
- Altezza di fingers e busbars, altezza degli pseudo-busbars;
- Numero e dimensioni dei PAD.

In particolare, l’altezza dei contatti è il parametro meno controllabile durante il processo di fabbricazione. La scelta di questi valori è stata fatta all’interno di un range ragionevole per tecnologie realistiche.

Il passo successivo è stato quello di implementare in uno *spreadsheet* Excel le formule per il calcolo dei vari contributi della resistenza serie sia per il caso di una cella standard (Tabella 5.2), sia per il caso di una slice (Tabella 5.3), valore poi inserito nei modelli SPICE.

In particolare per il caso standard (sulla base delle formule implementate nel sottocapitolo 2.1.2):

Rs busbars	413,3	$m\Omega \cdot cm^2$
Rs fingers	87,8	$m\Omega \cdot cm^2$
Rs extra-busbars	79,5	$m\Omega \cdot cm^2$
Rs contact	71,1	$m\Omega \cdot cm^2$
Rs emitter	147,2	$m\Omega \cdot cm^2$
Rs base	54,0	$m\Omega \cdot cm^2$
Total Rs	852,7	$m\Omega \cdot cm^2$
	3,51	$m\Omega$

Tabella 5.2: Contributi resistivi nel caso standard

Come anticipato nello stesso sottocapitolo, nel caso standard il contributo resistivo più rilevante è dovuto ai busbars, il che rende fondamentale la scelta del numero di questi contatti ed un loro appropriato dimensionamento in fase di progetto.

Mentre per il caso Sliced-cells (sulla base delle formule implementate nel sottocapitolo 3.2.1):

Rs pseudo-busbars	205,5	mΩ·cm ²
Rs fingers	446,7	mΩ·cm ²
Rs PAD	4,5	mΩ·cm ²
Rs contact	36,4	mΩ·cm ²
Rs emitter	147,2	mΩ·cm ²
Rs base	54,0	mΩ·cm ²
Total Rs	894,3	mΩ·cm ²
	22,05	mΩ

Tabella 5.3: Contributi resistivi nel caso Sliced-cells

Per quanto riguarda il caso Sliced-cells, invece, per quanto il contributo resistivo degli pseudo-busbars sia comunque rilevante, quello dei fingers acquisisce maggior importanza relativa. Questo fatto è una diretta conseguenza del taglio in slices, come è stato già ampiamente discusso nel precedente capitolo.

Una volta calcolate le Rs da inserire in SPICE, dal momento in cui le aree e i valori di Isc e Voc sono noti, siamo in grado di validare il modello tramite confronto tra dati simulati e le caratteristiche assunte come riferimento per i dispositivi.

5.1.1 Validazione caso standard

La prima analisi effettuata consiste nella verifica del corretto funzionamento della singola cella fotovoltaica in SPICE e quindi nella validazione del modello. Le figure di merito visualizzate nello SPICE Error Log sono state confrontate (Tabella 5.4) con quelle assunte come riferimento:

SIMULATED BY LT-SPICE	Cella
Area (cm ²)	243,36
Voc (V)	0,629
Isc (A)	8,36
FF	79,14%
η	17,10%
Pmax (W)	4,16
ASSUMED CHARACTERISTICS	Cella
Area (cm ²)	243,36
Voc (mV)	629
Isc (A)	8,36
FF	78,95%

Tabella 5.4: Confronto tra figure di merito assunte come riferimento e simulate mediante LT-SPICE nell'approccio standard

Si riscontra un soddisfacente *agreement* tra dati di partenza e risultati della simulazione mediante LT-SPICE. In particolare, si osserva una leggera differenza in termini di FF. Probabilmente sarebbe necessario un ulteriore *tuning* di qualche parametro “libero” che agisce sulla R_s per ottenere un valore ancora più simile, come ad esempio l’altezza dei fingers. Tuttavia la differenza rientra comunque nei margini di incertezza e tollerabilità.

In Figura 5.1 è riportata la caratteristica I-V simulata per la singola cella fotovoltaica standard:

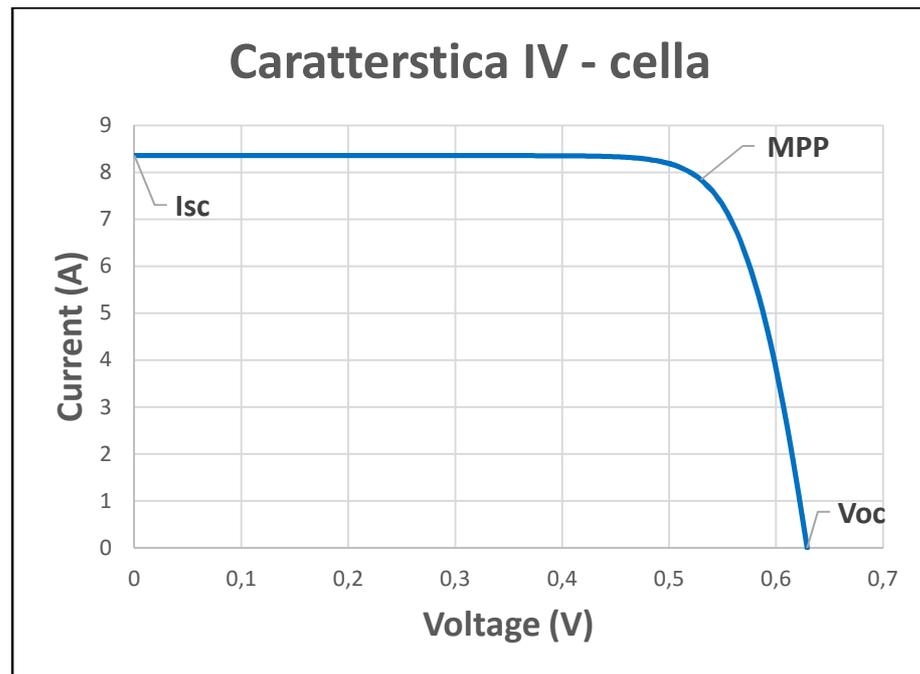


Figura 5.1: Caratteristica I-V simulata nell’approccio standard

5.1.2 Validazione approccio Sliced-cells

La stessa procedura di validazione è stata effettuata anche nel caso Sliced-cells, dove sono state ottenute le seguenti figure di merito (Tabella 5.5):

SIMULATED BY LT-SPICE	Slice
Area (cm ²)	40,56 (attiva: 38,22)
Voc (V)	0,625
Isc (A)	1,34
FF	79,05%
η	17,32%
Pmax (W)	0,66
ASSUMED CHARACTERISTICS	Slice
Area (cm ²)	40,56 (attiva: 38,22)
Voc (mV)	625
Isc (A)	1,34
FF	78,97%

Tabella 5.5: Confronto tra figure di merito assunte come riferimento e simulate mediante LT-SPICE nell'approccio Sliced-cells

Anche in questo caso la corrispondenza tra le caratteristiche assunte come riferimento e i risultati della simulazione è soddisfacente. Si osserva nuovamente una leggera differenza in termini di FF, imputabile al fatto che anche nel caso Sliced-cells sono state fatte assunzioni sui parametri "liberi" per il calcolo della R_s . Un tuning ragionevole di queste grandezze (caratteristiche dei PAD e pseudo-busbars) ci ha permesso comunque di ottenere un FF ragionevolmente allineato a quello assunto.

In Figura 5.2 è riportata la caratteristica I-V simulata per la serie di sei slices:

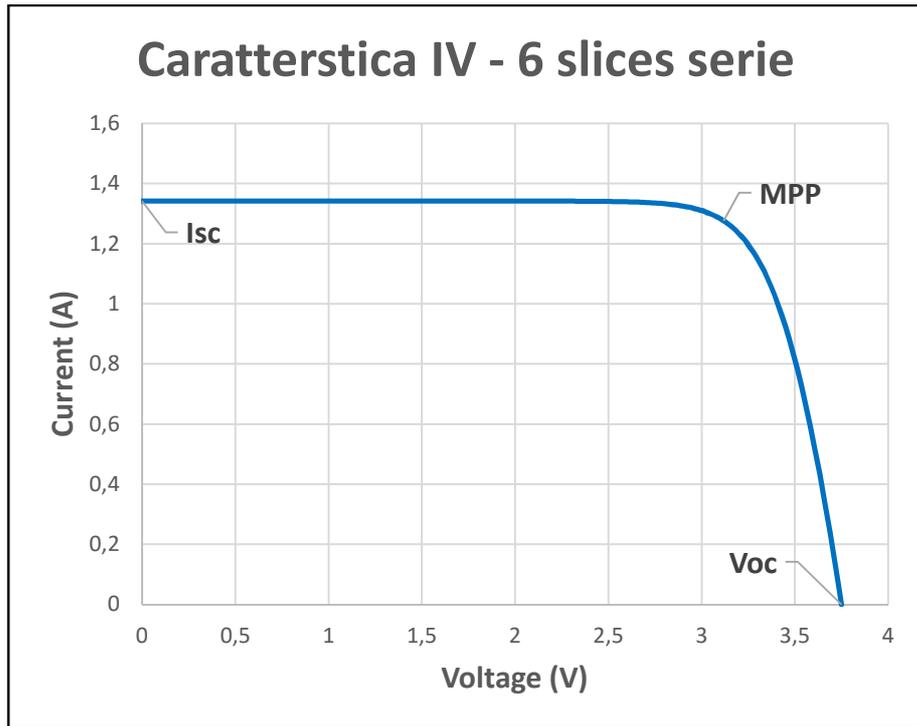


Figura 5.2: Caratteristica I-V simulata nell'approccio Sliced-cells

5.2 Simulazione SPICE di moduli fotovoltaici ad elevate prestazioni

5.2.1 Modulo standard: prestazioni e diodi di bypass

Ottenuta la calibrazione del modello, si passa ora alla simulazione del modulo fotovoltaico standard in condizioni di totale illuminazione. I risultati di questa analisi confermano le considerazioni teoriche fatte nel capitolo 2 su celle e moduli fotovoltaici standard. Infatti, il valore di Isc rimane invariato, il valore di Voc (così come quello di Pmax) è la somma delle Voc (Pmax) delle celle costituenti il modulo, il FF non varia essendo un parametro con senso “logico” solo a livello di cella, mentre si ha un calo di efficienza di conversione dovuto allo spacing (Tabella 5.6).

SIMULATED BY LT-SPICE	Cella	Modulo
Area (cm ²)	243,36	15029 (incluso spacing)
Voc (V)	0,629	37,74
Isc (A)	8,36	8,36
FF	79,14%	79,14%
η	17,10%	16,62%
Pmax (W)	4,16	249,80

Tabella 5.6: Confronto tra figure di merito di cella e modulo nel caso standard

Anche le curve I-V e P-V (Figura 5.3) ricalcano gli andamenti attesi e confermano i valori delle figure di merito riportate in Tabella 5.6:

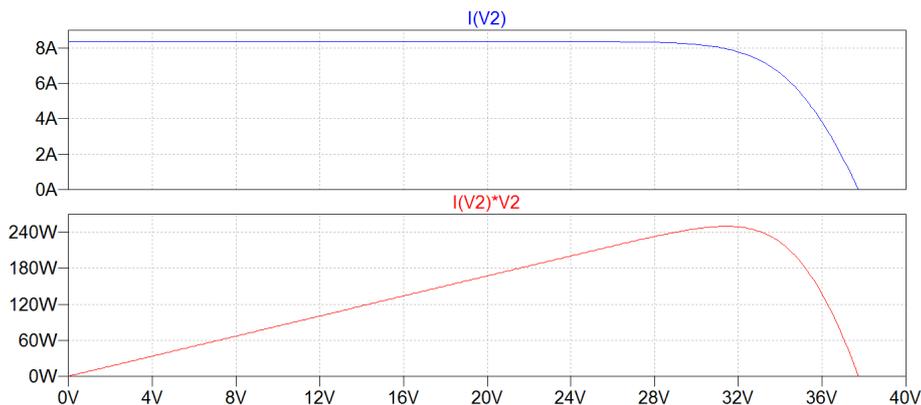


Figura 5.3: Curve I-V e P-V del modulo standard

Se a questi risultati applichiamo gli effetti dovuti al contributo CTM riportati in Tabella 5.11, i valori di potenza ed efficienza calano ulteriormente: la prima fino a 242,05W, la seconda fino a 16,10%.

Le analisi sul modello standard terminano con lo studio dell'intervento dei diodi di bypass a seguito dell'ombreggiamento di una porzione di modulo. Nel caso proposto, si è scelto di oscurare una sola cella di una stringa, inibendo così l'azione di un terzo del modulo.

Di conseguenza, nonostante il diodo di bypass operi correttamente garantendo la stessa I_{sc} del caso senza ombreggiamento, si riscontra una perdita di tensione pari alla somma delle V_{oc} della serie di 20 celle (un terzo del totale), oltre alla tensione ai capi del diodo (circa 0.4V), sottratta a causa dell'orientamento del dispositivo. Per questo motivo si hanno riduzioni nel FF, efficienza (in questo caso molto marcata perché oscurando una sola cella si perde la potenza di tutta la stringa) e potenza: oltre a quella non prodotta dalla stringa inibita, c'è una perdita di circa 5W ($R_{diodo} \cdot I_{mp}^2$) dovuta alla dissipazione del diodo (Tabella 5.7).

Shaded area (cm ²)	4867,20
Voc (V)	24,90
Isc (A)	8,36
FF	78,26%
η	11,02%
Pmax (W)	162,89

Tabella 5.7: Effetto dell'ombreggiamento sulle figure di merito del modulo standard

Gli andamenti di corrente e potenza confermano quanto appena detto: entrambe le caratteristiche si schiacciano verso l'asse delle ordinate e quella P-V si abbassa (Figura 5.4).

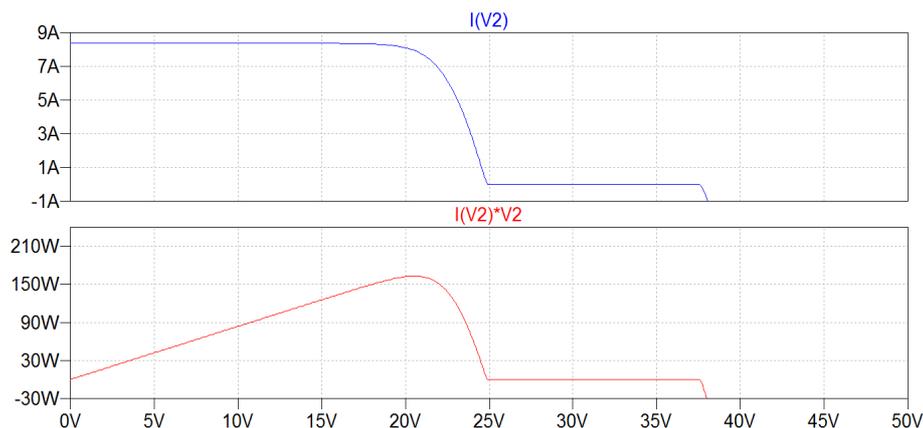


Figura 5.4: Curve I-V e P-V del modulo standard in presenza di ombreggiamento e diodi di bypass

5.2.2 Modulo Sliced: prestazioni e diodi di bypass

Proseguendo con le simulazioni, si passa ora a quella del modulo Sliced in condizioni di totale illuminazione. I risultati di questa analisi confermano le considerazioni teoriche fatte nel capitolo 3 sull'approccio Sliced-cells. Infatti, il valore di I_{sc} è la somma delle correnti generate dalle cinque stringhe di cui è costituito il mini-modulo (connessione in parallelo), il valore di V_{oc} è la somma delle V_{oc} delle slices costituenti una stringa (moltiplicata per due in quanto sono presenti due mini-moduli in serie), la P_{max} è la somma di tutti i contributi delle singole slices, mentre si ha un calo di efficienza di conversione dovuto allo spacing (Tabella 5.8).

SIMULATED BY LT-SPICE	Slice	Modulo
Area (cm ²)	40,56 (attiva: 38,22)	15145,36 (incluso spacing)
V_{oc} (V)	0,625	48,75
I_{sc} (A)	1,34	6,7
FF	79,05%	79,11%
η	17,32%	17,06%
P_{max} (W)	0,66	258,37

Tabella 5.8: Confronto tra figure di merito di slice e modulo

Anche le curve I-V e P-V (Figura 5.5) ricalcano gli andamenti attesi e confermano i valori delle figure di merito riportate in Tabella 5.8:

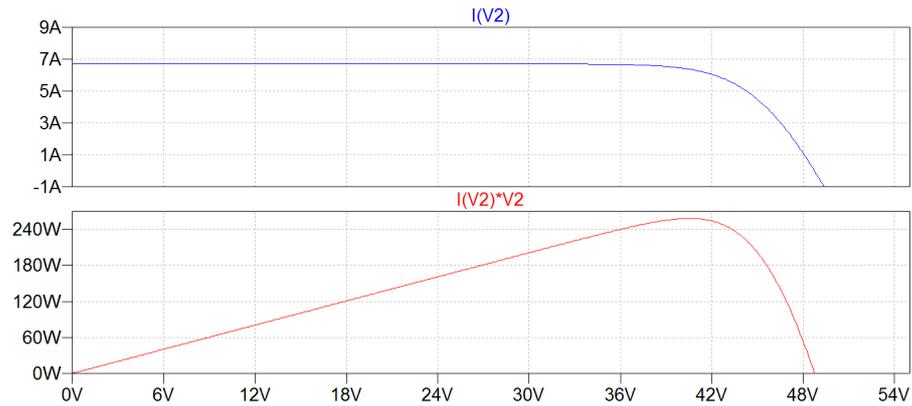


Figura 5.5: Curve I-V e P-V del modulo Sliced

Se a questi risultati applichiamo gli effetti dovuti al contributo CTM riportati in Tabella 5.11, i valori di potenza ed efficienza crescono: la prima fino a 260,74W, la seconda fino a 17,21%.

Le analisi sul modulo Sliced terminano con lo studio dell'intervento dei diodi di bypass a seguito dell'ombreggiamento di diverse porzioni di modulo (sottocapitolo 4.3.2). Di seguito sono riportate le figure di merito nelle tre situazioni esaminate (Tabella 5.9).

	String	2 Strings	5 strings (Halfmodule)
Loss area (cm ²)	1492,92	2985,84	7464,60
Voc (V)	48,48	48,17	24,13
Isc (A)	6,70	6,70	6,70
FF	66,66%	51,22%	78,11%
η	15,86%	13,59%	16,44%
Pmax (W)	216,53	165,29	126,27

Tabella 5.9: Effetto dell'ombreggiamento sulle figure di merito del modulo Sliced

Quello che si evince analizzando questi risultati (ed in generale quelli di un generico modulo Sliced ombreggiato) può essere riassunto nelle seguenti considerazioni:

- A seguito dell'ombreggiamento di una slice viene inibita l'azione di un'intera stringa di 39 slices;
- Riduzione progressiva della Voc: nel caso di totale oscuramento viene dimezzata;

- Garantita la stessa corrente di cortocircuito (e di massima potenza): è sempre il mini-modulo meno ombreggiato che forza la corrente sull'altro (grazie alla presenza dei diodi);
- Riduzione della potenza sempre più marcata al crescere delle stringhe inibite.

Per completare lo studio si sono tracciate le curve I-V, P-V e della corrente dei diodi nei tre casi di ombreggiamento analizzati:

- Oscuramento di una stringa in uno dei due mini-moduli, altro totalmente illuminato (A);
- Oscuramento di due stringhe in uno dei due mini-moduli, altro totalmente illuminato (B);
- Oscuramento totale di cinque stringhe (un intero mini-modulo), altro totalmente illuminato (C).

Tali andamenti sono stati tra loro confrontati in tre diversi grafici.

In Figura 5.6 si può chiaramente notare un abbassamento progressivo della corrente fotogenerata al crescere del numero di stringhe oscurate, fino al caso limite (C) in cui viene perso l'intero contributo di V_{oc} dell'intero mini-modulo ombreggiato.

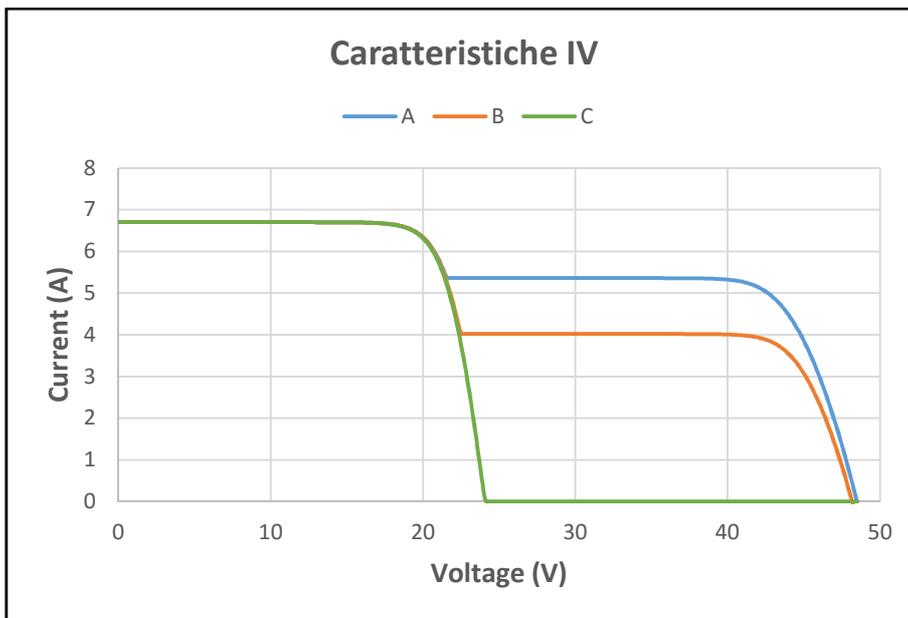


Figura 5.6: Confronto tra caratteristiche I-V del modulo Sliced soggetto a vari casi di ombreggiamento

Dalla Figura 5.7 si evince un abbassamento progressivo del punto di massima potenza. Nel caso di oscuramento totale di un mini-modulo viene “perso” il secondo lembo della curva: MPP trasla verso l’origine.

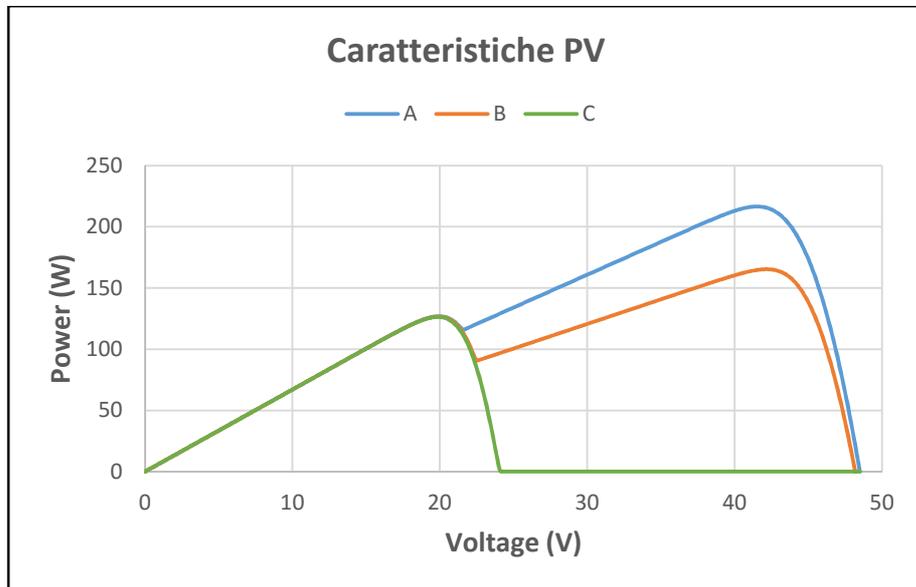


Figura 5.7: Confronto tra caratteristiche P-V del modulo Sliced soggetto a vari casi di ombreggiamento

Da quest’ultima figura (Figura 5.8) emerge come il diodo conduca sempre più corrente all’aumentare delle stringhe oscurate in parallelo ad esso. Deve infatti poter garantire una corrente pari alla I_{sc} generata dal mini-modulo totalmente illuminato (C).

La sua conduzione termina quando il livello di corrente scende sotto al valore generabile dal mini-modulo parzialmente illuminato.

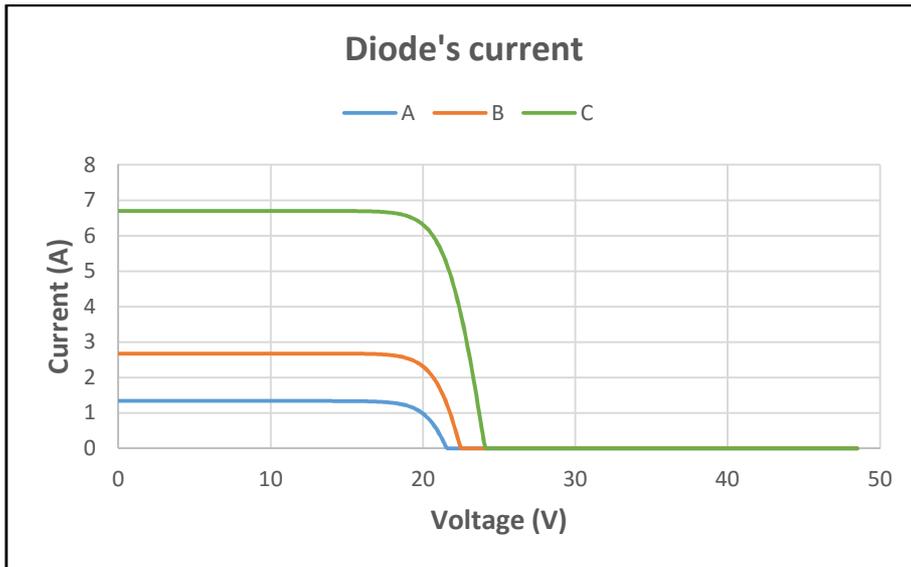


Figura 5.8: Confronto tra caratteristiche di corrente del diodo di bypass nel modulo Sliced soggetto a vari casi di ombreggiamento

5.3 Confronto tra i due approcci: impatto del CTM e diodi di bypass

Un primo confronto tra le analisi svolte nei due diversi approcci, può essere quello tra le figure di merito di una cella standard e l'equivalente di sei slices in serie. Tuttavia, ai fini pratici questo studio non ha molto senso, poiché nella costruzione di un modulo non si costituiranno mai stringhe da solo sei slices.

Passando dunque subito a livello di modulo, la comparazione tra i risultati ottenuti nei due casi (trascurando per il momento il contributo dovuto al CTM) può essere schematizzato come in Tabella 5.10.

MODULO	STD	Sliced	Δ (Sliced-STD)
Area utile (cm ²)	14601,6	14929,2	327,6
Area (cm ²)	15029	15145,36	116,36
Voc (V)	37,74	48,75	11,01
Isc (A)	8,36	6,7	-1,66
FF	79,17%	79,11%	-0,06%
η (considerando spacing)	16,62%	17,06%	+0,44%
Pmax (W)	249,80	258,37	+8,57

Tabella 5.10: Confronto tra figure di merito di un modulo standard e uno Sliced, trascurando il contributo CTM

Da questi dati si evince che, utilizzando l'approccio Sliced-cells piuttosto che quello standard nella costruzione di un modulo fotovoltaico, si ha un miglioramento delle prestazioni del modulo stesso:

- Guadagno in potenza **+8,57 W**: numero di slices equivalente a 65 celle STD nello stesso spazio che con l'approccio classico ne conteneva 60.
- Guadagno di efficienza **+0,44% assoluto**: dovuto allo spacing ridotto rispetto al caso STD (minor area "inutilizzata").

5.3.1 CTM

Questi vantaggi, già non indifferenti, vengono ulteriormente incrementati considerando il fattore Cell-To-Module losses (CTM), ampiamente discusso nei sottocapitoli 2.4.3 e 3.2.4. Infatti, per ottenere le prestazioni del modulo non solamente inteso come

interconnessione di celle, ma considerando anche contributi ottici e resistivi di interconnessioni e incapsulamento, è necessario considerare tale contributo. In questo lavoro viene considerato in post-processing, scalando quindi la potenza in uscita, rappresentando tutti gli effetti tramite un unico fattore moltiplicativo. Come riportato nelle Tabelle 2.1 e 3.1 (dove sono mostrati i singoli contributi dei CTM utilizzati nei due casi), per il caso standard il CTM è di -3,1%, mentre per il caso Sliced-cells +0,92%.

Basandosi sui dati raccolti in Tabella 5.11 si nota quanto esso influisce su potenza e rendimento sia a livello assoluto che relativo (prendendo come riferimento potenza e rendimento del caso standard).

MODULO	STD	Sliced	Δ (Sliced-STD)	
Area utile (cm ²)	14601,6	14929,2	327,6	
Area (cm ²)	15029	15145,36	116,36	
Voc (V)	37,74	48,75	11,01	
Isc (A)	8,36	6,7	-1,66	
FF	79,17%	79,11%	-0,06%	
η (considerando spacing)	16,62%	17,06%	+0,44%	
Pmax (W)	249,80	258,37	+8,57	
CTM	-3,1%	+0,92%		
			ABSOLUTE	RELATIVE
Pmax_final (W)	242,05	260,74	+18,69 W	+7,72%
η _final	16,10%	17,21%	+1,11%	+6,89%

Tabella 5.11: Influenza del contributo CTM sui valori di potenza ed efficienza dei moduli standard e Sliced

I risultati ottenuti indicano, a meno di approssimazioni attuate dal simulatore (comunque rimanendo nei limiti di incertezza e tollerabilità), un guadagno assoluto in termini di potenza prodotta di almeno 20W rispetto ad un modulo standard delle stesse dimensioni.

5.3.2 Diodi di bypass

Il confronto tra i due approcci si conclude con l'analisi del loro comportamento a seguito dell'ombreggiamento parziale del modulo in presenza dei diodi di bypass. Nel farlo si suppone l'ombreggiamento di una stessa area (243,36cm²), corrispondente ad una cella standard e sei slices (Tabella 5.12).

	1 cella ombreggiata	6 slices ombreggiate
Loss area (cm ²)	4867,20	1492,92
Voc (V)	24,90	48,48
Isc (A)	8,36	6,70
FF	78,26%	66,66%
η	11,02%	15,86%
Pmax (W)	162,89	216,53

Tabella 5.12: Confronto tra figure di merito di un modulo standard ed uno Sliced a seguito dell'ombreggiamento parziale in presenza dei diodi di bypass

L'unica nota negativa sull'approccio Sliced-cells è che, per oscuramento di un numero di stringhe via via maggiore, le performance calano drasticamente.

Tuttavia, ciò che rende tale approccio più vantaggioso rispetto a quello classico, è che riesce a garantire:

- Minore area inibita a parità di area oscurata;
- Maggiore Voc a parità di area oscurata, e di conseguenza maggiore potenza generata;
- Utilizzo di due diodi (e non tre), ovvero costi più bassi della componentistica e meno problematiche legate alle interconnessioni.

Proprio sull'ultima considerazione occorre precisare che, essendo tale approccio tutt'ora in via di sviluppo, c'è la possibilità di implementare configurazioni alternative, le quali vadano appunto a scontrarsi con la problematica del numero di collegamenti.

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo elaborato, sono stati descritti in prima istanza i principi che regolano l'effetto di conversione fotovoltaica, per poi analizzare struttura e funzionamento della cella e del modulo fotovoltaico standard. Grazie a questi fondamenti di base è stato possibile introdurre il vero oggetto di questa tesi, ossia l'approccio Sliced-cells, una tecnologia innovativa tutt'ora in via di studio e sviluppo, che mira alla riduzione dell'ormai noto rapporto costo/efficienza, concetto cardine del mondo fotovoltaico e non.

Lo scopo dello studio condotto consisteva nell'analizzare vantaggi e svantaggi di questo nuovo approccio, rispetto a quello standard. Nel far ciò, ci siamo avvalsi dello studio dei parametri elettrici (in particolare della resistenza serie) del circuito equivalente di cella e slice per costruire dei modelli in ambiente SPICE, opportunamente parametrizzati in base a caratteristiche realistiche dei componenti, per poi simulare le due tipologie di modulo.

In particolare, si è effettuato un confronto delle figure di merito risultanti dalle simulazioni dei moduli nei due diversi approcci, a parità di dimensioni delle strutture modulari (60 celle e 390 slices) e delle condizioni di irraggiamento. L'analisi dei risultati ha riportato un guadagno netto di potenza emessa di 9W nell'implementazione Sliced-cells. Questi vantaggi sono da ricondurre alla riduzione di perdite ottiche, infatti, data l'assenza di ribbons e busbars, si ottiene una corrente fotogenerata maggiore. Inoltre, l'interconnessione "a tegole" garantisce una maggior potenza in ingresso, dal momento in cui si riduce l'area del modulo non ricoperta da Silicio.

Lo studio ha poi preso in esame, mediante post-processing dei risultati di simulazione, un fattore di modulazione di potenza ed efficienza che entra in gioco nell'assemblaggio del modulo, il cosiddetto Cell-to-module losses (CTM). Questo contributo si è rivelato di fondamentale importanza, in quanto porta generalmente ad una perdita di potenza. Nel caso di modulo Sliced, per il quale il contributo CTM porta ad un guadagno di potenza, si è potuto constatare un guadagno effettivo di circa 19W (corrispondente all'1% di efficienza) rispetto alla struttura standard. L'analisi dettagliata del CTM mostra infatti come, nel

passaggio da cella a modulo, nel caso Sliced-cells siano del tutto trascurabili le perdite resistive dovute alle interconnessioni.

Per poter valutare l'efficacia dei due approcci in condizioni di ombreggiamento, si è infine simulata l'implementazione dei diodi di bypass nei vari modelli esaminati. Mentre per il caso standard si è utilizzata la tipica configurazione da letteratura [27], nel caso Sliced-cells, non essendo ancora presenti veri e propri studi che certificano delle configurazioni ottimali, si è adoperata una fra quelle possibili. In linea di massima, a seguito della stessa area ombreggiata, il modello Sliced-cells ha garantito una maggiore potenza prodotta rispetto a quello standard.

Tuttavia, il fatto di non avere a disposizione studi da letteratura che certifichino quanto appena detto, l'implementazione di configurazioni alternative per la connessione dei diodi di bypass (con le conseguenti problematiche legate al numero ed alle interconnessioni dei dispositivi) è senza dubbio uno degli aspetti che dovranno essere ulteriormente approfonditi.

Bibliografia

- [1] «en.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protocol,» [Online].
- [2] Fraunhofer ISE, «Photovoltaics report,» 2015.
- [3] Gestore Servizi Energetici, «Solare Fotovoltaico - Rapporto Statistico 2015,» 2015.
- [4] SunPower, «us.sunpower.com/blog/2015/11/12/sunpower-introduces-performance-series-solar-panel/,» [Online].
- [5] PV-TECH, «www.pv-tech.org/news/sunpower-makes-major-module-technology-shift-on-2gw-production-target#,» SunPower. [Online].
- [6] «www.greenenergytech.it,» [Online].
- [7] «<http://energyeducation.ca/>,» [Online].
- [8] «upload.wikimedia.org,» [Online].
- [9] G. Giustolisi, Introduzione ai Dispositivi Elettronici, Milano: FrancoAngeli, 2005.
- [10] Y. Taur, Fundamentals of MODERN VLSI DEVICES, Cambridge University Press, 1998.
- [11] M. A. Green, SOLAR CELLS Operating Principles, Technology and System Applications, Kensington, N.S.W. : The University of New South Wales, 1998.
- [12] «www.intechopen.com,» [Online].
- [13] A. Sproul, *Understanding the p-n Junction, The Key Centre for Photovoltaic Engineering*, UNSW.
- [14] «www.cifgroup.it,» [Online].

- [15] M. A. Green, SILICON SOLAR CELLS - Advanced Principles and Practice, Sydney: N.S.W. : Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales, 1995.
- [16] «userscontent2.emaze.com,» [Online].
- [17] «www.researchgate.net,» [Online].
- [18] «sharepoint.uvm.edu,» [Online].
- [19] National Instruments (NI), «Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code».
- [20] A. Goetzberger, Crystalline Silicon Solar Cells, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany: John Wiley & Sons, 1994.
- [21] «web.tradekorea.com,» [Online].
- [22] «pveducation.org,» [Online].
- [23] «www.studiotecnicost.it,» [Online].
- [24] «www.ecoprogetti.com,» [Online].
- [25] «www.alternative-energy-tutorials.com,» [Online].
- [26] «www.electronics-tutorials.ws,» [Online].
- [27] S. S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Institute of Energy Conversion, University of Delaware, Newark, Delaware, USA, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Spain: John Wiley & Sons, 2003.
- [28] A. Gabor, «Cell-to-Module Gains and Losses in Crystalline Silicon PV,» in *Gabor Photovoltaics Consulting, LLC* , Intersolar NA , 2013.
- [29] I. Haedrich, «Asia-Pacific Solar Research Conference,» in *Cell to module (CTM) ratios for varying industrial cell types* , Centre for Sustainable Energy Systems, ANU, Canberra, Australia , 2015.
- [30] J. Muller & Co., «Resistive Power Loss Analysis of PV Modules Made From Halved 15.6×15.6 cm² Silicon PERC Solar Cells With Efficiencies up to 20.0%,» IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 5, 2015.

- [31] S.Guo, «A Quantitative Analysis of Photovoltaic Modules Using Halved Cells,» Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy, 2013.
- [32] EMS, Engineered Materials Systems, Inc. , «Snap Cure, High Reliability Conductive Adhesive».
- [33] L. C. Montemayor, «ELECTRICALLY CONDUCTIVE SILICONE ADHESIVE,» Dow Corning Corp. Midland, Michigan, 2002.
- [34] T. Sturtevant, «LTspice Tutorial,» Laurier, Inspiring Lives., 2016. [Online]. Available: denethor.wlu.ca/ltspice.
- [35] M. P. Aparicio, «PV Cell simulation with QUCS, A generic model of PV Cell,» 2013.
- [36] L. Castañer, «Modelling photovoltaic systems using Pspice,» John Wiley and sons, 2002.
- [37] MicroSemi, «Schottky Barrier Photovoltaic Bypass Diode,» 2012.
- [38] B. Mitchell, «Predicting solar cell efficiencies from bulk lifetime images of multicrystalline silicon bricks,» Sevier, Hamelin, Germany, 2013.

Ringraziamenti

Questa tesi rappresenta per me la fine di un percorso, fatto di molti sacrifici, a volte delusioni, ma soprattutto di tante soddisfazioni. Tutto ciò però non sarebbe stato possibile, e forse nemmeno così gratificante, se non fosse stato condiviso. Vorrei quindi ringraziare tutti coloro che, in un modo o in un altro, hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo.

Un grazie va al Prof. Claudio Fiegna, che mi ha dato l'opportunità di poter studiare, dapprima con il corso di laboratorio, ma soprattutto con questa attività di tesi, ambiti e tematiche che mi hanno da sempre affascinato e che spero di poter approfondire nel corso degli anni. Grazie poi ai miei Correlatori, Mauro, che ha saputo chiarirmi dubbi e concetti importanti nella prima fase del lavoro, e Massimo, che con la sua professionalità e disponibilità mi ha insegnato e consigliato tanto, oltre ad avermi costantemente aiutato in prima persona, nonostante le difficoltà logistiche, nello svolgimento di questa attività.

Grazie a tutti i miei amici ed ai compagni di facoltà, in particolare a chi, come me, ha vissuto i “disagi” dell'essere pendolare. Un ringraziamento speciale a Marco, compagno di mille (dis)avventure, con cui è stato un piacere lavorare per vari progetti ed affrontare insieme “i peggio esami”.

Ringrazio tutta la mia famiglia, sulla quale posso sempre contare, e i miei genitori, Virginia e Luca, che ogni giorno “investono” su di me ed hanno permesso che intraprendessi questa strada.

Infine, come la ciliegina sulla torta, un immenso grazie va alla mia ragazza, Bridget, perché mi ha supportato (e sopportato) in ogni momento, perché ha condiviso con me gioie e dispiaceri, perché ha sempre creduto in me e mi ha dato la forza per andare avanti e non mollare, e per tanto altro ancora.

Grazie di cuore a tutti!