

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali



Scuola di Dottorato in Fisica

XXII Ciclo

Tesi di Dottorato:

Solare in concentrazione applicato a celle multigiunzione.

Analisi e sviluppo di un sistema prototipale.

Relatore: prof. Roberto S. Brusa

Dottorando: Alessandro Salemi

Anno accademico 2009/2010

INDICE

Capitolo 1	Introduzione ai sistemi di concentrazione applicati al fotovoltaico	6
1.1	Introduzione.....	6
1.2	Sistemi fotovoltaici in concentrazione, CPV	7
1.3	Componenti ottici	8
1.3.1	Collettore o ottica primaria	8
1.3.2	Ottiche secondarie	10
1.4	Ricevitore.....	12
1.4.1	Dissipatore termico.....	13
1.5	Sistema di inseguimento	14
1.6	Celle fotovoltaiche multigiunzione III-V gruppo	16
1.6.1	Effetti della concentrazione e della temperatura.....	17
1.7	Sistema in concentrazione realizzato presso il dipartimento di Fisica dell'Università di Trento...	19
Capitolo 2	Caratterizzazione dello spot	23
2.1	Introduzione.....	23
2.1.1	Concentrazione di un paraboloide	24
2.2	Realizzazione degli specchi	27
2.2.2	Specchi parabolici.....	31
2.3	Caratterizzazione degli specchi parabolici.....	31
2.3.1	Misura di densità di potenza nello spot	32
2.3.2	Forma attesa dello spot	34
2.3.3	Dati sperimentali.....	36
2.3.4	Discussione dei dati sperimentali	40
Capitolo 3	Trasferimento di Potenza al Carico.....	43
3.1	Introduzione.....	43
3.2	Utilizzo di generatori di corrente.	45
3.2.1	Connessioni serie/parallelo classiche.....	45
3.2.2	Utilizzo dei dc_dc converter per l'adattamento di ogni singola cella al carico (1° tipo).....	46

3.2.3	Utilizzo dei dc_dc converter nelle connessioni di adattamento al carico (2° tipo)	49
3.2.4	Procedura di massimizzazione di ϵT nella connessione di 2° tipo	51
3.2.5	Sintesi matematica	53
3.3	Confronto fra i 2 tipi di connessioni proposte.....	53
3.3.2	Esempi riguardanti il fattore di scostamento K.....	56
3.3.3	Conclusioni dell'analisi teorica	65
3.4	Strumentazione	65
3.4.1	Curva IV	66
3.4.2	Descrizione della procedura di misura e di analisi dati sperimentali.....	70
3.4.3	Studio di un array di celle.....	73
Capitolo 4	Dissipazione del Calore.....	76
4.1	Introduzione	76
4.2	Circuito Termico.....	78
4.2.2	Circuito termico del dissipatore	80
4.3	Analisi del circuito stampato	85
4.3.1	Layer di separazione	85
4.3.2	Layer conduttivi.....	89
4.3.3	Resistenze termiche di contatto	90
4.4	Dati sperimentali.....	92
Capitolo 5	Studio dell'efficienza complessiva del concentratore	99
5.1	Introduzione	99
5.2	Configurazione del concentratore	99
5.2.1	Effetti del gradiente di densità di potenza sull'efficienza	102
5.2.2	Dipendenza dell'efficienza dal fattore di intercettazione.....	104
5.2.3	Dipendenza dell'efficienza dalla scelta dei quadranti utilizzati.....	105
5.2.4	Effetti della variazione della densità di potenza dello spettro incidente	107
5.2.5	Dipendenza dell'efficienza dal sistema di connessione e adattamento al carico	108
5.3	Efficienza complessiva del concentratore e conclusioni	111
Bibliografia.....		115

Capitolo 1

Introduzione ai sistemi di concentrazione applicati al fotovoltaico

1.1 Introduzione

Il costo crescente dell'energia elettrica prodotta da combustibili fossili sta favorendo lo spostamento verso tecnologie energetiche da fonti rinnovabili come il solare fotovoltaico (*PV*). Per avere un'idea dell'espansione del mercato *PV* basta osservare l'andamento della produzione di celle solari su scala globale. Negli ultimi dieci anni la capacità di produzione di celle, in gran parte al *Si*, è cresciuta annualmente con una media superiore al 40%, con un picco del 50% nel 2007 rispetto all'anno precedente. La tecnologia *PV* offre una possibile soluzione a molti problemi connessi con le fonti fossili tradizionali, a cominciare dall'esauribilità della sorgente energetica e dalle emissioni dannose per l'ambiente. Alcuni vantaggi specifici di un impianto fotovoltaico rispetto ad un impianto convenzionale sono: i bassi costi operativi (non serve il combustibile), la modularità con la quale può essere fornita l'energia, la mancanza delle usure dovute alle movimentazioni meccaniche e alle alte temperature, la possibilità di integrare sistemi *PV* nelle costruzioni già esistenti, gli eccellenti standard di sicurezza raggiunti. Nonostante questi punti a favore, sono i fattori economici complessivi a determinare le strategie energetiche. Allo stato attuale, l'elettricità *PV* può competere con la generazione elettrica da combustibili fossili solo in sistemi di bassa potenza ($10 \div 20 \text{ kW}$) per applicazioni remote scollegate dalla rete elettrica. Da un punto di vista globale, la potenza elettrica *PV* cumulativa installata a fine 2008 ($15,2 \text{ GW}$) (1) è una quantità ancora insignificante rispetto alla potenza elettrica consumata nel mondo (18 TW). Il problema principale dello sfruttamento del *PV* per la produzione di energia elettrica su vasta scala risiede nella bassa densità dell'energia radiativa che investe il suolo terrestre. Per generare 1 GW di potenza elettrica usando celle solari al *Si*, stimando un'efficienza complessiva del processo di conversione del 10%, si dovrebbe avere un'area di apertura di 10^7 m^2 . L'implicazione problematica non è tanto la necessità di occupare una tale superficie sul suolo, quanto il compito di produrre 10^7 m^2 di celle solari. Uno dei possibili rimedi a questa elevata richiesta di materiali è rappresentato dalla tecnologia in concentrazione (*CPV*). Utilizzando superfici riflettive o rifrattive la luce del sole viene concentrata e focalizzata su una cella solare (o su un array di celle) di dimensioni contenute. Questo permette di risparmiare grandi quantità di materiale costoso, anche se vengono introdotte complessità al sistema come la richiesta di

un meccanismo di inseguimento del sole. I sistemi *CPV* si basano principalmente sulle celle solari al *Si* monocristallino e sulle celle costituite da leghe di materiali dei gruppi *III* e *V* della tavola periodica. I rapporti di concentrazione possibili dipendono dalle caratteristiche di degrado dei materiali usati, sia in termini di prestazioni che di usura dei dispositivi. Ad esempio per una cella al *Si* si può concentrare fino a $200 \div 300X$, mentre per una cella all'*GaAs* fino a un $2000X$ (il rapporto di concentrazione è definito nel paragrafo 1.3.1). Aumentando il livello di concentrazione il costo relativo delle celle solari all'interno di un sistema fotovoltaico diventa sempre meno importante, mentre l'efficienza incide sempre più sulla convenienza dell'impianto. Un altro vantaggio, legato alla concentrazione, deriva dal fatto che l'efficienza di conversione fotovoltaica aumenta con l'aumentare della concentrazione della radiazione incidente. Ad oggi, è stata ottenuta l'efficienza del 40%, con celle multigiunzione (*MJ*) costituite da leghe di materiali dei gruppi *III* e *V*.

1.2 Sistemi fotovoltaici in concentrazione, CPV

Un sistema *CPV* è costituito da:

1. ricevitore
2. collettore (ottica primaria)
3. ottica secondaria(opzionale)
4. meccanismo di inseguimento (nessuno, 1 o 2 movimentazioni)
5. struttura di supporto, connessioni,accumulatori,strumentazione varia ecc

Il ricevitore è un assemblaggio di una o più celle fotovoltaiche e incorpora il necessario per la dissipazione termica e il prelievo della potenza elettrica fotogenerata. Il dispositivo che effettua l'estrazione del calore in eccesso derivante dalla concentrazione è detto dissipatore termico.

Il collettore o ottica primaria è invece il dispositivo che riceve la luce del sole e la focalizza sul ricevitore ed è costituito normalmente da lenti o da specchi. Il *CPV* può avere anche un'ottica secondaria che intercetta la radiazione solare proveniente dall'ottica primaria e la focalizza sul ricevitore; lo scopo è di aumentare l'accettanza angolare del *CPV* o di uniformare la densità di potenza incidente sulle celle. L'accettanza angolare è il massimo angolo, rispetto alla normale del collettore per il quale i raggi solari vengono concentrati nell'area attiva del ricevitore.

Tipicamente, l'ottica primaria concentra la radiazione luminosa, sulla singola cella, su array costituiti da più celle disposte su superfici quadrate o circolari o su array lineari realizzati affiancando più celle lungo una direzione. Nei primi 2 casi si parla di sistemi point focus mentre nell'ultimo caso si parla di sistemi linear focus. In Figura 1.1 è riportato un esempio di *CPV* linear focus, in cui sono

rappresentati i principali componenti elencati sopra; la figura fa riferimento al sistema in concentrazione EUCLIDES (2).

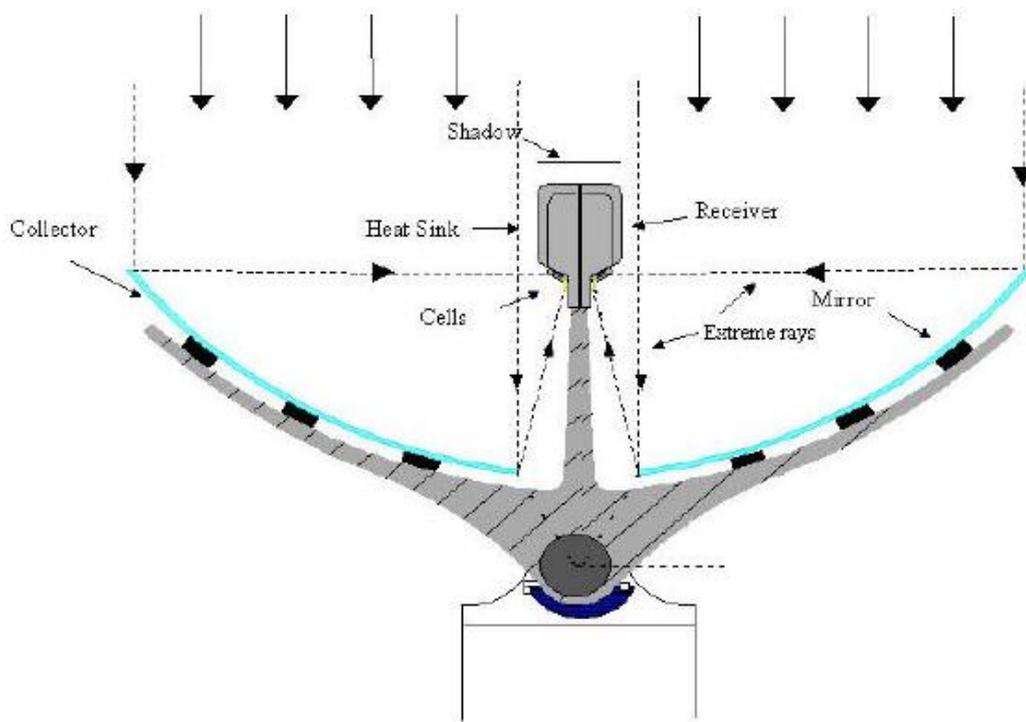


Figura 1.1 Vista frontale del pannello EUCLIDES (2). Esempio di sistema *CPV* linear focus, in cui sono rappresentati i vari componenti elencati nel paragrafo 1.2

1.3 Componenti ottici

Il principale componente ottico in un concentratore è il collettore o ottica primaria, ma esistono anche delle ottiche opzionali che sono:

1. ottiche secondarie
2. spectral beam splitting devices
3. light confinement devices
4. prismatic covers

1.3.1 Collettore o ottica primaria

I collettori possono essere classificati in dipendenza del principio ottico che utilizzano, della forma dello spot prodotto e dal rapporto di concentrazione che producono.

1. Per quanto riguarda il principio ottico, in questa breve introduzione citiamo solo ottiche primarie rifrattive (lenti) e riflesse (specchi). Esistono tuttavia ottiche primarie che sfruttano altri meccanismi come i collettori termo fotovoltaici, luminescenti ecc.. Le ottiche primarie rifrattive possono essere lenti di Fresnel o lenti sferiche. Le lenti di Fresnel sono realizzate con materiali poco costosi, in genere plastiche acriliche, sono più sottili e risultano complessivamente meno costose rispetto a quelle sferiche. In Figura 1.2 i 2 tipi di lenti sono messi a confronto per quanto riguarda le dimensioni. Sono stati prodotti vari tipi di lenti di Fresnel allo scopo di aumentare l'efficienza del sistema in concentrazione raggiungendo sia alti valori di trasmittanza ($85 \div 90\%$) che di concentrazioni (da $200X$ a $1000X$). Le ottiche primarie riflesse sono invece costituite da specchi. Tra i vari materiali utilizzati per la loro realizzazione i principali sono argento e alluminio. La riflettività di superfici alluminizzate, per lunghezze d'onda inferiori alla lunghezza d'onda di interesse per il silicio, è di circa l'85%, mentre per superfici argentate questo valore può arrivare al 95%. Le concentrazioni ottenibili da ottiche riflesse possono essere superiori a $2000X$.

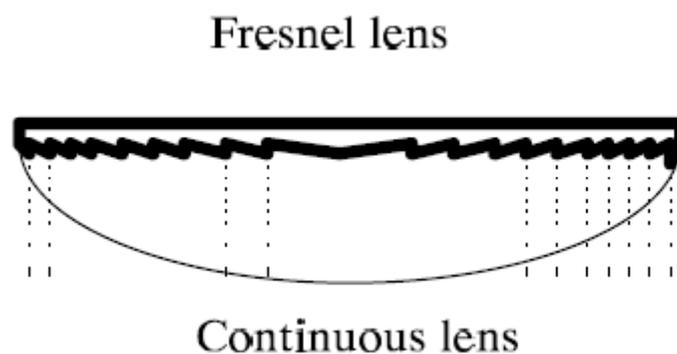


Figura 1.2 Confronto fra le dimensioni di una lente di Fresnel rispetto ad una lente sferica parità di distanza focale.

2. La forma della radiazione concentrata dall'ottica primaria può essere di tipo point focus (radiazione focalizzata in un punto) o linear focus (radiazione focalizzata lungo una linea). I collettori point focus hanno simmetria rotazionale ovvero la superficie dell'ottica primaria è ottenuta da una rivoluzione di 360° di una curva $2D$ (es il paraboloide è la rivoluzione di una parabola). I collettori di tipo linear focus hanno simmetria traslazionale e la superficie dell'ottica primaria è una traslazione di una curva $2D$. Il sistema *EUCLIDES*, in Figura 1.1, è un esempio di collettore linear focus.

3. Infine il rapporto di concentrazione X è il rapporto tra l'area effettiva del collettore e l'area del ricevitore; il valore ottenibile è legato sia all'ottica del sistema sia alla forma dello spot. Valori massimi ottenuti sono: in concentratori statici $X = 10$, in sistemi a lenti $X = 200/1000$, in cui il limite è determinato dalla dispersione della radiazione e in sistemi linear focus $X = 15/60$. Come già detto, l'accettanza angolare è il massimo angolo, rispetto alla normale del collettore per il quale i raggi solari vengono concentrati nell'area attiva sul ricevitore. La formula fondamentale che relaziona l'accettanza al rapporto di concentrazione X è:

$$eq. 1.1 \quad X \leq \frac{n^2}{\sin^2(\theta)}$$

per sistemi a simmetria rotazionale e

$$eq. 1.2 \quad X \leq \frac{n}{\sin(\theta)}$$

per sistemi a simmetria traslazionale, in cui n è l'indice di rifrazione del mezzo che sovrasta il ricevitore e θ è l'accettanza angolare.

1.3.2 Ottiche secondarie

I sistemi in concentrazione possono montare ottiche secondarie interposte tra il collettore e il ricevitore. Le ottiche secondarie ricevono la radiazione dall'ottica primaria e la focalizzano sul ricevitore.

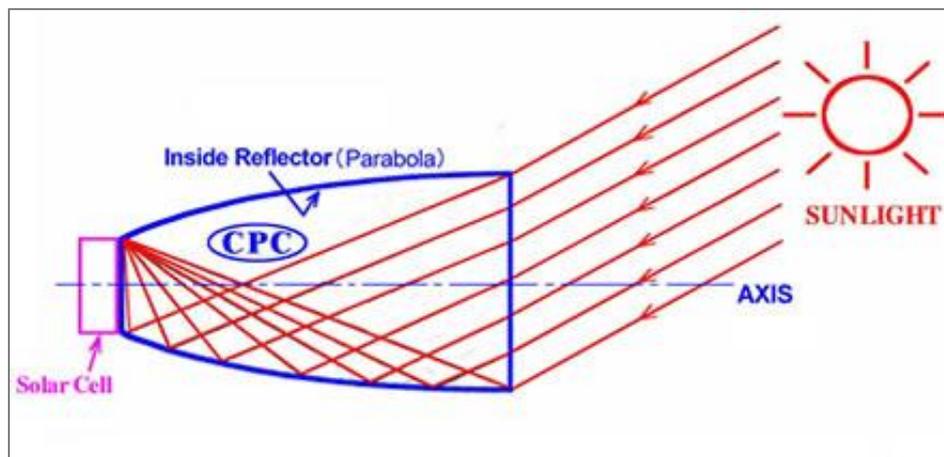


Figura 1.3 Schema di CPC (Compound parabolic concentrator), normalmente utilizzato come ottica secondaria, caratterizzata da valori tipici di concentrazione fino a 10 X e angoli di accettanza elevati.

Con le ottiche secondarie è possibile aumentare l'accettanza angolare, incrementare il rapporto di concentrazione, uniformare la densità di potenza incidente sulle celle fotovoltaiche, cambiare la forma dello spot o ottenere combinazioni di questi effetti. La concentrazione finale di un sistema a 2 ottiche è il prodotto fra le concentrazioni dell'ottica primaria e dell'ottica secondaria. In Figura 1.3 è riportato lo schema di un *CPC* (Compound Parabolic Concentrator), esempio di ottica secondaria utilizzato per incrementare l'accettanza del sistema *CPV* e/o il fattore di concentrazione complessivo del *CPV*. In Figura 1.4 è riportato un esempio applicativo di sistema *CPV* in cui l'ottica primaria è una lente di Fresnel mentre l'ottica secondaria è un *CPC* riempito con materiale dielettrico. Il *CPC* aumenta l'accettanza della lente di Fresnel, quindi riduce la precisione necessaria per il puntamento e di conseguenza i costi del sistema; inoltre, il riempimento con dielettrico del *CPC* aumenta il fattore di concentrazione dell'ottica secondaria secondo l' eq.1.1. con conseguente aumento dell'efficienza.

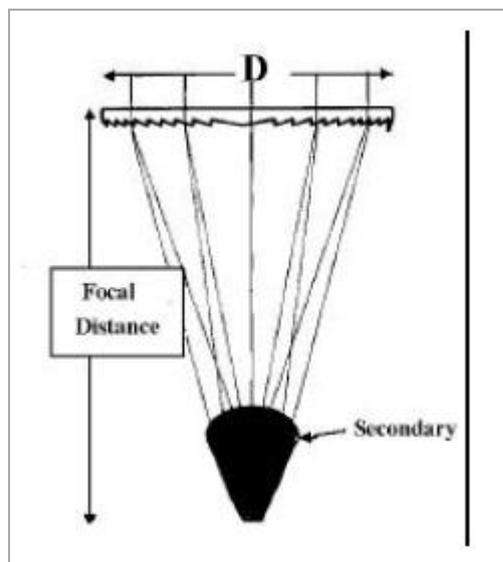


Figura 1.4 Esempio di CPV con lenti di Fresnel come ottica primaria e un DTIR (dielectric filled CPC operating by total internal reflection) come ottica secondaria. L'utilizzo del DTIR aumenta sia l'accettanza che il rapporto di concentrazione del *CPV*.

Altri tipi di ottiche, utilizzate per scopi differenti da quelli sopra elencati sono:

- a. 'spectral beam splitting devices', schematizzati in Figura 1.5, sono filtri dielettrici utilizzati per dividere lo spettro solare in più parti, ciascuna delle quali è poi focalizzata su celle fotovoltaiche con opportuno band gap in modo da ottimizzare l'efficienza di conversione fotovoltaica (il principio della divisione dello spettro solare in più regioni è lo stesso su cui si basa la cella multigiunzione ed è illustrato nel paragrafo 1.6);

- b. ‘light confinement devices’; cavità internamente riflettenti con ingresso molto piccolo, nelle quali è collocata la cella fotovoltaica. Lo scopo è ridurre la perdita di radiazione per irraggiamento o per riflessione da parte della cella stessa.
- c. ‘prismatic covers’; dispositivi che sovrastano la cella ed hanno lo scopo di dirigere la radiazione sulle superficie attiva della cella evitando la griglia metallica di raccolta realizzata sul contatto top della cella per l’estrazione della fotocorrente. Un esempio di ‘prismatic cover’, realizzato dalla ENTECH è riportato in Figura 1.5

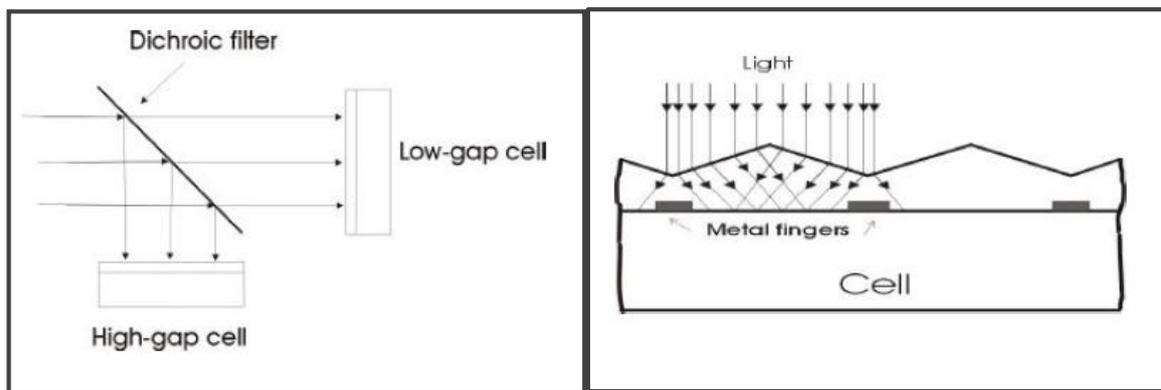


Figura 1.5 A sinistra, schema di un filtro dicroico per lo splitting dello spettro in due regioni, ciascuna indirizzata su una cella con E_g appropriato. A destra ‘prismatic cover’ realizzato dalla ENTECH per deviare la radiazione dai contatti metallici della griglia di raccolta sul top della cella.

1.4 Ricevitore

Il ricevitore è un assemblaggio di una o più celle fotovoltaiche e incorpora il necessario per la dissipazione termica e il prelievo della potenza elettrica fotogenerata.

Ad esclusione dei sistemi point focus con spot di dimensioni ridotte, in cui è possibile utilizzare una sola cella per raccogliere la radiazione luminosa, in generale, la dimensione degli spot è tale da rendere necessario l’assemblaggio delle celle in array. Questi sistemi vengono anche detti ‘dense array’. Nel caso il collettore sia uno specchio parabolico si ottiene un fuoco di area variabile in dipendenza delle caratteristiche del collettore e caratterizzato da alte densità di potenza. Per diminuire le perdite, l’area del fuoco deve essere ricoperta da un continuo di celle e preferibilmente con celle a contatti posteriori.

Un’altra soluzione è includere nel sistema qualche tipo di ottica per prevenire la perdita di potenza dovuta alla radiazione solare che investe l’area occupata dalle connessioni. Fino ad oggi sono stati condotti pochi esperimenti con questo tipo di sistema in concentrazione applicato al PV; i motivi sono principalmente, la necessità di raffreddamento attivo, le difficoltà causate dalla non uniformità

della densità di potenza nel fuoco¹ e la necessità di sistemi di inseguimento precisi, dovuti ad un angolo di accettazione bassa. Per un paraboloide l'angolo di accettazione vale: $\theta = 2 \cdot \theta_{in}$ in cui $\theta_{in} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ rad}^2$.

1.4.1 Dissipatore termico

Nei sistemi in concentrazione il sistema di raffreddamento deve essere sempre presente perché concentrando la radiazione solare la temperatura di equilibrio del ricevitore tende ad aumentare rispetto alla temperatura ambiente, mentre l'efficienza delle celle fotovoltaiche diminuisce con l'aumentare della temperatura.

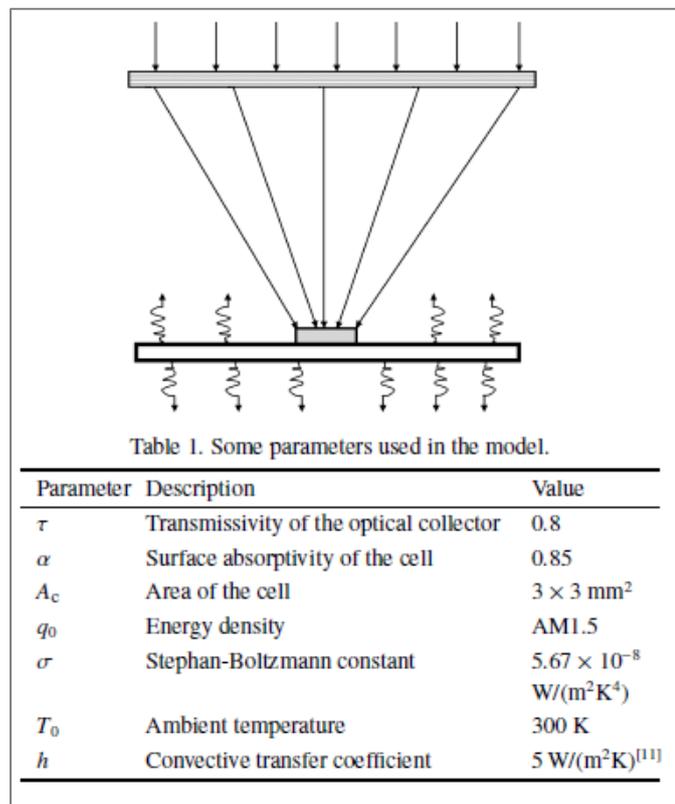


Figura 1.6 Schema del dissipatore e tabella dei valori principali utilizzati in Ref. (3)

¹ Le celle di un array investite da una densità di potenza non omogenea sono caratterizzate da curve *IV* differenti. In casi di elevata disomogeneità è problematico il trasferimento della potenza fotogenerata al carico.

² $Tan(\theta_{in}) = B/A$; $A = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$ è la distanza media Sole-Terra e $B = 0,75 \cdot 10^9 \text{ m}$ è il raggio medio del sole

.La rimozione del calore dalle celle fotovoltaiche può essere fatta in modo attivo, cioè forzando un fluido di raffreddamento a circolare nel dissipatore termico o in modo passivo, semplicemente sfruttando gli scambi convettivi naturali con l'ambiente. Ad esempio nei sistemi point focus a singola cella il dissipatore termico è semplicemente un blocco metallico di forma e superficie appropriata, sul quale viene saldata la cella. Nella Ref. (3), è stata misurata la temperatura di una cella multigiunzione *GaInP/GaAs/Ge* di area $0,09 \text{ cm}^2$ saldata su un parallelepipedo metallico di superficie 63 cm^2 (l'area si riferisce alle 2 facce maggiori del parallelepipedo). La misura è stata effettuata con densità dello spettro incidente, 1000 W/m^2 e rapporto di concentrazione, $400X$ e si è ottenuta una temperatura di equilibrio di 37° C . Nella Ref. (3), sono anche condotte diverse simulazioni della temperatura di equilibrio della cella, effettuate per diversi valori di area del dissipatore e della cella. Il modello utilizzato è riportato in Figura 1.6 assieme alla tabella che riporta i parametri principali della simulazione. Il dissipatore modellizzato è un blocco di metallo ricoperto di vernice nera con emissività $\varepsilon = 0,9$.

Il raffreddamento delle celle nei sistemi 'dense array' è invece uno dei problemi maggiori nella costruzione del sistema *CPV*, in quanto è richiesta simultaneamente una buona trasmissione del calore, ma anche un buon isolamento elettrico tra le celle che costituiscono l'array. L'argomento è affrontato nel capitolo 4, insieme con l'analisi termica del dissipatore realizzato. Varie metodologie di raffreddamento delle celle, proposte per l'estrazione del calore dai sistemi 'dense array' sono raccolti nella Ref. (4).

1.5 Sistema di inseguimento

Il puntamento solare può essere statico oppure si può effettuare l'inseguimento con movimentazioni ad 1 asse o a 2 assi. Nei sistemi statici rientrano anche quelli che necessitano di qualche aggiustamento annuo e sono normalmente caratterizzati da collettori a simmetria traslazionale e grande angolo di accettazione ($\pm 23^\circ$). Gli inseguitori ad 1 asse utilizzano prevalentemente ottiche riflesse a simmetria traslazionale. Hanno il vantaggio di opporre poca resistenza al vento e di essere di facile installazione in quanto sono montati vicino al terreno. L'asse di rotazione può essere verticale, orizzontale est-ovest, orizzontale nord-sud e polare, cioè inclinata rispetto all'orizzonte di un angolo pari alla latitudine (parallela all'asse di rotazione terrestre). Gli inseguitori a 2 assi sono invece necessari per concentrazioni sopra i $60X$, sia che il *CPV* monti collettori a specchi o a lenti e in generale per sistemi con un piccolo angolo di accettazione. Per quantificare l'incremento di potenza annua prodotta, in funzione del numero di assi con cui si effettua l'inseguimento, riporto i dati relativi ai pannelli fotovoltaici (*FPPV*), per i quali sono disponibili quantità di dati sufficienti per una

statistica. L'incremento di potenza annua prodotta dai sistemi ad 1 asse rispetto ai sistemi statici è di circa il 30 %, mentre utilizzando sistemi a 2 assi è di circa il 36% (5).

Il controllo dell'inseguimento può essere fatto utilizzando le conoscenze astronomiche del moto della terra intorno al sole ed essere implementato in software di controllo delle movimentazioni oppure può essere fatto direttamente con sensori sensibili alla radiazione solare che ne permettono sia il puntamento che l'inseguimento. Il primo metodo non risente della presenza di nuvolosità, mentre il secondo metodo non funziona in presenza di nuvole, quindi normalmente i sensori sono utilizzati come feedback per aumentare l'accuratezza del puntamento astronomico. In Figura 1.7 è rappresentato l'inseguitore solare a 2 assi, realizzato dal gruppo I.d.E.A. L'asse di rotazione principale è orientato parallelamente all'asse di rotazione terrestre e il collettore ruota in verso opposto alla rotazione terrestre, mentre la 2° movimentazione (denominato 'alzo specchi' in Figura 1.7) si occupa di seguire la variazione dell'angolo di declinazione del sole ($\pm 23^\circ$ in un anno). La rotazione è effettuata con un motore passo passo Oriental Motor e con un motoriduttore Bonfiglioli 1:10000 posto in serie al motore; il motore è pilotato in modo che la velocità angolare dell'asse principale sia $0,004167 \text{ gradi/sec}$, pari alla velocità angolare media della rivoluzione apparente del sole intorno alla terra.

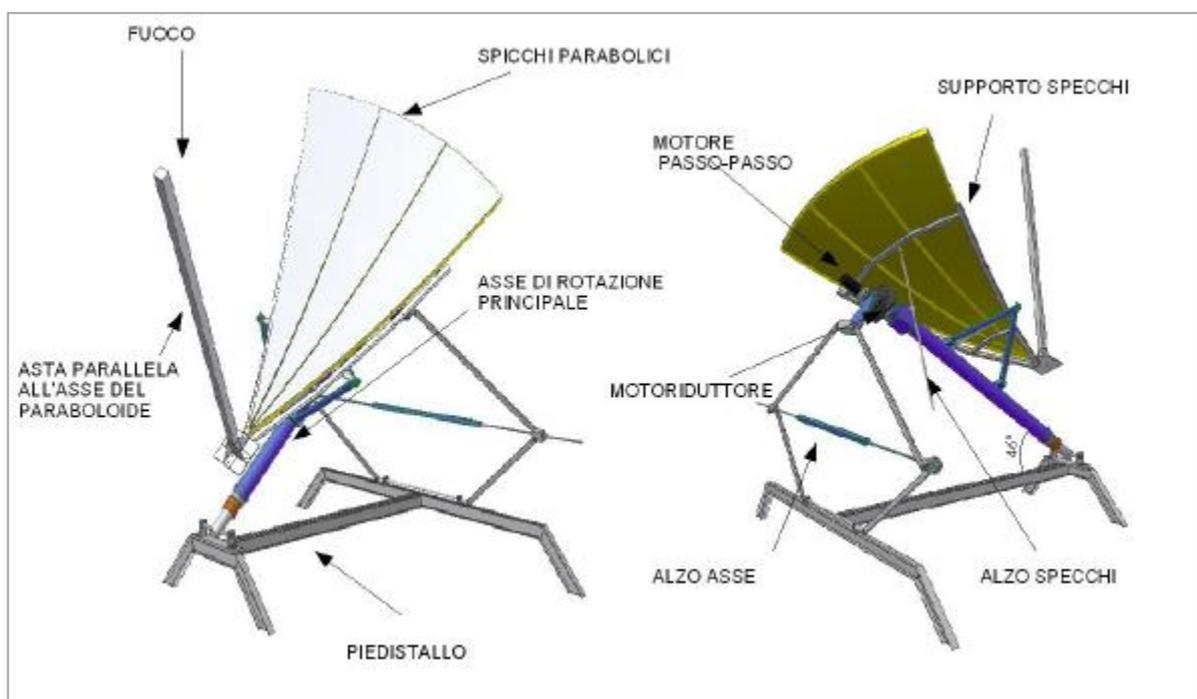


Figura 1.7 Concentratore solare realizzato dal gruppo I.d.E.A. In figura sono visibili il sistema di inseguimento a 2 assi e il collettore costituito da 3 settori parabolici di area complessiva $2,5 \text{ m}^2$, realizzati dal gruppo, vedi capitolo 2).

La seconda movimentazione è in fase di automatizzazione per mezzo di un motore lineare, e fin'ora, la compensazione dovuta alla variazione della declinazione solare ($0,005 \text{ gradi/ora}$) è stata effettuata manualmente³.

1.6 Celle fotovoltaiche multigiunzione III-V gruppo

Come detto nel paragrafo 1.1, nei sistemi *CPV* si utilizzano celle al silicio o celle multigiunzione in dipendenza della concentrazione raggiunta dal sistema. I sistemi *CPV* con collettore a specchio parabolico possono raggiungere rapporti di concentrazione elevata (il valore teorico è $10000X$, calcolato nel paragrafo 2.1.1, ma i valori ottenuti nei sistemi reali si attestano tra i $2000X \div 3000X$); l'ottica da noi prodotta è di tipo parabolico e quindi la scelta del tipo di cella da utilizzare è automaticamente diretta verso le celle multigiunzione. Tali celle sono inoltre caratterizzate da livelli di efficienza molto elevata rispetto alle celle a singola giunzione (in cui rientrano le celle al silicio monocristallino). Per motivare la maggior efficienza di un dispositivo multigiunzione rispetto ad un dispositivo a singola giunzione, è utile ricordare i fattori che limitano l'efficienza di quest'ultimo.

Considerando una cella a singola giunzione (*SJ*) ideale con band gap caratteristico E_g . Un fotone che incide sulla cella con energia $h \cdot \nu < E_g$ ha probabilità nulla di venire assorbito e non contribuisce al processo fotovoltaico. D'altra parte un fotone con energia $h \cdot \nu > E_g$ viene assorbito, ma solo una porzione di energia $E = E_g$, può essere convertita in energia elettrica, mentre l'energia in eccesso $h \cdot \nu - E_g$ viene dispersa sotto forma di calore. La massima efficienza si ha per fotoni con $h \cdot \nu = E_g$. Essendo lo spettro solare diffuso su un range $0 - 4 \text{ eV}$ circa, inevitabilmente una cella a singola giunzione risulta meno efficiente di quanto lo sarebbe nel caso di luce monocromatica.

L'idea per convertire uno spettro allargato più efficientemente è concettualmente semplice: lo spettro solare viene diviso in più regioni spettrali, ognuna delle quali viene convertita da una cella apposita (cioè con band gap tunato sulle frequenze della regione corrispondente). Aumentando il numero di regioni spettrali in cui è diviso lo spettro solare, e quindi stringendo gli intervalli energetici, si riducono le perdite per termalizzazione. Le efficienze limite teoriche di conversione di uno spettro aumentano considerevolmente se si aumenta il numero di regioni in cui viene diviso: nel caso di 1, 2, 3 e 36 divisioni dello spettro solare concentrato a 100 W/cm^2 , tali efficienze limite sono rispettivamente 37, 50, 56 e 72% (6). Nella pratica la realizzabilità di un dispositivo con più di quattro o cinque giunzioni è comunque improbabile.

³ Fin'ora non è stata necessaria l'automazione della 2° movimentazione, in quanto il prototipo è stato utilizzato come strumento di misura, per la caratterizzazione delle celle C1MJ e per la caratterizzazione dell'ottica prodotta dal gruppo (tempi di misura: decine di minuti) e mai in modo continuativo per la produzione di potenza elettrica.

Esistono 2 approcci per la realizzazione di celle multigiunzione. Nel primo approccio le sottocelle sono fisicamente separate una dall'altra mentre un altro approccio, economicamente più conveniente, è quello di crescere le sottocelle una sopra l'altra, in modo da formare un dispositivo monolitico. Gran parte delle celle solari multigiunzione di ultima generazione è costruita in questo modo. Una cella monolitica necessita di un solo substrato; di contro la crescita di una struttura di questo tipo è molto più complessa rispetto alla realizzazione di più celle fisicamente separate. A causa del complicato processo di fabbricazione è impossibile inserire i contatti elettrici indipendenti per ogni giunzione senza compromettere il funzionamento del dispositivo e solitamente i contatti metallici sono presenti solo sulla superficie della cella top e alla base della cella bottom. Pertanto le varie sottocelle risultano connesse in serie, e il dispositivo finale ha l'aspetto di una cella tradizionale, con un solo contatto positivo e un solo contatto negativo. Nel dispositivo monolitico, la cella top è direttamente esposta alla radiazione solare ed è caratterizzata da E_g maggiore. Le giunzioni sottostanti sono caratterizzate da E_g decrescenti fino alla cella bottom che è quella con minor E_g . Nella scelta dei materiali, per formare le giunzioni, si devono quindi considerare semiconduttori con band gap differenti. Inoltre, per fabbricare una cella monolitica efficiente, i materiali usati devono soddisfare alcuni requisiti. In primo luogo, dato un substrato, gli strati depositati devono avere distanze atomiche molto simili. In caso contrario il mismatch reticolare determina la nucleazione e la propagazione di dislocazioni e di altri difetti sull'interfaccia fra due strati. I difetti di interfaccia si comportano spesso come centri di ricombinazione non radiativa; l'effetto conseguente è quello di limitare il tempo di vita o la lunghezza di diffusione dei portatori minoritari, e quindi, in definitiva, l'efficienza del dispositivo. Infine un requisito di validità generale per la fabbricazione di una cella efficiente è l'alta qualità cristallina di tutto il dispositivo, alle interfacce ma anche dei cristalli che formano i vari strati della cella. Questi requisiti: tunabilità del band gap e ottima qualità cristallina si possono ottenere utilizzando, per la fabbricazione della cella monolitica, leghe di semiconduttori appartenenti al $III - V$ gruppo. Infine, a causa della connessione in serie delle sottocelle, nella progettazione di una cella MJ monolitica, occorre fare in modo che, rispetto ad un preciso spettro solare incidente, le correnti nel punto di massima potenza di ciascuna sottocella, siano le stesse. In questo modo il punto di massima potenza di una sottocella coincide con il punto di massima potenza della cella MJ . A tal fine sono determinanti la scelta dei band gap delle varie giunzioni e gli spessori delle sottocelle.

1.6.1 Effetti della concentrazione e della temperatura

Come per le celle a singola giunzione, anche per la cella MJ si assume con buona approssimazione che la corrente di cortocircuito della cella, I_{SC} aumenti linearmente con la concentrazione; per la singola giunzione, l'aumento della concentrazione, determina un ΔV_{OC} positivo, quindi per n

giunzioni l'aumento sarà n volte maggiore (in riferimento alla singola giunzione e per un aumento di concentrazione di un fattore X l'incremento della tensione di circuito aperto, V_{OC} , è: $\Delta V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln(X)$). Complessivamente l'efficienza della cella multigiunzione aumenta con l'aumentare della concentrazione. Tuttavia è da tener presente che la cella reale presenta un massimo di efficienza in corrispondenza del valore di concentrazione per cui, la potenza dissipata sulla resistenza 'serie' della cella non è più trascurabile rispetto a quella che la cella fornisce al carico. La resistenza serie di un dispositivo multigiunzione è principalmente causata dalla griglia metallica di raccolta della fotocorrente presente sulla cella top.

Un aumento della temperatura, in una cella SJ , determina l'aumento della corrente di cortocircuito, I_{SC} . L'aumento di temperatura, infatti, causa la diminuzione di E_g , e quindi la giunzione può assorbire un maggior numero di fotoni (vengono assorbiti anche fotoni ad energia più bassa), con relativo aumento della produzione di coppie elettroni lacune e quindi della corrente I_{SC} . Tuttavia l'incremento di I_{SC} è molto piccolo, ad esempio per la singola giunzione al Si , la variazione percentuale della corrente di cortocircuito riferito ad un aumento di temperatura di 1 grado è $\frac{1}{I_{SC}} \cdot \frac{dI_{SC}}{dT} = 0,0006 \frac{1}{^\circ C}$.

Sempre in riferimento alla SJ , l'aumento della temperatura determina, il calo della tensione di circuito aperto, $V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1\right)$. Il motivo sta nel fatto che diminuisce il termine $\frac{I_{SC}}{I_0}$, infatti con la diminuzione di E_g l'incremento della corrente I_0 è maggiore rispetto all'incremento di I_{SC} descritto sopra. Per una cella a singola giunzione al Si si ottiene, ad esempio, che la variazione della tensione di circuito aperto per l'aumento di 1 grado della temperatura è $dV_{OC}/dT = -2,2 \text{ mV}/^\circ C$. Nel caso di celle MJ ad n giunzioni, la diminuzione del V_{OC} causata dall'aumento di 1 grado della temperatura sarà n volte maggiore.

L'andamento della corrente, I_{SC} , nel caso di celle MJ , è invece, molto complesso. Da una parte il calo di E_g , di tutte le giunzioni, determina la possibilità di un maggior assorbimento di fotoni con relativo aumento della produzione di coppie elettroni lacune e quindi un aumento delle correnti prodotte dalle sottocelle. Dall'altra, la sottocella top, assorbe fotoni che a temperature più basse sarebbero stati assorbiti dalle sottocelle sottostanti, contribuendo al calo delle correnti delle sottocelle sottostanti. Complessivamente, l'andamento della corrente di corto circuito della cella MJ , dipende dal dispositivo realizzato; in ogni caso l'efficienza del dispositivo cala con l'aumentare della temperatura. L'efficienza in funzione della temperatura e della concentrazione delle celle $C1MJ$ della *SPECTROLAB* (struttura: $GaInP/GaAs/Ge$), con cui si sono stati condotti i primi test (7), sono riportate in Figura 4.2 a pagina 77.

1.7 Sistema in concentrazione realizzato presso il dipartimento di Fisica dell'Università di Trento

La scelta di sviluppare un *CPV* a collettore parabolico, dipende principalmente dalla volontà di esplorare una strada fin'ora poco percorsa, probabilmente a causa delle complicatezze legate all'utilizzo dei 'dense array' e quindi ai problemi di dissipazione del calore e dell'omogeneità del flusso, visti nei paragrafi 1.4 e 1.4.1.

Company	Optics	X	Cell/receiver	Size (cm ²)	η_{MOD}	η_{SIST}
Arima Eco Energy	Fresnel lens	476	Spectrolab	1	22-25	–
Concentrix Solar	Fresnel lens	385	Azur	d=2.3 mm	27	23,5
Daido Steel	Fresnel lens	550	Azur	0,49	23	21
Delta electronics	Fresnel lens	470	Spectrolab	1	26	23
Emcore	Fresnel lens	500	Emcore	1	–	27
Energy Innovation	Fresnel lens	1440	Emcore	1	28,8	23-25
Enfocus Engineering	Fresnel lens	>300	–	1	>20	–
Green and Gold	Fresnel lens	1370	Emcore	1	34	28
INER	Fresnel lens	476	Spectrolab	1	23	20
Opel International	Fresnel lens	500	Spectrolab	1	26-28	–
Pyron Solar	Fresnel lens	500	Spectrolab	1	22	21
Sharp	Fresnel lens	700	Sharp	0,49	–	–
Solar Tec	Fresnel lens	600	ENE	0,04	20	17
Sol3G	Fresnel lens	476	Azur	0,3	24	22,7
Sunrgi	Fresnel lens	2000	Spectrolab	1	–	–
Isofoton	Total internal reflections lens	1000	–	0,01	25	23
GrennVolts	Micro Dish	625	Spectrolab	1	28,5	–
Solfocus	Micro Dish	500	Spectrolab	1	25	23
Solar System	Dish & Dense Array	500	Spectrolab	1536 x 1 cm ²	35	30
Cool Earth Solar	Dish & Dense Array	400	–	–	30	–
Menova Energy	Segmented reflector	1450	Emcore	116 x 1 cm ²	26,4	23,2

Figura 1.8 La tabella, riportata dalla Ref. (8), elenca i principali sistemi CPV realizzati. Le colonne riportano rispettivamente le aziende produttrici del CPV, il tipo di collettore, la concentrazione del CPV, l'azienda produttrice delle celle, l'efficienza del modulo CPV e l'efficienza complessiva del sistema.

Inoltre, se al momento sono sufficienti concentrazioni di 500X per ottenere le massime efficienze fotovoltaiche, la prospettiva che in futuro possano essere sviluppate celle multigiunzione con massima efficienza a concentrazioni superiori ai 1000X evidenzia la necessità di studiare sistemi in concentrazione con ottiche primarie adeguate. Il concentratore parabolico si colloca esattamente in questo segmento. Nella tabella in Figura 1.8 riportata dalla Ref. (8) sono trascritti i dati relativi alle più importanti installazioni di sistemi in concentrazione sviluppati nel mondo. La tabella specifica l'azienda che ha sviluppato il prodotto, il tipo di ottica primaria utilizzata, l'azienda produttrice delle celle fotovoltaiche, il rapporto di concentrazione del CPV, l'efficienza del singolo modulo CPV e quella complessiva dell'installazione. Dalla tabella si vede che 15 aziende su 21 hanno scelto di produrre CPV in cui le ottiche sono lenti di Fresnel, ma i valori di efficienza massima, sono quelli ottenuti con CPV ad ottiche primarie riflesse (paraboloidi) e ricevitore dense array. Nonostante tutto si fa presente che non tutte le efficienze dichiarate e riportate in tabella sono state verificate, in particolare le 2 aziende che si occupano di sistemi con ottiche primarie di tipo parabolico, *Solar System*, (9) e *Cool Heart Solar*, (10) non forniscono indicazioni su come hanno condotto i test di efficienza.

Il gruppo *I.d.E.A.* ha realizzato un prototipo di concentratore solare in cui l'ottica primaria è costituita da tre settori parabolici di 15° ciascuno, con una superficie complessiva di 2,5 m². La caratterizzazione dell'ottica è descritta nel capitolo 2, mentre l'inseguitore realizzato è stato descritto nel paragrafo 1.5. Il gruppo *SolarTrento*, con il know out del gruppo *I.d.E.A.* sta invece realizzando un concentratore parabolico completo di superficie 20 m².

Come detto, questo tipo di concentratore richiede l'assemblaggio delle celle in array e necessita di raffreddamento attivo. Per realizzare l'array è preferibile utilizzare celle non troppo piccole, in modo da limitare il numero di connessioni e quindi lo spazio necessario per realizzarle; contemporaneamente l'alta densità di potenza incidente limita le dimensioni delle celle a 1 ÷ 3 cm² per cella (tale limitazione è legata all'aumento della resistenza 'serie' della cella, per via delle crescenti dimensioni della griglia di raccolta). Attualmente sono stati fatti i primi test del concentratore (7) con celle solari multigiunzione C1MJ della *SPECTROLAB*, superficie 1 cm², realizzate con semiconduttori del III – V gruppo e di efficienza massima 37%. E' stato anche realizzata una 1° versione del dissipatore termico che dovrà ospitare l'array di celle; il dissipatore è stato già utilizzato nei test condotti sulle celle *SPECTROLAB* riportati nella Ref. (7).

La 2° versione del dissipatore prevede anche la deposizione sulla superficie di un circuito stampato che faciliti la connessione delle celle ed il prelievo della potenza elettrica fotogenerata. Inoltre, la deposizione del circuito stampato ha lo scopo di ridurre gli spazi tra le celle e quindi la quantità di radiazione persa sulle connessioni, il cui peso è messo in evidenza nella stima di efficienza

complessiva del concentratore effettuata nel capitolo 5. Il problema deriva dal fatto che le celle *C1MJ* e in generale le celle multigiunzione, hanno un contatto sul bottom ed uno sul top, e quindi le connessioni occupano necessariamente parte della superficie investita dalla radiazione solare. L'analisi termica e i dati relativi ai test di deposizione già effettuati sono riportati nel capitolo 4

I concentratori parabolici, sono inoltre caratterizzati da spot in cui la densità di potenza non è distribuita omogeneamente (le misure di densità di potenza nello spot sono discusse nel paragrafo 2.3.3).

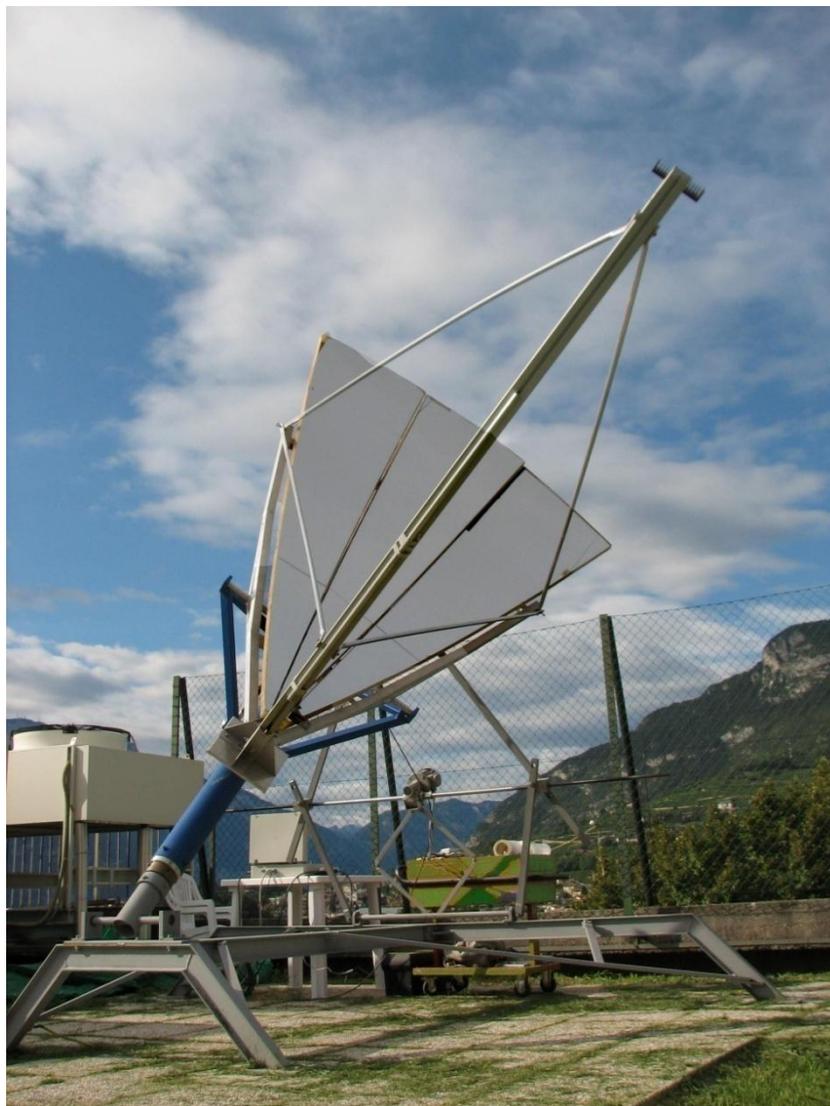


Figura 1.9 Concentratore solare realizzato dal gruppo I.d.E.A. Sono visibili i 3 settori parabolici e il sistema di inseguimento realizzati dal gruppo.

La differente illuminazione delle celle che costituiscono l'array causa problemi di matching fra le celle e con il carico, determinando una notevole calo dell'efficienza di trasferimento della potenza al carico. Questo argomento è discusso ampiamente nel capitolo 3 in cui si introduce un sistema innovativo di connessione, sviluppato nel corso del dottorato, che consente di ottenere alti valori di efficienze di trasferimento della potenza al carico. L'apparato realizzato dal gruppo è mostrato in Figura 1.9.

Capitolo 2

Caratterizzazione dello spot

2.1 Introduzione

L'ottica primaria del concentratore costruito dal gruppo I.d.E.A. è costituita da 3 settori parabolici e la procedura di realizzazione è stata brevettata nel 2008. Il brevetto (11) ed il know-how è in licenza a *SolarTrento* e pertanto verranno riportati solo accenni sulla costruzione dell'ottica. Nel caso di utilizzo di ottiche riflettive le principali caratteristiche richieste agli specchi sono:

1. basso assorbimento della radiazione luminosa incidente
2. lo specchio non deve modificare lo spettro solare
3. resistenza meccanica e flessibilità tali da permetterne la curvatura parabolica (nel nostro caso si prevede l'utilizzo di lastre piane di dimensioni $1600 \times 800 \times 0,85 \text{ mm}$)

Per chi realizza il concentratore fotovoltaico, la qualità dell'ottica, deve essere tale da produrre una precisa densità di potenza nello spot, in relazione alla quale sviluppare il dissipatore di calore e il circuito elettrico delle celle. Se si lavora con sistemi 'dense array' la densità della radiazione luminosa nello spot determina sia le difficoltà nel produrre e raccogliere la potenza elettrica, nonché i problemi termici di dissipazione del calore.

Numero di specchi (N)	Lato del triangolo (m)	Distanza Focale (m)	Area totale del Concentratore (m ²)	Area del Ricevitore (m ²)	Coefficiente di riflessione degli specchi (η_m)	Rapporto di concentrazione (soli)
54	0,05	0,28	0,0585	0,0046	0,9	11,5
600	0,05	0,933	0,65	0,0048	0,9	122
2400	0,05	1,866	2,598	0,0062	0,9	377
3750	0,05	2,332	4,06	0,007	0,9	522
5400	0,05	2,8	5,85	0,0079	0,9	666,5
9600	0,05	3,732	10,39	0,0098	0,9	954
15000	0,05	4,665	16,26	0,0118	0,9	1238,6

Figura 2.1 Nella 1° colonna è riportato il numero di specchi triangolari piani (lato 5 cm) per ottenere la concentrazione riportata in colonna 7. La superficie ottica necessaria è riportata in colonna 5. La tabella è riportata dalla Ref. (12)

Un' alternativa agli specchi parabolici, sono i concentratori parabolici a specchi piani dai quali ci si aspetta uno spot a densità costante e quindi una riduzione parziale dei problemi. Per contro nei concentratori a specchi piani il numero di specchi necessari per raggiungere una certa concentrazione non ha un andamento lineare con la concentrazione, come mostrato nella tabella in Figura 2.1 (12) e una volta realizzata l'ottica la concentrazione massima è fissata. Al momento la massima efficienza di conversione fotovoltaica si ottiene per concentrazioni di lavoro di 500 soli ($1 \text{ sole} = 1000 \text{ W/m}^2$), ma è auspicabile che prossimamente si raggiungano almeno i 1000 soli.

2.1.1 Concentrazione di un paraboloide

Le concentrazioni teoriche ottenibili con superfici riflettenti paraboliche sono molto maggiori di quelle necessarie ai dispositivi fotovoltaici per lavorare in condizioni ottimali.

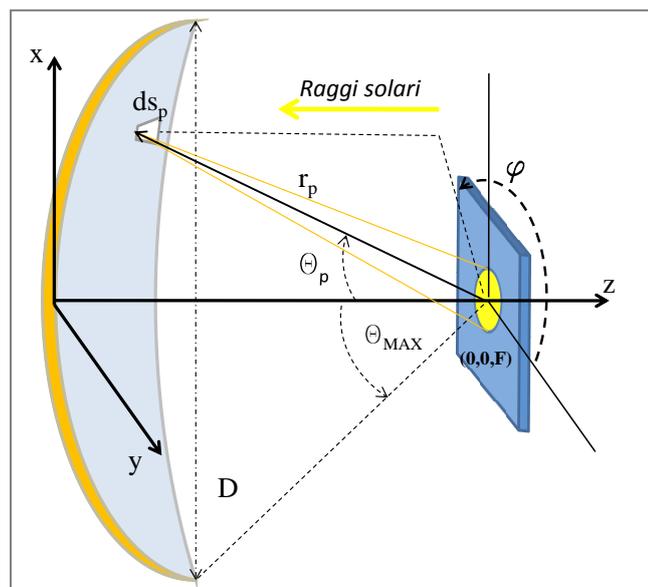


Figura 2.2 Sezione di paraboloide e riferimenti geometrici utilizzati per lo sviluppo dei conti nel corso del paragrafo.

Se si riescono a risolvere i problemi di trasferimento di potenza al carico e dissipazione del calore, un concentratore parabolico è quindi più versatile rispetto ad un concentratore a specchi piani, nel senso che è adattabile e l'ottica primaria può non essere sostituita, qualora fossero prodotte celle con massima efficienza a concentrazioni maggiori. Il rapporto di concentrazione di una superficie parabolica, calcolato rispetto ad una radiazione incidente generata da una sorgente luminosa di forma sferica, si ottiene da semplici considerazioni geometriche. Il paraboloide è definito nello spazio dalle relazioni:

$$eq. 2.1 \quad \begin{cases} z = a \cdot (x^2 + y^2) \\ (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} \leq D/2 \end{cases}$$

in cui D è il diametro, $\frac{1}{4 \cdot F} = a$ è la curvatura e F è la distanza focale. Raggi provenienti dall'infinito (in Figura 2.2 sono paralleli a $-\hat{z}$) sono riflessi nel punto $\bar{F} = (0,0,F)$ detto fuoco della parabola.

La distanza r_p tra il fuoco \bar{F} e un punto \bar{P} sulla superficie del paraboloide è:

$$eq. 2.2 \quad r_p = \frac{1}{2 \cdot a \cdot (1 + \cos \theta_p)}$$

in cui θ_p è l'angolo formato tra \hat{z} e il vettore $\bar{F} - \bar{P}$.

La concentrazione è calcolata nelle ipotesi che il ricevitore sia una superficie piana posta in \bar{F} con versore $\hat{n} = -\hat{z}$ e che la radiazione in ingresso sia determinata dalle dimensioni del sole che, approssimato ad una sfera luminosa di raggio A , distante B dalla terra, determina un'angolo di incidenza θ_{in} . A causa di questo ogni punto \bar{P} (i.e. il $d\bar{s}$ localizzato in \bar{P}) proietta sul ricevitore un'immagine approssimativamente circolare (centrata in $(0,0,F)$) di raggio s_p :

$$eq. 2.3 \quad s_p \cong r_p \frac{\sin \theta_{in}}{\cos \theta_p}$$

L'approssimazione è valida se $F/s_p \gg 1$ (la proiezione reale non è un cerchio, ma un'ellisse in cui uno dei fuochi è nel punto $(0,0,F)$ e la cui dimensione maggiore è diretta lungo la proiezione del vettore $\bar{F} - \bar{P}$ sulla superficie del ricevitore). Dall'eq.2.3 si nota che se aumenta θ_p anche il raggio s_p aumenta e quindi la proiezione con raggio maggiore si ottiene per i punti \bar{P} più esterni, ovvero i punti per cui $\theta_p = \theta_{MAX}$, cioè quelli sul bordo del paraboloide. Tenendo conto di questo, affinché tutta la potenza riflessa sia intercettata, il raggio del ricevitore deve essere uguale al raggio della proiezione del disco solare prodotta dai $d\bar{s}$ sul bordo della parabola. Il ricevitore è quindi un cerchio di raggio:

$$eq. 2.4 \quad S_{MAX} = \frac{\sin \theta_{in}}{2 \cdot a \cdot (1 + \cos \theta_{MAX}) \cdot \cos \theta_{MAX}}$$

e superficie:

$$eq. 2.5 \quad S = \pi (S_{MAX})^2$$

Infine, per il calcolo della concentrazione, è comodo esprimere il raggio $D/2$ in funzione dell'angolo θ_{MAX} . Dalla Figura 2.2 si ricava la relazione:

$$eq. 2.6 \quad \frac{D}{2} = r_{MAX} \cdot \sin\theta_{MAX} = \frac{\sin\theta_{MAX}}{2 \cdot a \cdot (1 + \cos\theta_{MAX})}$$

Il rapporto di concentrazione è normalmente espresso come il rapporto tra la superficie effettiva del paraboloide (superficie normale ai raggi dello spettro solare incidente) e quella del ricevitore, Utilizzando l'eq.2.5 si ottiene:

$$eq. 2.7 \quad C = \frac{\pi(D/2)^2}{\pi(s_{MAX})^2} = \frac{(\sin\theta_{MAX})^2}{(\sin\theta_{in})^2} \cdot (\cos\theta_{MAX})^2$$

L'eq.2.7 mostra che la concentrazione dipende dall'angolo θ_{MAX} , e massimizzando si ottiene che il massimo rapporto di concentrazione si verifica per $\theta_{MAX} = 45^\circ$ e vale:

$$eq. 2.8 \quad C_{MAX} = \frac{1}{4 \cdot (\sin\theta_{in})^2}$$

Il valore numerico approssimato di C_{MAX} , considerando il raggio medio del sole $A = 0,75 \cdot 10^9 \text{ m}$ e la distanza media terra-sole $B = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$ è, nel caso discusso, $C_{MAX} = 10000$. Nel calcolo si è approssimato θ_{in} con $\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$.

Il valore di C_{MAX} è spesso compromesso da diversi fattori che esamineremo nel corso del capitolo come la riflettività degli specchi e la qualità dell'ottica. Per il paraboloide in realizzazione su brevetto dal gruppo I.d.E.A. il rapporto di concentrazione massima teorica prevista dall'eq.2.7 è $C_{MAX} = 9216$ ottenuto da un angolo $\theta_{MAX} = 53,13^\circ$. I valori di concentrazione sperimentali riferiti ad un settore parabolico (corrispondente ad 1/24 del paraboloide completo) sono discussi nel paragrafo 2.3.3.

Il rapporto di concentrazione massima C_{MAX} , ottenuto con l'eq.2.8, è in realtà il valore medio della concentrazione nello spot, ovvero ci sono zone in cui $C_{(X,Y)} > C_{MAX}$ e altre in cui $C_{(X,Y)} < C_{MAX}$, avendo utilizzato $C_{(X,Y)}$ per indicare il rapporto di concentrazione locale $C_{(X,Y)} = \frac{\sigma(x,y)}{\rho_{in}}$, con $\sigma(x,y)$ e ρ_{in} rispettivamente densità di potenze per unità di superficie, sul target e sulla superficie effettiva del paraboloide. Sia $\langle \sigma \rangle$ la densità di potenza media per unità di superficie sul ricevitore, definita dalla:

$$eq. 2.9 \quad \langle \sigma \rangle = \frac{\int \sigma(x,y) dx dy}{\int dx dy}$$

in cui $\sigma(x,y)$ è la densità di potenza per unità di superficie sul ricevitore e gli integrali sono estesi all'intera superficie del ricevitore (che per ipotesi intercetta tutta la radiazione riflessa). Poiché si sta considerando il caso ideale la potenza riflessa coincide con quella incidente sulla superficie effettiva del paraboloide e quindi il numeratore dell'eq.2.9 può essere riscritto come $P_{in} = \rho_{in} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$, in

cui ρ_{in} è una costante che corrisponde alla densità di potenza di radiazione solare che investe una superficie unitaria sulla terra. Il denominatore invece è la superficie del ricevitore trovata con l'eq.2.5. Con le precedenti considerazioni l'eq.2.9 diventa:

$$eq. 2.10 \quad \langle \sigma \rangle = \frac{\rho_{in} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\pi \cdot (S_{MAX})^2} = \rho_{in} \cdot C$$

da cui si vede che la concentrazione C ottenuta con l'eq.2.7 è proporzionale alla densità media di potenza per unità di superficie $\langle \sigma \rangle$, ma in generale $\sigma(x, y) \neq \langle \sigma \rangle$ e quindi $\rho_{in} \cdot C \neq \rho_{in} \cdot C_{(x,y)}$.

2.2 Realizzazione degli specchi

Lo specchio parabolico è modellato su supporto in materiale composito. Per la realizzazione del materiale composito si utilizza la tecnica di infusione sotto vuoto, attualmente in uso per la realizzazione di parti speciali in campo nautico ed aeronautico. Nel caso specifico si utilizza la depressione, necessaria per l'infusione, anche per la curvatura dello specchio piano in forma parabolica. La superficie parabolica che si vuole realizzare con *SolarTrento* è determinata dall'equazione:

$$eq. 2.11 \quad \begin{cases} z = a \cdot (x^2 + y^2) \\ (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} \leq 2500 \end{cases}$$

in cui $a = 10^{-4}$ e x, y, z sono espressi in *mm*. La superficie effettiva di raccolta della radiazione solare è $19.64 m^2$ e il fuoco si trova nel punto $F = (0,0,2500)$. Con lo stampo realizzato, ogni manufatto, corrisponde ad $\frac{1}{24}$ dell'intero paraboloide sopra descritto (3settori sono già stati realizzati). Gli specchi utilizzati sono specchi piani argentati di $0.85 mm$ di spessore forniti dalla *FAST GLASS*. Il taglio manuale degli specchi è facilmente ottenibile adagiando gli specchi su di una superficie piana regolare e rigida e utilizzando un tagliavetro professionale. Le misure di riflettività $R(\lambda)$ dello specchio sono state condotte all'interno del Dipartimento di Fisica utilizzando lo spettrofotometro *Carian Cary 5000* e i risultati sono illustrati nel grafico in Figura 2.3. La riflettività è molto buona nel range di lunghezze d'onda superiori a $500 nm$, raggiungendo un valore di circa 94.4% intorno ai $700 nm$ ed attestandosi al 93% per valori superiori a $800 nm$. Nel punto di massima densità di potenza dello spettro solare ($474 nm$), invece, la riflettività diminuisce a circa 89.8% e cala drasticamente sotto l' 80% a $440 nm$ e sotto il 70% a $430 nm$. La quantità di potenza

dello spettro diretto $A.M. 1.5 D^4$ riflessa dallo specchio è $R_C = 87.6 \% \pm 0.5 \%$ (~83% nel caso dello spettro Globale) ed è stata calcolata per integrazione numerica dei dati di riflettività dello specchio *FAST GLASS* e di densità di potenza, per unità di lunghezza d'onda, dello spettro diretto *A.M. 1.5*.

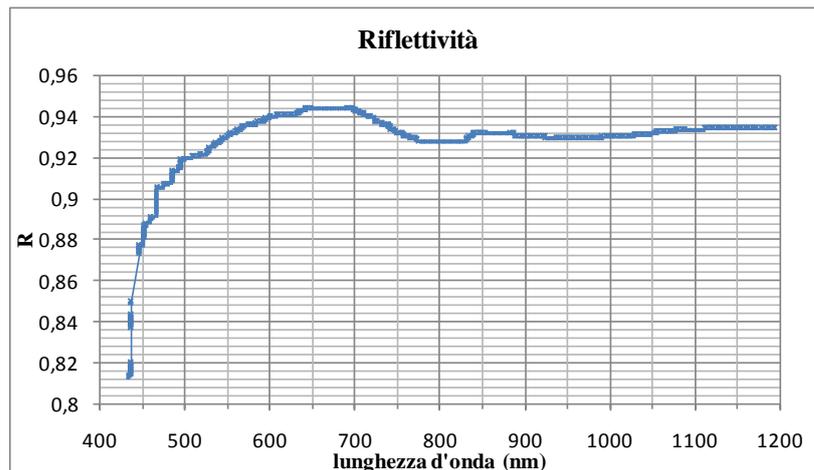


Figura 2.3 Riflettività dello specchio in funzione della lunghezza d'onda ottenuta con lo spettrofotometro Carian Cary 5000.

L'equazione utilizzata è:

$$eq. 2.12 \quad R_C = \frac{\int_0^{\infty} \sigma_R(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \sigma_{A.M.1.5D}(\lambda) d\lambda} \cdot 100$$

Il termine $\sigma_R(\lambda)$ è la densità di potenza, per unità di lunghezza d'onda, dello spettro *A.M. 1.5D* riflesso dallo specchio *FAST GLASS*; $\sigma_R(\lambda)$ si ottiene dalla relazione:

$$eq. 2.13 \quad \sigma_R(\lambda) = \sigma_{A.M.1.5D}(\lambda) \cdot R(\lambda)$$

in cui $\sigma_{A.M.1.5D}(\lambda)$ è la densità di potenza per unità di lunghezza d'onda dello spettro incidente *A.M. 1.5D*, mentre $R(\lambda)$ è la riflettività dello specchio (vedi curva in Figura 2.3.)

Il valore di R_C , calcolato con l'eq.2.12, corrisponde al rapporto tra l'area della curva *A.M. 1.5D* con quella dello spettro diretto riflesso riportate in Figura 2.4. Il dispositivo fotovoltaico multigiunzione è però ottimizzato per operare con un determinato spettro incidente. Assumendo che lo spettro

⁴ in seguito, per *A.M. 1.5* si intende lo spettro standard ASTM G173-03 (23); con *D* si indica la componente diretta e con *G* la radiazione globale. La referenza fornisce la tabella EXCEL degli spettri globale e diretto.

$A.M.1.5D^5$, incidente sullo specchio, sia lo stesso per cui il dispositivo fotovoltaico è stato ottimizzato, dall' eq.2.13 è evidente che la riflessione determina una modifica delle proporzioni tra le $\sigma_{A.M.1.5D}(\lambda)$, a causa della riflettività $R(\lambda)$ dello specchio. Solo nel caso in cui $R(\lambda)$ sia costante, le proporzioni 'originali' si mantengono anche dopo la riflessione e quindi il dispositivo fotovoltaico è in condizioni operative ottimali.

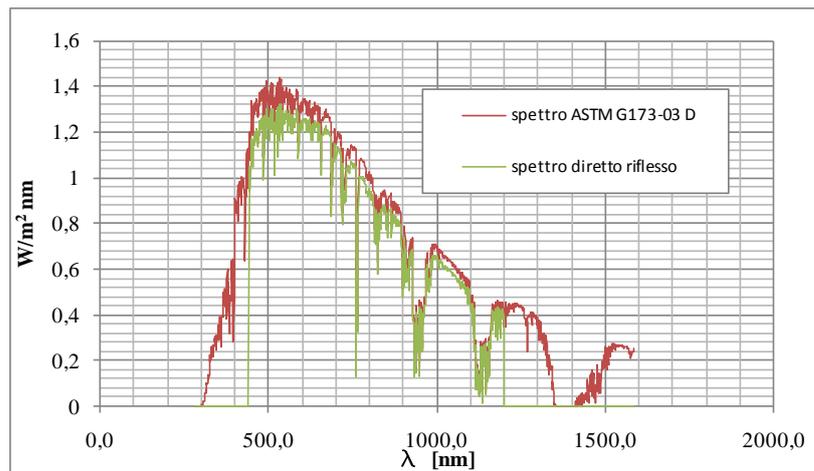


Figura 2.4 Spettro A.M.1.5 D e spettro diretto riflesso dallo specchio FAST GLASS. Si nota il taglio delle lunghezze d'onda inferiori ai 400 nm.

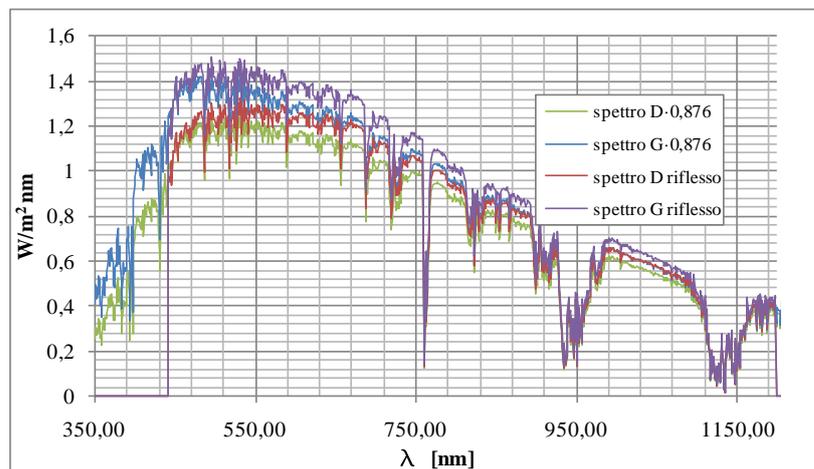


Figura 2.5 Spettri ASTM globale e diretto, scalati di un fattore 0.876 (curve azzurra e verde) rispetto a quelli realmente riflessi dallo specchio FASTGLASS (curve viola e rossa). L'area sottesa dalle 2 curve relative agli spettri diretti è equivalente e corrisponde alla densità di potenza ρ (eq.2.14); è evidente per la curva rossa, il taglio delle lunghezze d'onda inferiori ai 400 nm a causa della riflessione.

⁵Per le celle C1MJ delle SPECTROLAB le caratterizzazioni sul datasheet sono effettuate con lo spettro di riferimento standard (23) , utilizzato per i calcoli svolti nel paragrafo

Nel caso generale in cui la riflettività $R(\lambda)$ non è costante, la modifica dello spettro conduce in genere ad una sovrastima dell'efficienza che può essere quantificata, ma occorre caratterizzare il dispositivo fotovoltaico utilizzando come spettro di riferimento quello riflesso dallo specchio.

Le modifiche apportate allo spettro *A.M.1.5D*, dallo specchio *FAST GLASS*, sono evidenziate in Figura 2.5; la curva verde corrisponde a $\sigma_V(\lambda) = \sigma_{A.M.1.5D}(\lambda) \cdot R_C$, cioè allo spettro *A.M.1.5D* scalato di un fattore R_C (ma con uguali proporzioni fra le densità di potenza per unità di lunghezza d'onda), mentre la curva rossa è lo spettro *A.M.1.5D* riflesso dallo specchio *FAST GLASS*: $\sigma_R(\lambda) = \sigma_{A.M.1.5D}(\lambda) \cdot R(\lambda)$. Manipolando l'eq.2.12 si vede che i 2 spettri sopramenzionati hanno la stessa densità di potenza, ρ :

$$eq. 2.14 \quad \rho = \int_0^{\infty} \sigma_{A.M.1.5D}(\lambda) \cdot \frac{R_C}{100} \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \sigma_R(\lambda) \cdot d\lambda$$

Il valore ρ , è quello che si ottiene facendo misure di densità di potenza con una termopila. L'utilizzo della densità di potenza ρ per il calcolo dell'efficienza del dispositivo fotovoltaico, calcolata ad esempio per estrapolazione dalle curve 'efficienza vs. densità di potenza ($\varepsilon(\rho)$)' fornite dalla ditta produttrice, conduce all'errore di sovrastima menzionato in precedenza. Infatti il valore di $\varepsilon(\rho)$ ottenuto, si riferisce all'efficienza del dispositivo fotovoltaico qualora la densità lo spettro incidente sia descritto dalla curva verde in Figura 2.5 ($\sigma_V(\lambda) = \sigma_{A.M.1.5D}(\lambda) \cdot R_C$); in realtà lo spettro riflesso corrisponde alla curva rossa in Figura 2.5 ($\sigma_R(\lambda) = \sigma_{A.M.1.5D}(\lambda) \cdot R(\lambda)$).

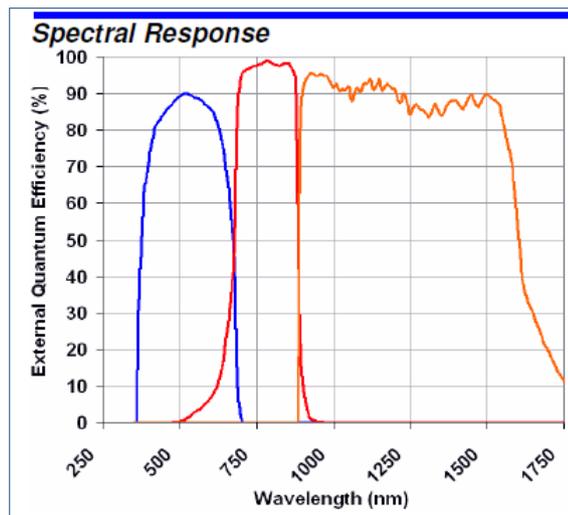


Figura 2.6 External Quantum Efficiency delle celle C1MJ_CDO_100 della SPECTROLAB. Il range di lunghezze d'onda della cella top (370nm - 690nm) comprende la zona di taglio caratteristica dello specchio *FAST GLASS* ($R(\lambda) = 0$ per $\lambda < 400$ nm).

Dal confronto dello spettro riflesso (Figura 2.5) con l' External quantum efficiency delle celle *SPECTROLAB*, (riportato dalla Ref. (13), in Figura 2.6) si vede che lo spettro riflesso taglia le lunghezze d'onda minori di 400 nm, e che l'assorbimento della giunzione top avviene nel range di lunghezze d'onda comprese tra i 370 e i 690 nm. Ci si aspetta dunque che utilizzando lo specchio *FASTGLASS* la cella top limiti la corrente nella cella con conseguente calo di efficienza.

2.2.2 Specchi parabolici

Lo specchio con la sua struttura di supporto viene formato su uno stampo con superficie parabolica convessa. Il supporto (che diviene un pezzo unico con lo specchio: materiale composito) è costituito per la maggior parte da *FLEXIFOAM® (PVC)*. La base per la realizzazione dello stampo (Figura 2.7) è stata ottenuta incollando tra di loro 4 blocchi di resina lavorabile. Lo stampo viene ottenuto lavorando il blocco unico di base con fresa a controllo numerico a 5 assi. La superficie dello stampo viene curata per avere la miglior finitura ottenibile. La procedura di realizzazione del settore parabolico è descritta nel brevetto NUM:*PCT/EP20071011181* (11)



Figura 2.7 Stampo per la realizzazione di un settore parabolico, corrispondente ad 1/24 del paraboloide intero.

2.3 Caratterizzazione degli specchi parabolici

Sono stati realizzati 3 prototipi di settore parabolico. La caratterizzazione dell'ottica è fatta attraverso misure di densità di potenza dello spot prodotto da un settore parabolico.

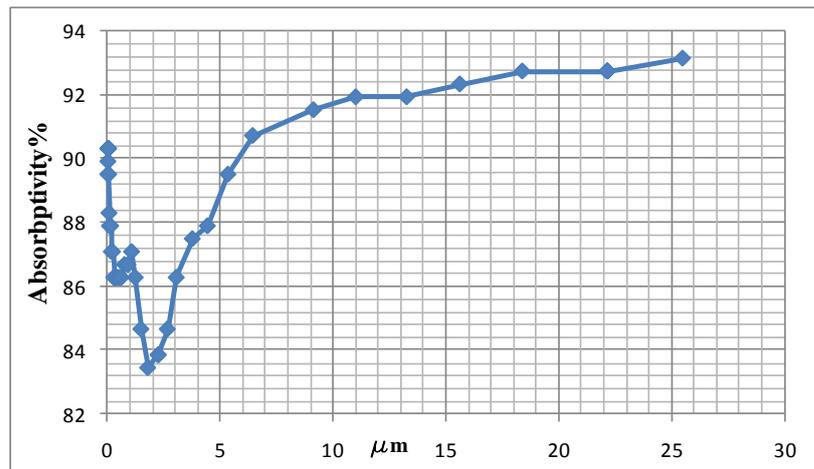


Figura 2.8 Curva dell' assorbanza % della termopila Ophir F150A utilizzata per la caratterizzazione della densità di potenza nello spot.

A tal fine l' area dello spot è 'analizzata' lungo 2 direzioni perpendicolari utilizzando 2 movimentazioni lineari MICOR sulle quali è montata una termopila *Ophir F150A* connessa al relativo lettore *VEGA* e quindi al *PC* attraverso una scheda d'acquisizione *Agilent U2331A*. Il sensore della termopila ha diametro 17.5 mm quindi, per ottenere una discreta precisione nella misura è stato realizzato uno schermo in rame raffreddato con un foro conico di diametro 3 mm e accetanza di $35.00^\circ \pm 1,28^\circ$. La dimensione del foro ha anche lo scopo di preservare la termopila da densità di potenza eccessive. L'assorbanza della termopila è riportata nel grafico in Figura 2.8 e nel range di lunghezze d'onda che riguardano lo spettro solare ($\sim 200 \div 1500\text{ nm}$), l'assorbanza è compresa tra l' 84% e il 90%. Lo strumento è stato tarato con un piranometro *KippZonen CM6b*, specifico per misure di densità di potenza della radiazione solare.

2.3.1 Misura di densità di potenza nello spot

Come detto, la termopila è montata su 2 movimentazioni lineari *MICOR* assemblate in configurazione *X – Y* pilotate utilizzando il software '*Venus.exe*' programmato in *Visual Basic 6*. Tramite il software è possibile impostare l'area totale da analizzare con il sensore, il tempo di attesa fra una misura e la successiva, e il passo lungo le direzioni *X* e *Y*. Il programma fornisce in tempo reale il plot *3D* che descrive l'andamento della densità di potenza nella zona misurata. Per motivi di ingombro della strumentazione e per preservare la termopila da potenze eccessive le misure sono state condotte 80 mm fuori fuoco, quindi, in riferimento alla Figura 2.9, a 2580 mm dalla punta del settore parabolico. Inoltre in questa posizione e utilizzando come ottica primaria un settore parabolico, lo spot assume dimensioni tali da poter contenere un array di 15 celle. Con i dati di densità di potenza misurati nello spot, discussi nel paragrafo 2.3.3, nel Capitolo 5, si stima

l'efficienza complessiva del concentratore qualora l'ottica primaria sia costituita da un settore parabolico.

Le operazioni principali svolte dal programma '*Venus.exe*' sono:

1. movimentazione
2. misura della potenza sul sensore attraverso lo strumento *VEGA* (che possiede un output analogico la cui tensione di uscita è proporzionale alla potenza misurata, $30W = 10 Volt$, l'errore sulla misura di tensione è $\Delta V = \pm 1\%V$ e dunque $\Delta W = \pm 1\%W$)
3. Plot 3D della densità di potenza
4. salvataggio dei dati in file di testo (.txt)

L'analisi dello spot consiste in un'analisi qualitativa della forma e in una quantitativa della potenza totale raccolta sul target. Occorre tener conto che, a causa dell'accettanza di $35.00^\circ \pm 1,28^\circ$ determinata dallo schermo applicato sulla termopila e a causa della posizione della termopila (la termopila si muove sul piano X-Y posto a $80 mm$ dal fuoco, vedi Figura 2.9), si sta di fatto caratterizzando solo una parte dello specchio. Con semplici calcoli geometrici si ottiene che l'area di specchio effettivamente caratterizzata è $A_C = 0,337 \begin{matrix} +0,027 \\ -0,026 \end{matrix} m^2$ contro i $0,818 m^2$ di uno specchio intero.

L'analisi quantitativa consiste nel confronto fra la potenza misurata con la termopila nell'area analizzata e il valore atteso della potenza riflessa da un settore parabolico di area A_C , riflettività complessiva $R_C = 87.6 \% \pm 0.5 \%$, nota la densità di potenza dello spettro solare diretto (misurata ad ogni prova). La misura di densità di potenza dello spettro globale è effettuata con il piranometro *KippZonen CM6b*, così come la misura della densità di potenza della radiazione diffusa. L'errore dello strumento è $\pm 1\%$ del valore letto. La densità di potenza dello spettro incidente è ottenuta per sottrazione delle 2 misure precedenti, dunque l'errore è $\pm 2\%$. La potenza riflessa che ci si aspetta di trovare sul ricevitore vale dunque:

$$e q. 2.15 \quad P = (\rho_{in} \cdot A_C \cdot R_C) \pm \Delta P$$

in cui ΔP è l'errore sul valore atteso, calcolato di volta in volta utilizzando i metodi standard di propagazione dell'errore.

Infine prima di discutere i dati sperimentali occorre definire il metodo utilizzato per la caratterizzazione qualitativa di forma e dimensione dello spot, intendendo per spot l'immagine proiettata su un piano perpendicolare ai raggi solari posto in $z = 2580 mm$. In Figura 2.9 sono rappresentate le condizioni di misura. Si fa presente che lo spot di un settore parabolico disposto come in Figura 2.9, proiettato su un piano posto ad una distanza maggiore della distanza focale F

giace completamente in $y < 0$. Per questo, prima di effettuare la misura, si centra lo spot rispetto all'asse z e se ne minimizza l'area. L'operazione è facilmente eseguibile utilizzando 3 manopole a vite, previste per la regolazione fine della posizione relativa dello specchio rispetto al sole. Come detto, senza questi accorgimenti, l'immagine sarebbe proiettata interamente in $y < 0$, colpendo il profilo *BOSCH* utilizzato da asse z e da supporto della movimentazione $X - Y$.

Ci si aspetta che fuori fuoco l'area dello spot aumenti rispetto alla dimensione nel fuoco, in particolare la distanza relativa tra l'immagine del sole proiettata dai $d\bar{s}$ della parabola situati sulla punta dello spicchio ($\theta = 0^\circ$) e quella proiettata dai $d\bar{s}$ con $\theta \sim 35^\circ$ aumenta con l'allontanarsi dal punto focale. Per centrare lo spot lungo z occorre dunque inclinare il settore parabolico di un angolo α . La variazione della forma dello spot data dalla procedura di inclinazione è descritta nel paragrafo successivo. Il confronto con le misure sperimentali è riportato nel paragrafo 2.3.3.

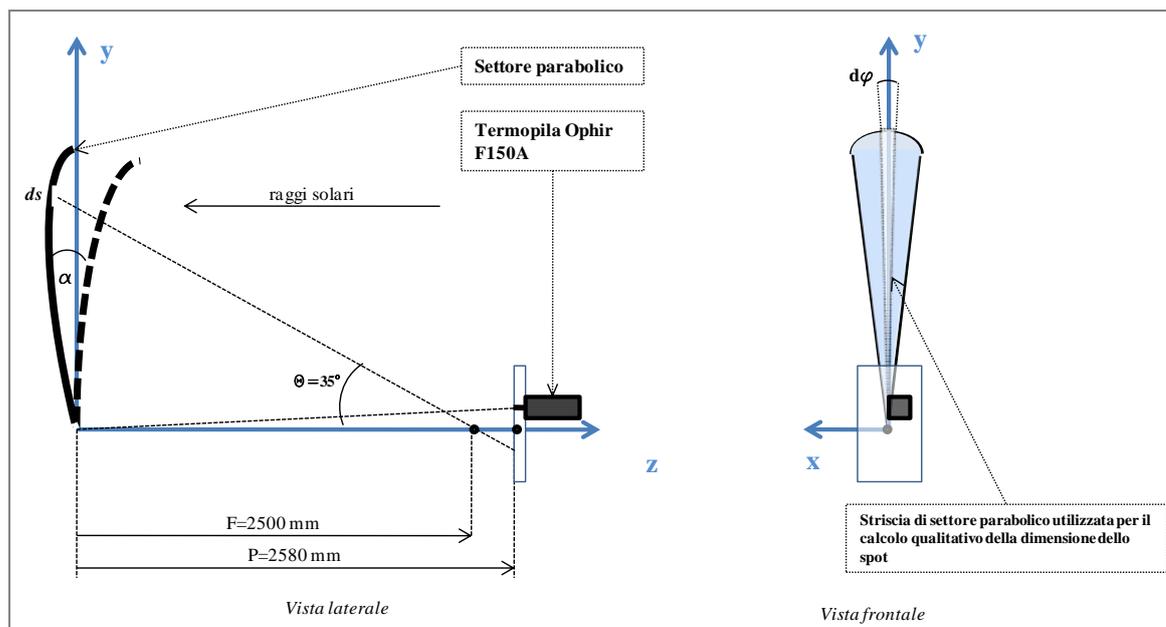


Figura 2.9 Schema della misura di densità di potenza. Nel disegno, il piano di misura si trova in $z=2580$ mm, mentre il fuoco è in $z=2500$. Lo specchio è inoltre inclinato di un angolo α per centrare l'immagine rispetto all'asse z e minimizzare l'area dello spot. Nella vista frontale si riconosce la 'striscia' di settore parabolico utilizzata per il calcolo approssimativo della dimensione e forma dello spot.

2.3.2 Forma attesa dello spot

Ogni $d\bar{s}$ proietta sul piano del target un' ellisse, i cui fuochi sono pressoché coincidenti e le cui dimensioni dipendono dalla distanza tra il $d\bar{s}$ e il piano di proiezione e dall'angolo tra il $d\bar{s}$ e la

normale al piano. L'ellisse di dimensioni maggiore è quella proiettata dai $d\bar{s}$ con $\theta \sim 35^\circ$, mentre quella di dimensione minore è proiettata dai $d\bar{s}$ in $\theta = 0^\circ$. Si veda il paragrafo 2.1.1.

Per dimensionare lo spot si è approssimato il settore parabolico (1/24 del paraboloide completo) ad una striscia parabolica molto sottile di larghezza $d\varphi$ (vedi Figura 2.9, vista frontale), quindi, in Figura 2.10.A è stata calcolata la coordinata y del centro dell'ellisse proiettata da ogni $d\bar{s}$ della striscia in funzione della propria posizione angolare θ quando $\alpha = 0^\circ$, cioè quando l'asse della parabola punta il centro del disco solare. Come ci si attendeva lo spot è interamente situato in $y < 0$.

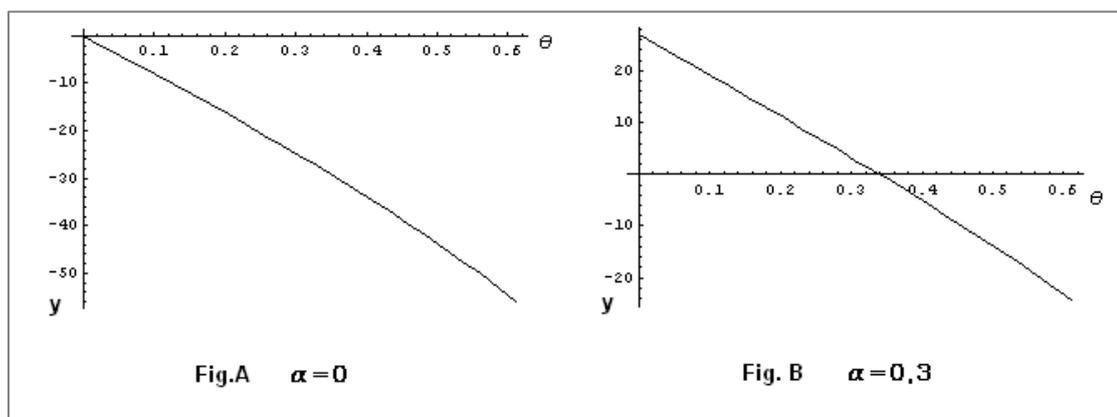


Figura 2.10 Coordinata y del centro dell'ellisse proiettata da ogni $d\bar{s}$ della striscia parabolica in funzione della propria posizione angolare θ quando $\alpha = 0^\circ$ (figura A) e quando $\alpha = 0,3^\circ$ (Figura B).

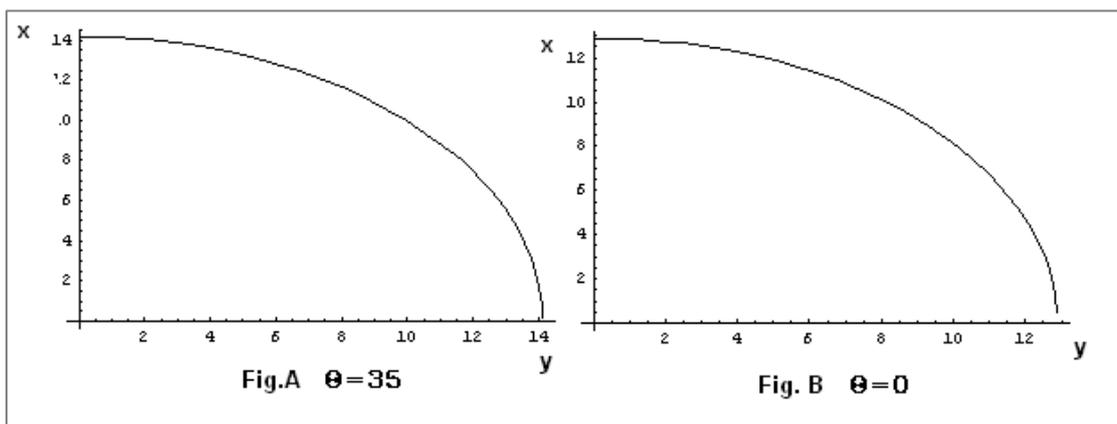


Figura 2.11 Dimensioni delle ellissi prodotte sul piano del target dai $d\bar{s}$ situati in $\theta \sim 35^\circ$ (figura A) e dai $d\bar{s}$ situati in $\theta \sim 0$ (figura B), da una 'striscia parabolica' inclinata di $\alpha = 0,3^\circ$.

In Figura 2.10.B, lo stesso calcolo è stato effettuato considerando lo specchio inclinato di $\alpha = 0,3^\circ$ (vedi schema in Figura 2.9), ovvero dopo la centratura. Il $d\bar{s}$ in $\theta = 0^\circ$ proietta l'ellisse in $y = 26 \text{ mm}$, mentre il $d\bar{s}$ in $\theta = 35^\circ$ proietta l'immagine del sole in $y = -26 \text{ mm}$, e l'area dello spot

atteso è quindi approssimabile alla figura che ha come estremi le 2 ellissi centrate ad una distanza di 52 mm . Le dimensioni delle 2 ellissi sono state calcolate considerando, la distanza dei $d\bar{s}$ in $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 35^\circ$ dal piano del target, l'inclinazione di $0,3^\circ$ della striscia parabolica e sono rappresentate in Figura 2.11.A e B, mentre lo spot atteso è raffigurato in Figura 2.12. Con l'approssimazione del settore parabolico ad una striscia parabolica, lo spot deve essere contenuto nell'immagine riportata in Figura 2.12 che ha una superficie di circa 18 cm^2 ; ci si attende però un possibile allargamento dovuto alla dimensione reale del settore parabolico.

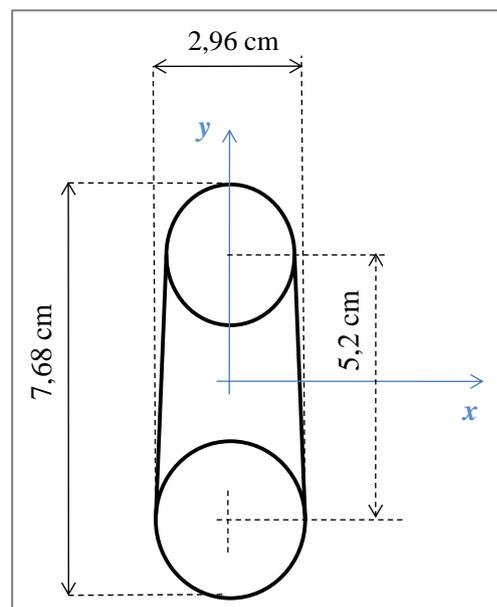


Figura 2.12 Approssimazione del contorno atteso per lo spot, nelle condizioni operative descritte, approssimando il settore parabolico ad una striscia parabolica, come mostrato in Figura 2.9

2.3.3 Dati sperimentali

Nei seguenti test, effettuati l'11 giugno 2009, la potenza di spettro diretto incidente è misurata per sottrazione del valore di radiazione diffusa da quello di radiazione globale, entrambi misurati con un piranometro *KippZonen CM6b*, inoltre, prima della caratterizzazione, lo spot è sottoposto all'operazione di centratura descritta nel paragrafo precedente. Le misure di densità di potenza sul target sono effettuate a 80 mm dal punto focale, orientando la termopila *Ophir 150A* in modo che la componente normale alla superficie del sensore sia parallela alla direzione dei raggi solari incidenti ($-\hat{z}$). Le misure sono fatte a passi di 3 mm sia in x che in y . Le immagini riprodotte nel paragrafo sono ottenute utilizzando il software '*Surfit*' programmato in *Visual Basic 6* da Franco Languasco (14). Il programma comprende tre routines per l'interpolazione di superfici da punti dati sparpagliati.

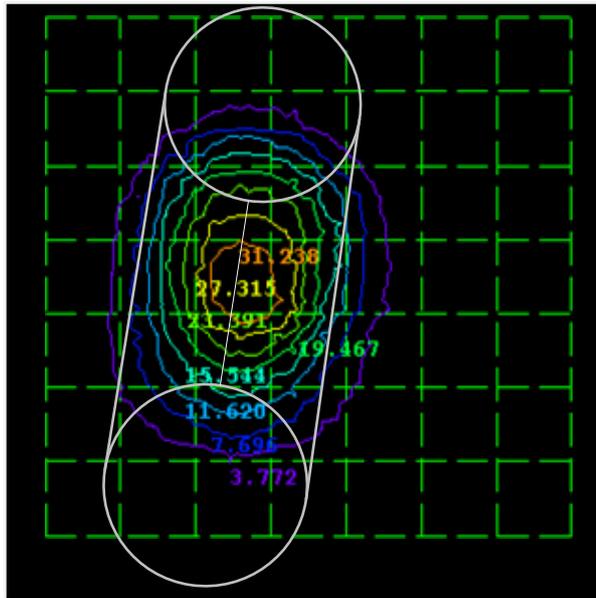


Figura 2.13 Misura 1: linee di livello della densità di potenza (espressa in W/cm^2) e sovrapposizione in scala del contorno massimo previsto per lo spot nel paragrafo 2.3.2. 1 quadrato tratteggiato in verde è 1 cm^2

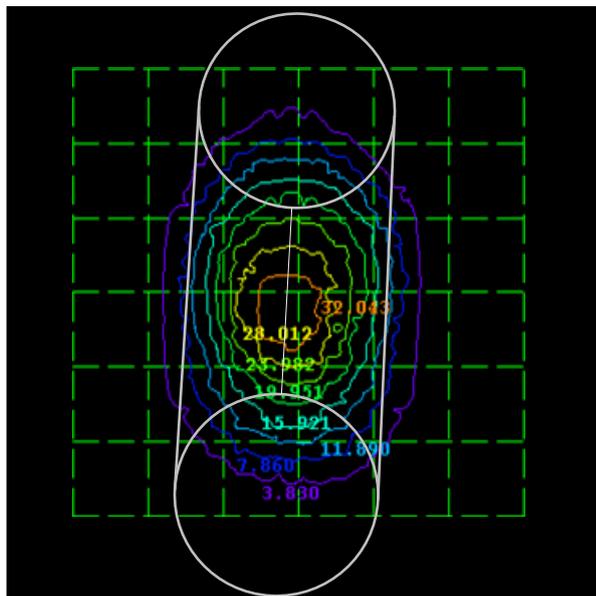


Figura 2.14 Misura 2: linee di livello della densità di potenza (espressa in W/cm^2) e sovrapposizione in scala del contorno massimo previsto per lo spot nel paragrafo 2.3.2. 1 quadrato tratteggiato in verde è 1 cm^2

L' interpolazione viene eseguita in corrispondenza dei punti situati su di una griglia rettangolare con ascisse ed ordinate date. Sono disponibili tre 'routines' per il fit: *KTB2D* (metodo geostatistico particolarmente utile quando le variazioni da punto a punto sono troppo irregolari per essere rappresentate da una funzione matematica), *MASUB* (algoritmo basato sulla triangolazione dei punti

dati) e *QSHEP2D* (esegue un' interpolazione quadratica dei punti dati). Di seguito si riportano i dati sperimentali e gli esiti delle analisi quantitativa e qualitativa descritte nei paragrafi 2.3.1. e 2.3.2.

Misura 1 (vedi Figura 2.13), dati sperimentali:

Radiazione Globale $890,0 \pm 8,9 \text{ W/m}^2$, Radiazione Diffusa $180,0 \pm 1,8 \text{ W/m}^2$, Radiazione diretta $710,0 \pm 10,7 \text{ W/m}^2$, Superficie caratterizzata = 36 cm^2 , tempo di misura della termopila 2 s

Commento alla misura 1:

l'integrale numerico della densità di potenza sulla superficie 'analizzata' è di $230,9 \pm 2,3 \text{ W}$, mentre il valore di potenza attesa, calcolato secondo l'eq.2.15 dà: $P = 209,2_{-20,4}^{+21,5} \text{ W}$. I valori ottenuti sono concordi entro l'errore previsto. Il confronto qualitativo tra forma prevista e spot misurato è effettuato in Figura 2.13 per sovrapposizione della Figura 2.12 alle linee equipotenziali risultanti dalla misura.

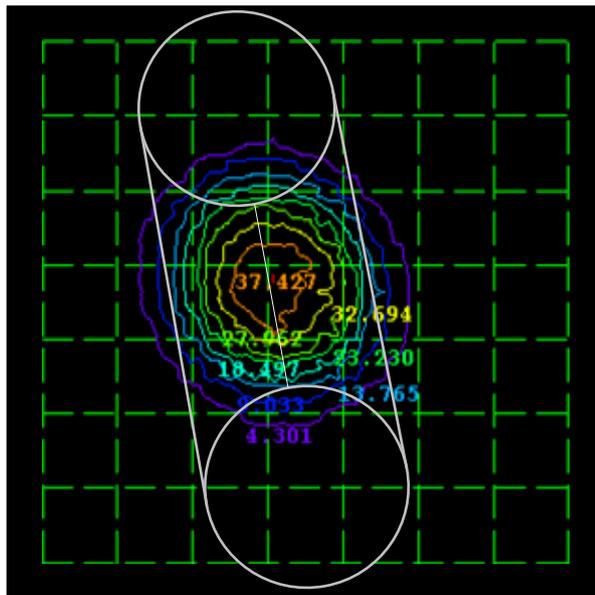


Figura 2.15 Misura3: linee di livello della densità di potenza (espressa in W/cm^2) e sovrapposizione in scala del contorno massimo previsto per lo spot nel paragrafo 2.3.2. 1 quadrato tratteggiato in verde è 1 cm^2

La lunghezza dello spot (direzione y) rientra nei valori stimati, anzi sembra inferiore a quanto previsto, mentre in direzione x la misura rivela densità di potenza non nulla anche fuori dalla regione di spot atteso, e la causa probabile, già discussa nel paragrafo precedente è l'approssimazione di striscia parabolica con cui si è ottenuta la Figura 2.12. E' opportuno specificare che la superficie caratterizzata in 'dati sperimentali' si riferisce all'area della griglia 'analizzata' dalla termopila e non alla superficie dello spot in cui la densità di potenza è diversa da zero. I commenti sono identici per

tutte le misure quindi non saranno ripetuti, ma si riportano soli i dati relativi all'integrale numerico della densità di potenza e le condizioni operative.

Misura 2 (vedi Figura 2.14), dati sperimentali:

Radiazione Globale $900,0 \pm 9 \text{ W/m}^2$, Radiazione Diffusa $170,0 \pm 1,7 \text{ W/m}^2$, Radiazione diretta $730,0 \pm 10,7 \text{ W/m}^2$, Superficie caratterizzata = 34 cm^2 , tempo di misura della termopila 2 s.

Commento alla misura 2:

l'integrale numerico della densità di potenza sulla superficie 'analizzata' è di $223,2 \pm 2,2 \text{ W}$, mentre il valore di potenza attesa, calcolato secondo l'eq.2.15 dà: $P = 215,1^{+22}_{-20,6} \text{ W}$.

Misura 3 (vedi Figura 2.15), dati sperimentali:

Radiazione Globale $900,0 \pm 9 \text{ W/m}^2$, Radiazione Diffusa $160,0 \pm 1,6 \text{ W/m}^2$, Radiazione diretta $740,0 \pm 10,6 \text{ W/m}^2$, Superficie caratterizzata = 30 cm^2 , tempo di misura della termopila 2 s.

Commento alla misura 3:

l'integrale numerico della densità di potenza sulla superficie 'analizzata' è di $235,75 \pm 2,35 \text{ W}$, mentre il valore di potenza attesa, calcolato secondo l'eq.2.15 dà: $P = 218,5^{+22,2}_{-20,8} \text{ W}$.

Le rappresentazioni 3D della densità di potenza sono riportate in Figura 2.16.

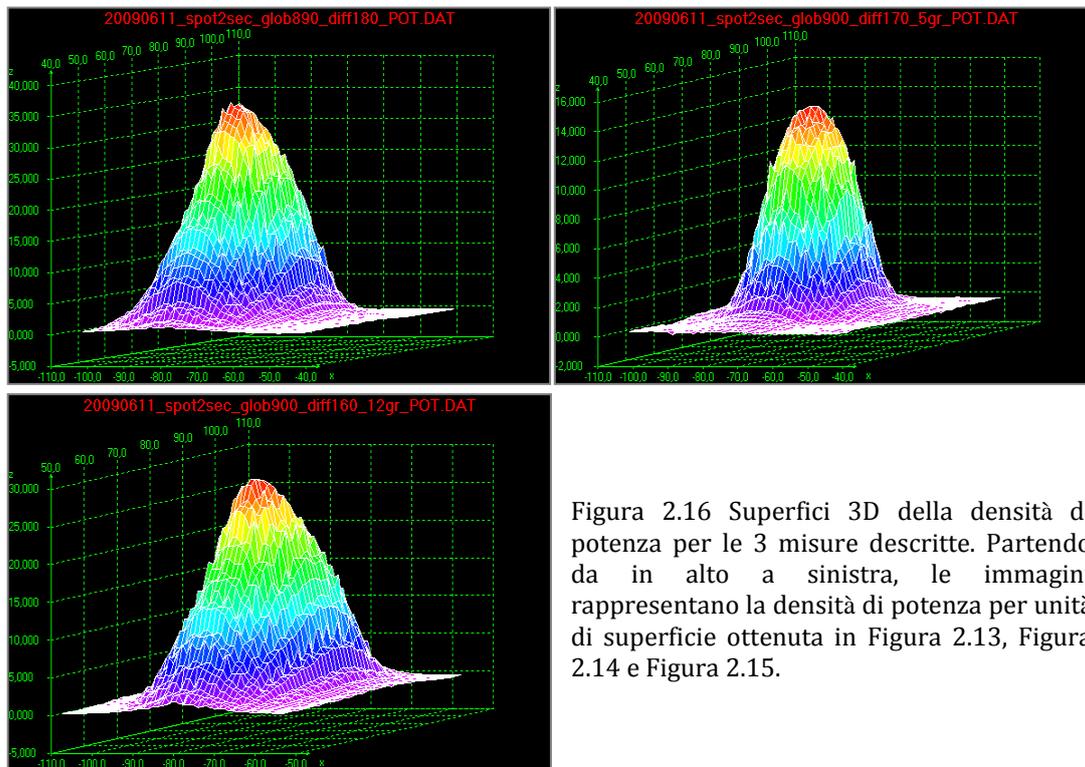


Figura 2.16 Superfici 3D della densità di potenza per le 3 misure descritte. Partendo da in alto a sinistra, le immagini rappresentano la densità di potenza per unità di superficie ottenuta in Figura 2.13, Figura 2.14 e Figura 2.15.

2.3.4 Discussione dei dati sperimentali

La prima osservazione è che gli spot hanno forme e inclinazioni differenti tra loro (vedi Figura 2.13, Figura 2.14, Figura 2.15). La causa è il peso del sistema ‘*movimentazione + termopila*’ che determina una leggera flessione dell’asta su cui è montato, inconveniente meccanico non previsto, ma che può essere facilmente risolto.

Oltre a questo, le caratterizzazioni svolte sul settore parabolico hanno prodotto risultati in linea con quanto previsto. I dati ottenuti con l’integrazione numerica della potenza misurata, confermano il valore di riflettività complessiva R_C , calcolato nel paragrafo 2.2 a partire dai dati di riflettività dello specchio *FAST GLASS* con cui è realizzata l’ottica (il valore è in relazione allo spettro solare diretto *A.M. 1.5D*: $R_C = 87,6 \pm 0,5\%$).

Per quanto riguarda la forma dello spot; in gran parte dell’area analizzata con la termopila, la densità di potenza incidente è nulla e in tutte le misure, la maggior parte della potenza (linee equipotenziali nelle Figura 2.13, Figura 2.14, Figura 2.15) rientra come previsto all’interno del contorno stimato nel paragrafo 2.3. Nel dir questo si tiene conto delle approssimazioni con cui è stato ricavato il contorno.

Per quanto riguarda le densità di potenza ottenute, si nota che gli spot sono caratterizzati da forti gradienti di densità di potenza. I gradienti di densità di potenza medi nelle direzioni x ed y , calcolati

con i dati sperimentali relativi alle 3 misure, sono rispettivamente, $2,23 \frac{W}{cm^2 \cdot mm}$ e $1,54 \frac{W}{cm^2 \cdot mm}$. L'effetto dei gradienti di densità di potenza sull'efficienza delle celle fotovoltaiche *MJ* è trattato nel capitolo 5. Dall'analisi dei dati sperimentali si ottiene infine che il picco di densità di potenza misurata è stato $39 W/cm^2$ nella 3° misura, condotta con densità di potenza dello spettro diretto incidente $740,0 \pm 10,6 \frac{W}{m^2}$. A causa dell'accettanza di circa 35° determinata dallo schermo montato sulla termopila, sono stati caratterizzati solo $0,337 m^2$ del settore parabolico, la cui area totale è invece di $0,818 m^2$. E' quindi plausibile che nelle stesse condizioni operative della misura 3 e con settore parabolico intero, la potenza misurabile nello spot sia circa $235 \cdot \frac{0,818}{0,337} = 570 W$. Allo stesso modo ci si attende che la densità di potenza raggiunga nella zona centrale dello spot valori superiori ai $50 W/cm^2$, valori per cui le celle *C1MJ* della *SPECTROLAB* hanno efficienza nominale prossima a 0,37. Per quanto riguarda lo spettro incidente, è invece lecito attendersi che le potenze misurate abbiano un andamento proporzionale con la densità di potenza incidente. E' dunque opportuno definire un rapporto di concentrazione locale C_{XY} che esprime il rapporto tra le densità di potenza dello spettro incidente rispetto ai valori misurati con la termopila nella superficie 'analizzata'.

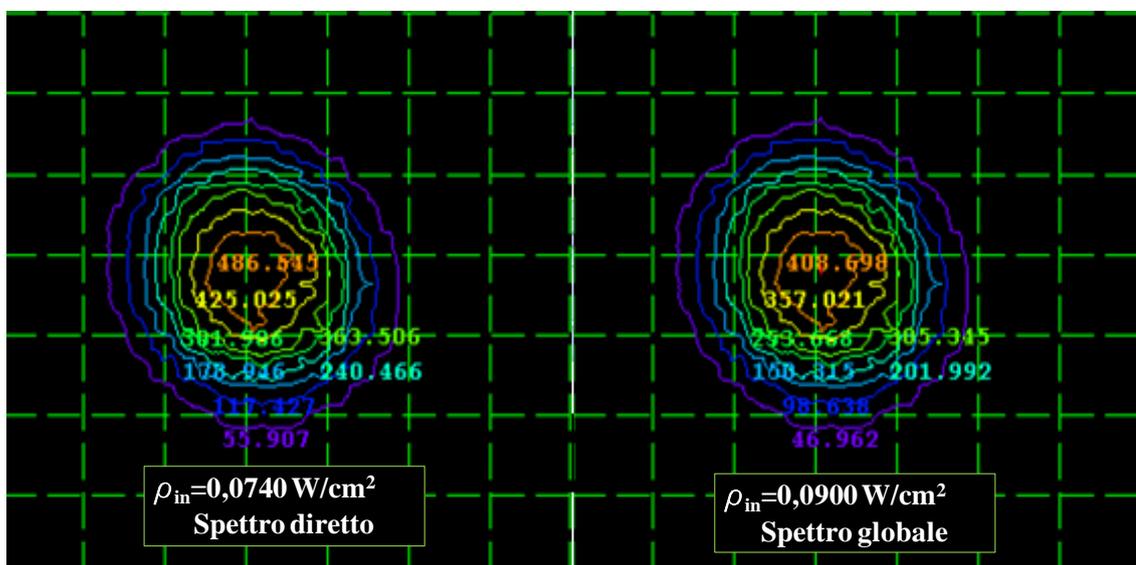


Figura 2.17 Spot relativo alla misura 3 (Figura 2.15.) espresso in termini della concentrazione locale C_{XY} calcolata rispetto alla densità di potenza incidente della radiazione globale ($0,0900 W/cm^2$) e rispetto alla densità di potenza dello spettro diretto ($0,0740 W/cm^2$)

Poiché, l'errore sulla densità di potenza dello spettro incidente è del 2% e quello di densità di potenza nello spot è dell'1% si ottiene che:

$$\text{eq. 2.16} \quad C_{XY} = \frac{\rho_{XY}}{\rho_{in}} \pm 0,03 \frac{\rho_{XY}}{\rho_{in}}$$

in cui ρ_{in} è la densità di potenza per unità di superficie dello spettro incidente mentre ρ_{XY} è il valore di densità di potenza per unità di superficie misurato con la termopila nel punto di coordinate X, Y nello spot (la ρ_{XY} è il valor medio della densità di potenza in un cerchio di diametro 3 mm centrato nel punto X, Y , quindi differisce dalla $\sigma(x, y)$ introdotta con l'eq.2.9 che invece è la densità di potenza). In Figura 2.17 è riportato l'andamento della concentrazione locale C_{XY} , calcolato per lo spot relativo alla misura 3 (vedi Figura 2.15), per $\rho_{in} = 0,0900 \text{ W/cm}^2$ e per $\rho_{in} = 0,0760 \text{ W/cm}^2$, rispettivamente, densità di potenza incidente dello spettro globale e di quello diretto. I valori della concentrazione locale C_{XY} , calcolati rispetto alla densità di potenza dello spettro diretto saranno utilizzati nel capitolo 5 per la stima dell'efficienza del concentratore, in quanto si andranno a considerare situazioni di illuminazione differenti rispetto a quella relativa alla misura 3.

Infine, considerando che il settore parabolico è stato realizzato nel giugno 2007, i test effettuati, sono serviti al duplice scopo:

1. di confermare che la procedura brevettata dal gruppo *I. d. E. A.* (vedi paragrafo 2.2.2) conferisce allo specchio la curvatura parabolica voluta (più precisamente, fin'ora possiamo dire che la superficie di $0,337 \text{ m}^2$ caratterizzata ha prodotto valori congruenti con quelli attesi per una superficie parabolica).
2. che la curvatura permane anche dopo 2 anni dalla fabbricazione, periodo durante il quale il settore parabolico è stato all'aperto, esposto alle condizioni climatiche più varie (ad esempio l'escursione termica, a Povo di Trento, nel periodo interessato è stata tra i -10° C e i $+40^\circ \text{ C}$).

Capitolo 3

Trasferimento di Potenza al Carico

3.1 Introduzione

Idealmente è possibile costruire un array di celle identiche caratterizzate dalla medesima curva IV e porle nelle stesse condizioni di lavoro, ovvero stessa illuminazione, temperatura ecc.

In questa situazione, da un array di celle connesse in serie o parallelo o connesso in ‘opportune combinazioni serie/parallelo’ è possibile trasferire tutta la potenza fotogenerata al carico, cioè non esistono problemi di matching né tra le celle né tra le celle e il carico.

Per spiegare brevemente quanto detto è sufficiente pensare ad un parallelo di N celle, con identica curva IV , connesse in parallelo al carico. Scelto il carico, la tensione V ai capi delle celle determina una corrente $I(V)$ uguale per ogni cella. Scegliendo il carico in modo che $V = V_{MPP}$ ogni cella si trova nel proprio punto di massima potenza (MPP). Nel caso reale è invece sufficiente che una sola curva IV non sia uguale alle altre che, in generale, non è possibile scegliere un V che sia il V_{MPP} per tutte le celle. Dunque almeno una cella non si trova nel proprio MPP e parte della potenza fotogenerata non è trasferita sul carico.

Lo stesso discorso può essere fatto per N celle connesse in serie e in generale per opportune connessioni serie/parallelo.

Analizzando il problema analiticamente, ogni connessione elettrica dell’array e del carico rappresenta un vincolo. Ad esempio nel caso descritto di N celle in parallelo ci sono:

1. N vincoli: $V_{Ci} = V \quad \forall i$, in quanto le celle sono in parallelo;
2. N vincoli: $I_{Ci} = I_i(V_{Ci}) \quad \forall i$, in quanto ogni cella ha la propria caratteristica IV ;
3. 1 vincolo che dipende dal carico, che supponiamo essere una resistenza: $V = R \sum_i I_i$

dove V_{Ci} e I_{Ci} sono tensione e corrispondente corrente della cella i – esima.

Di fatto dunque, non è possibile scegliere il punto di lavoro di ogni cella ma questo è determinato a priori dalle condizioni operative cui ciascuna cella è sottoposta (connessioni, radiazione luminosa, temperatura ecc.).

In questo capitolo si affronta il problema del trasferimento di potenza al carico in condizioni operative reali e si propone una soluzione che si avvale dell’utilizzo di dc_dc converter. Lo scopo,

come verrà illustrato in seguito, è di ridurre i vincoli tra le celle e quindi poter ‘scegliere’ il punto (V, I) di ogni cella.

A tal fine è opportuno definire l’efficienza di trasferimento di potenza al carico. Se $P_{MAX} = \sum_{i=1}^N V_{MPPi} \cdot i_{MPPi}$ è la potenza massima che le celle potrebbero fornire lavorando tutte nel proprio *MPP*, per efficienza di trasferimento, ε_T , si intende il rapporto tra la potenza netta effettivamente estraibile P_N (calcolata tenendo conto che i dc_dc converter non hanno efficienza unitaria) e P_{MAX} :

$$eq. 3.1 \quad \varepsilon_T = \frac{P_N}{P_{MAX}}$$

E’ opportuno far notare che, commercialmente, ha indubbiamente più significato l’efficienza finale ε riferita alla radiazione solare incidente. ε è il prodotto tra l’efficienza di trasferimento di potenza ε_T e l’efficienza delle celle ε_{MAX} :

$$eq. 3.2 \quad \varepsilon = \varepsilon_T \cdot \varepsilon_{MAX}$$

dove ε_{MAX} è il rapporto tra la massima potenza che possono fornire le celle (inserite nell’array, ma scollegate tra loro e ciascuna nel proprio *MPP*) rispetto alla potenza solare incidente, in determinate condizioni operative:

$$eq. 3.3 \quad \varepsilon_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{P_{SOLARE}}$$

Il valore di ε_{MAX} dipende quindi dalle caratteristiche tecniche delle celle utilizzate, che nel nostro caso sono celle multi giunzione *CMJ100* della *SPECTROLAB*, e dalle condizioni operative. Chi realizza il concentratore non può far nulla per quanto riguarda le caratteristiche tecniche delle celle, ma può invece far in modo che le condizioni operative siano le migliori auspicabili. Ad esempio ε_{MAX} dipende:

1. dalla temperatura delle celle,
2. dall’intensità della radiazione luminosa incidente,
3. dalla percentuale di radiazione luminosa intercettata dal materiale fotovoltaico.

Il problema della dissipazione del calore dalle celle è l’argomento del prossimo capitolo e nello stesso capitolo si tratta anche il punto 3, in quanto la percentuale di radiazione luminosa intercettata dall’array è un problema puramente meccanico legato alla struttura delle celle fotovoltaiche e alla realizzazione del dissipatore che le ospita. Infatti il contatto ‘-’ è situato sul ‘top’, dunque parte dello spazio investito dalla radiazione deve essere necessariamente utilizzato per i contatti e non può essere coperto da superficie fotovoltaica.

L'equazione 3.2 mostra infine che, almeno in linea teorica, i problemi legati al trasferimento di potenza sono indipendenti dagli altri fattori citati e possono essere studiati separatamente. Concludendo è opportuno sottolineare che, comunque, per ottimizzare l'efficienza di trasferimento di un array di celle è senza dubbio opportuno selezionare le celle utilizzate in base ai parametri che le caratterizzano (15).

3.2 Utilizzo di generatori di corrente.

L'utilizzo di dc_ac e dc_dc converter per il trasferimento di potenza alla rete è già stato realizzato nel caso di cascate (stringhe) di pannelli fotovoltaici piani (*FPPV*). Ad esempio, connessioni comuni sono: una stringa di *PV* connessi alla rete da un dc_ac converter oppure ogni *FPPV* connesso alla rete singolarmente attraverso un dc_ac converter. Walker e Sernia (16) hanno già proposto una configurazione vantaggiosa che prevede la connessione parallela di un dc_dc converter per ogni *FPPV* appartenente alla stringa. Nell'articolo tuttavia non si fa un'analisi quantitativa dei vantaggi che questa configurazione comporta.

In ogni caso è naturale pensare che gli stessi vantaggi debbano risultare anche nel caso di un singolo array di celle fotovoltaiche in cui la cella è l'equivalente del singolo *FPPV* e l'array può essere visto come la stringa di *FPPV*. Non esistono, a nostra conoscenza, applicazioni o calcoli riguardanti l'effetto sull'efficienza di trasferimento, ε_T , di connessioni tra singole celle e dc_dc converter .

Di seguito saranno illustrate 3 tipologie di adattamento array-carico :

1. connessioni serie/parallelo classiche
2. utilizzo dei dc_dc converter per l'adattamento di ogni singola cella al carico (1° tipo)
3. utilizzo dei dc_dc converter come generatori di corrente nelle connessioni serie/parallelo e adattamento al carico (2° tipo)

La prima configurazione è quella utilizzata normalmente nella realizzazione dei *FPPV* commerciali, mentre le configurazioni 2 e 3 sono 2 soluzioni proposte in questa tesi.

3.2.1 Connessioni serie/parallelo classiche

Le connessioni classiche serie, parallelo o combinazioni serie-parallelo sono quelle utilizzate normalmente nella costruzione dei pannelli fotovoltaici. In questi tipi di connessioni esistono solo collegamenti tra celle o eventualmente collegamenti in parallelo con diodi di by-pass che hanno il compito di fare da ponte per l'eventuale corrente inversa che può scorrere nel ramo di circuito. Normalmente le celle utilizzate per realizzare il *FPPV* classico sono celle scelte in modo che

possano essere considerate celle identiche. Questo comporta che, con un semplice dispositivo di matching con il carico (talvolta neppure utilizzato) e nell'ipotesi che tutte le celle siano nella medesima condizione operativa si possa approssimativamente fornire al carico tutta la potenza fotogenerata dal *FPPV*. Lavorando con sistemi in concentrazione nessuna delle 2 assunzioni (celle identiche e nelle stesse condizioni operative) è scontata e quindi è necessario pensare a connessioni particolari che permettano un buon trasferimento di potenza al carico pur lavorando con celle in condizioni operative differenti.

3.2.2 Utilizzo dei dc_dc converter per l'adattamento di ogni singola cella al carico (1° tipo)

In questa configurazione è previsto l'utilizzo di un dc_dc converter per cella. A differenza della configurazione di 2° tipo che sarà affrontata nel prossimo paragrafo, ogni cella è in questo caso connessa all'ingresso del dc_dc converter.

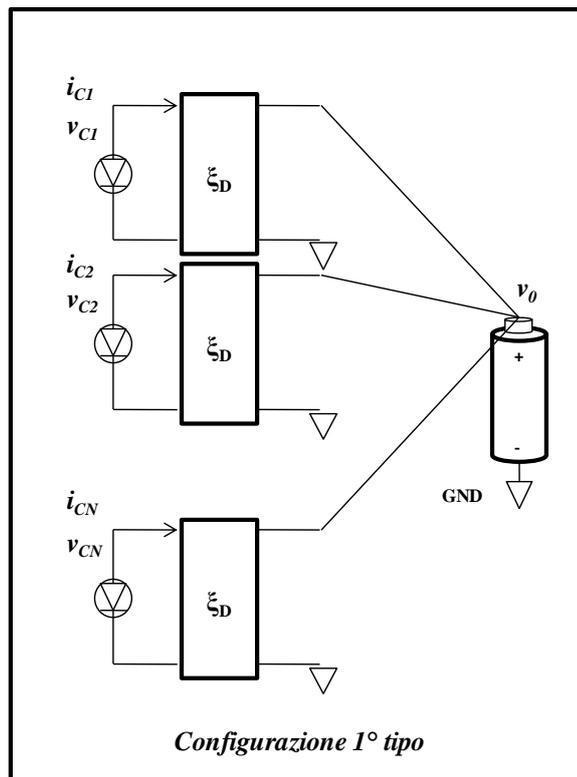


Figura 3.1 Schema a blocchi del circuito di adattamento di ogni cella al carico di 1° tipo.

Il dc_dc converter trasferisce al carico con un'efficienza ε_D , la potenza P_{Ci} erogata dalla cella i – esima. Il circuito per N celle è mostrato in Figura 3.1.

Se per la i – esima cella, $P_{Mci} = V_{MPPci} \cdot i_{MPPci}$ corrisponde alla massima potenza, allora, affinché sia massima la potenza netta, trasferita sul carico, la P_{Ci} in ingresso all' i – esimo dc_dc converter deve essere $P_{Ci} = P_{Mi}$.

Per la singola cella, definiamo la potenza netta P_{Ni} , come la potenza trasferita al carico dalla cella attraverso il dc_dc converter ad essa connesso meno la potenza dissipata nel i – esimo dc_dc converter. Per N celle si ottiene:

$$eq. 3.4 \quad P_N = \varepsilon_D \sum_{i=1}^N V_{MPPci} \cdot i_{MPPci}$$

Cioè la potenza massima totale ottenibile è sempre scalata di un fattore ε_D e dunque l'efficienza del trasferimento di potenza è:

$$eq. 3.5 \quad \varepsilon_T = \frac{\varepsilon_D \sum_{i=1}^N V_{MPPci} \cdot i_{MPPci}}{\sum_{i=1}^N V_{MPPci} \cdot i_{MPPci}} = \varepsilon_D$$

L'efficienza complessiva è dunque quella dei dc_dc converter utilizzati. Nel limite teorico in cui tale efficienza sia 1 è possibile trasferire tutta la potenza generata dall'array al carico.

PRODUTTORE	MODELLO	Vin	Vout	ε
EMERSON	BXA40-4852V9-SMJ	36-75 V	2,9 V(6,9 A)	77%
MURATA	LSN2-T/30-D12-C	6-14 V	0,8-5V (MAX 30 A)	93%
ARCH	NI20-5-2.5S	4,5-5 V	2,5 V(8 A)	89%
ARCH	ST20-24-2.5S	24 V	2,5 V(5 A)	83%
ARCH	NI20-5.335S	4,5-5 V	3,3 V(8 A)	91%
VICOR	VE-JWY-EY	24 V	3,3 V(12 A)	78-88%

Figura 3.2 Tabella di efficienze di alcuni moduli commerciali di dc_dc converter. Il dc_dc converter utilizzato in laboratorio è il VICOR VE-JWY-EY.

E' da osservare che nella configurazione di 1° tipo non esistono vincoli di tensione e corrente fra le celle o con il carico ed è questo il motivo per cui è possibile ottenere un'efficienza di trasferimento, nota a priori, pari a quella dei dc_dc converter utilizzati.

E' opportuno notare che per arrivare a questo risultato sono state implicitamente accettate le seguenti ipotesi:

- esiste la possibilità di controllare la tensione e la corrente d'ingresso ad ogni dc_dc converter (ad esempio con un *MPPT*, maximum power point tracker).
- l'uscita dei dc_dc converter è regolabile ad un certo valore V_0 , e la loro efficienza non dipende da P_{out} ma è costante.
- il dc_dc converter è realizzato per lavorare ad una tensione di ingresso V_{in} prossima alla tensione V_{MPP} del tipo di cella impiegata
- la tensione sul carico è fissa al valore V_0 , ma la corrente assorbita dal carico può essere qualunque.

Per quanto riguarda il punto b., la curva dell'efficienza di un dc_dc converter reale in funzione della potenza in uscita P_{out} non è costante. La Figura 3.3 è stata ricavata caratterizzando il dc_dc converter *VICOR*. Si osserva che solo per $P_{out} > 2\text{ W}$ l'efficienza è circa costante e vale ~ 0.65 .

Le curve sono state ricavate per tensioni di uscita $V_{out} \sim 2.5 \div 3\text{ V}$, in quanto abbiamo utilizzato i dc_dc converter in configurazione di 2° tipo (configurazione che sarà discussa nel paragrafo 3.2.3) che necessita $V_{out} = V_{MPPci}$ ($\sim 2.5 \div 3\text{ V}$ per celle *SPECTROLAB*). Il *VICOR* non può essere usato per configurazioni di 1° tipo in quanto la tensione in ingresso deve essere 24 V , mentre, come visto, per la configurazione di 1° tipo $V_{in} = V_{MPPci}$ ($\sim 3\text{ V}$ per celle *SPECTROLAB*).

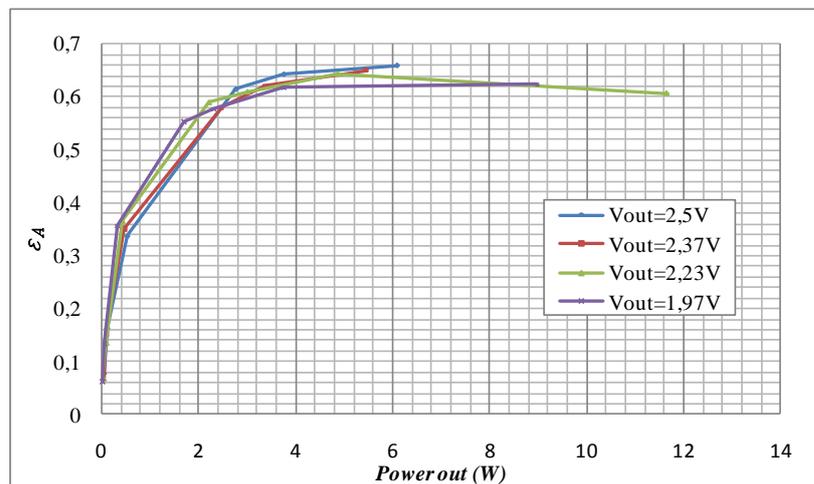


Figura 3.3 Caratterizzazione del dc_dc converter della *VICOR* a diverse tensioni di uscita V_{out} in funzione della potenza in uscita dal dc_dc converter; alimentazione 24 V .

In ogni caso l'efficienza del dc_dc converter non risulta compatibile con i valori forniti dai datasheet (vedi tabella in Figura 3.2), e questo dipende dal fatto che le nostre condizioni di test (i V_{out} e le P_{out} in Figura 3.3) non sono quelle per cui il dispositivo è stato realizzato e caratterizzato dal produttore

($V_{out} = 3,3 V$ $P_{out} \sim 10 W$). In Figura 3.2 sono riportati altri dc_dc converter caratterizzati da alti valori di efficienze, alcuni operanti nel range di V_{in} di interesse per realizzare configurazioni di 1° tipo, altri operanti nel range di V_{out} per configurazioni di 2° tipo (paragrafo 3.2.3).

Infine per quanto riguarda il punto c., premettendo che i problemi di carica o scarica della batteria non sono lo scopo di questa tesi, si può considerare il carico come una collezione di batterie (connesse ad esempio in parallelo). Un carico di questo tipo, opportunamente dimensionato, può effettivamente assorbire una qualunque corrente in un range di tensioni prossimo a V_0 e l'errore sulla tensione è trascurabile ai fini dei nostri calcoli. Sostanzialmente l'ipotesi implicita è quella che le batterie abbiano sempre la capacità di assorbire la potenza richiesta (non siano mai cariche).

3.2.3 Utilizzo dei dc_dc converter nelle connessioni di adattamento al carico (2° tipo)

Il circuito proposto è rappresentato in Figura 3.4. A ciascuna delle N celle, connesse in serie tra loro sono connessi in parallelo N generatori di corrente, A_i (operativamente sono dc_dc converter la cui tensione d'uscita può essere impostata in remoto).

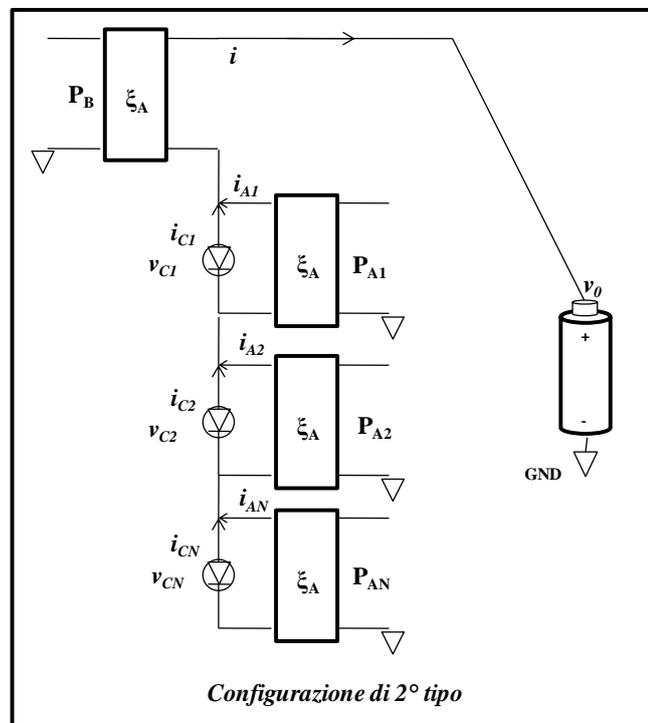


Figura 3.4 Schema della connessione di 2° tipo. Ogni dc_dc converter è connesso in parallelo alla cella. Il dc_dc converter B adatta il circuito al carico settando la tensione V_0

Inoltre è presente un generatore di tensione B che permette di variare la tensione di uscita sul carico V_0 , in funzione della capacità del carico di assorbire la potenza $P_0 = V_0 \cdot i$ fornita dal circuito.

Per il calcolo dell'efficienza di trasferimento, si procede massimizzando la potenza netta P_N definita nel paragrafo precedente. Dunque alla potenza totale sul carico P_0 si sottrae la potenza dissipata dai dc_dc converter. L'equazione è la seguente:

$$eq. 3.6 \quad P_N = \sum_i^N P_{Ci} - \sum_i^N P_{Ai}(1 - \varepsilon_A) - P_B(1 - \varepsilon_A)$$

In cui P_{Ci} è la potenza erogata dalla cella i -esima, $\varepsilon_A \cdot P_{Ai}$ è la potenza fornita al carico dal generatore posto in parallelo alla i -esima cella, P_{Ai} è la potenza in ingresso allo stesso, mentre ε_A è l'efficienza dei dc_dc converter che si suppone uguale per tutti. Infine B è il dc_dc converter utilizzato per regolare la tensione V_0 sul carico. Gli N 'sottoelementi', cella-dc_dc converter, sono connessi in serie tra loro e dunque sono percorsi dalla stessa corrente i . La potenza fornita al carico da ogni alimentatore è allora:

$$eq. 3.7 \quad P_{Ai} \cdot \varepsilon_A = V_{Ci} \cdot (i - i_{Ci})$$

dove V_{Ci} è la tensione ai capi dell' i -esimo sottoelemento, mentre i_{Ci} è la corrente della cella a quella particolare tensione. Infine la potenza fornita al carico dall'alimentatore B è:

$$eq. 3.8 \quad P_B \cdot \varepsilon_A = (V_0 - \sum_i^N V_{Ci}) \cdot i$$

Inserendo nell'eq.3.6, della potenza netta, quanto ricavato sopra, si ottiene:

$$eq. 3.9 \quad P_N = \frac{\sum_i^N P_{Ci}}{\varepsilon_A} - \frac{(1-\varepsilon_A)}{\varepsilon_A} i V_0$$

L' eq.3.9 suggerisce che, se $\sum_i^N P_{Ci} \neq \sum_i^N P_{Ci} (i)^6$ allora è possibile diminuire la corrente i nel circuito lasciando invariato il 1° termine dell'eq.3.9 facendo in modo che il 2° termine sottragga meno potenza alla P_N determinandone un incremento. Per la connessione di 2° tipo, l'efficienza di trasferimento al carico ε_T , definita con l'equazione eq.3.1 è:

$$eq. 3.10 \quad \varepsilon_T = \frac{P_N}{P_{MAX}} = \frac{\sum_i^N P_{Ci} - (1-\varepsilon_A)i V_0}{P_{MAX} \cdot \varepsilon_A}$$

Anche in questo caso, inoltre, nel limite teorico in cui l'efficienza dei dc_dc converter sia $\varepsilon_A = 1$, si ottiene che l'efficienza di trasferimento è unitaria. Il calcolo è stato eseguito per N celle connesse in

⁶ La tensione ai capi delle celle e quindi anche le potenza delle celle, non dipendono dalla corrente che circola nel circuito. Questo può accadere se il dc_dc converter in parallelo alla cella è in grado di fornire l'eccesso di corrente richiesta dal circuito

serie, ma ad un analogo risultato si arriva se le celle sono connesse in parallelo. Nel paragrafo successivo si ricava un metodo operativo per massimizzare la potenza netta P_N e dunque l'efficienza di trasferimento ε_T .

3.2.4 Procedura di massimizzazione di ε_T nella connessione di 2° tipo

Questo paragrafo presuppone:

- che sia stato realizzato l'array di N celle, connesse in serie fra loro e ognuna in parallelo rispetto ad un dc_dc converter programmabile in remoto.
- che si conosca la curva IV di ogni cella nella situazione operativa.
- che si disponga di un carico in grado di assorbire una qualunque corrente ad una tensione prossima a V_0 .

I punti a e b sono ripresi nei paragrafi 3.4 e successivi. in cui è descritta la strumentazione realizzata, mentre il punto c è stato discusso nel paragrafo 3.2.2. Inoltre è da tenere presente che per 'imporre' alle celle una tensione V , si intende fare in modo che il dc_dc converter ad essa connesso mantenga in uscita tale tensione e che la corrente di cella sia dunque $I(V)$. I test effettuati, che assicurano la realizzabilità di queste ipotesi sono descritti nel paragrafo 3.4.2. Per trovare una procedura operativa di ricerca del punto di massima efficienza, si suppone di impostare inizialmente ogni i - esimo dc_dc converter alla tensione di massima potenza, V_{MPPi} della i - esima cella, inoltre si suppone che la tensione di uscita sul carico V_0 sia determinata dal carico. Ogni cella si trova nel proprio MPP e quindi la corrente minima nel circuito è $i = \max\{i_{MPPci}\}$. Si ricorda che per ogni cella per cui $i_{MPPci} < \max\{i_{MPPci}\}$, la differenza di corrente rispetto a quella richiesta dal circuito (che è $i = \max\{i_{MPPci}\}$) è fornita dai dc_dc converter connesso in parallelo ad essa.

Per procedere nell'analisi è opportuno riscrivere l'eq.3.9 come segue

$$eq. 3.11 \quad P_N = \frac{\sum_i^M P_{Ci}}{\varepsilon_A} + \frac{\sum_{i=M}^N V_{Ci} \cdot i}{\varepsilon_A} - \frac{(1-\varepsilon_A)}{\varepsilon_A} i V_0$$

Nell'eq.3.11 sono state evidenziate $(N - M)$ celle per le quali si suppone che la corrente fotogenerata nel proprio MPP corrisponde alla corrente che scorre nel circuito. Naturalmente per queste celle la potenza dissipata dai dc_dc converter è nulla in quanto esse stesse provvedono a fornire tutta la corrente. Per le altre M celle $i'_{MPPci} < i$ e quindi i dc_dc converter devono aggiungere la differenza di corrente.

Per prima cosa è opportuno notare che

- a. una qualunque variazione del punto di lavoro di una o più delle M celle ($i'_{MPPci} < i$) comporta una diminuzione della potenza netta. Infatti comunque si agisca, il risultato è di spostare la cella o le celle dal loro MPP decrementando il 1° termine dell'eq.3.11 e lasciando invariati gli altri.

Invece, una variazione del punto di lavoro di una delle $(N - M)$ celle con $i_{MPPci} = i$ comporta:

- b. un calo della potenza netta se si impone ai capi un nuovo $V'_{Ci} < V_{MPPci}$, tale che $I'_{Ci}(V'_{Ci}) = i' > i$. Infatti il 1° termine dell'eq.3.11 resta invariato, il 2° termine cala in quanto la cella non è più nel suo MPP mentre il 3° termine tende ad abbassare P_N in quanto $i' > i$.
- c. un calo della potenza netta se si impone ai capi un nuovo $V'_{Ci} > V_{MPPci}$, tale che $I'_{Ci}(V'_{Ci}) = i' < i$. Infatti il 1° termine dell'eq.3.11 resta invariato, il 2° termine cala in quanto la cella non è più nel suo MPP mentre il 3° resta invariato essendo invariata la corrente i nel circuito

Per le considerazioni b e c si è semplicemente assunto che la curva $I(V)$ di ogni cella sia una funzione monotona decrescente rispetto a V . Agendo sulle M celle o sulla singola cella appartenente alle $(N - M)$ celle, non è quindi possibile incrementare la potenza netta e dunque l'efficienza di trasferimento. L' alternativa è quindi quella di modificare contemporaneamente i punti di lavoro di tutte le $(N - M)$ celle. In particolare dalle osservazioni precedenti si deduce che le $(N - M)$ celle dovranno comunque fornire la stessa corrente o si ricade nei casi già visti, mentre nessun vincolo esiste per i V_{Ci} se non quello che la somma delle tensioni di tutte le N celle deve essere minore o uguale di V_0 .

Aumentando i V_{Ci} delle $(N - M)$ celle la nuova corrente di circuito è $i' < i$, quindi :

- d. Il 1° termine dell'eq.3.11 non cambia e l'incremento o il decremento di P_N è determinato dalla differenza tra il 2° e il 3° termine. Tale differenza non è calcolabile a priori come sopra per i casi esaminati; in ogni caso si osserva che il 3° termine sottrae meno potenza alla P_N , mentre il 2° termine diminuisce in quanto si spostano le $(N - M)$ dal proprio MPP .

Il discorso fatto evidenzia che partendo dalla configurazione iniziale in cui tutte le celle sono nel proprio MPP , l'unico incremento di potenza netta e dunque di efficienza di trasferimento è ottenibile operando come al punto d.

In altre parole, il massimo della funzione P_N , si trova lungo la curva $\gamma = (i_{(N-M)}, V_{MPP_Mci})$ dove V_{MPP_Mci} indica che le M celle sono nel proprio MPP e $i_{(N-M)}$ è la corrente determinata dalle $(N - M)$ celle, ottenuta aumentando i V_{Ci} delle $(N - M)$ celle rispetto ai rispettivi valori V_{MPP} . La scelta dei V_{Ci} delle $(N - M)$ celle (che sono diversi), deve fare in modo che le i_{Ci} delle $(N - M)$ celle coincidono e $i_{Ci} = i_{(N-M)}$. Utilizzando l'eq.3.11 e conoscendo le curve IV nelle condizioni

operative è possibile calcolare numericamente P_N lungo γ , trovare il punto di massimo e quindi mettere l'array in condizioni operative ottimali.

3.2.5 Sintesi matematica

Quanto detto fin'ora si ricava matematicamente osservando che il massimo della potenza netta P_N si trova nel punto in cui il gradiente rispetto alle variabili indipendenti $\{V_{Ci}, i\}$ si annulla quindi:

$$eq. 3.12 \quad grad(P_N) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{dP_{Ci}}{\varepsilon_A dV_{Ci}} = 0 & \forall i t.c i_{Ci} < i \\ \sum_{i=M}^N \frac{dP_{Ci}}{di} = (1 - \varepsilon_A) V_0 & \forall i t.c i_{Ci} = i \end{cases}$$

Il primo termine è riferito alle M celle e tiene conto che i V_{Ci} di tali celle sono indipendenti dalla corrente di circuito in quanto $I'_{Ci}(V'_{Ci}) = i' < i$. Il secondo termine invece tiene conto che per le restanti $(N - M)$ celle, essendo $V_{Ci} = V_{Ci}(i)$ la tensione delle celle dipende da i che è di fatto la variabile indipendente. Il numero di variabili indipendenti è dunque $M + 1$.

E' da notare che il massimo di P_N calcolato nel paragrafo precedente soddisfa entrambe le relazioni infatti:

1. essendo le M celle nel proprio MPP vale $\frac{dP_{Ci}}{\varepsilon_A dV_{Ci}} = 0$.
2. per le restanti $(N - M)$, celle si osserva che la richiesta $\sum_{i=M}^N \frac{dP_{Ci}}{di} = (1 - \varepsilon_A) V_0$, significa massimizzare la differenza tra il 2° e 3° termine dell'eq.3.11 come discusso nel punto d. del paragrafo precedente.

3.3 Confronto fra i 2 tipi di connessioni proposte

Per concludere l'analisi si confrontano i 2 tipi di connessioni e le efficienze di trasferimento di potenza ε_T per i rispettivi casi. Per far questo si suppone di avere a disposizione un array di N celle e di confrontare i risultati ottenibili con una o l'altra configurazione proposta.

Come già visto nel paragrafo 3.2.2 se si connettono le celle con la configurazione di 1° tipo l'efficienza di trasferimento è sempre $\varepsilon_T = \varepsilon_A$ dove ε_A è l'efficienza dei dc_dc converter utilizzati.

Invece, per la connessione di 2° tipo, l'efficienza di trasferimento ε_T dipende dalle condizioni operative, cioè temperatura delle celle, dalla disomogeneità della radiazione nello spot, dall'intensità della radiazione incidente ecc.

Si supponga quindi di aver realizzato il concentratore e, testandolo in varie condizioni operative (praticamente significa: in giorni differenti, cambiando il flusso di liquido refrigerante nel dissipatore termico, perfezionando il puntamento ecc.), si trovi che in certe condizioni, che chiameremo ottimali e denotiamo con $*$, è massimizzata l'efficienza di trasferimento ε_T^* che è quella ottenuta imponendo alle celle di lavorare nei propri MPP^* ⁷:

$$eq. 3.13 \quad \varepsilon_T^* = \frac{1}{\varepsilon_A} - \frac{V_0 \cdot i^* (1 - \varepsilon_A)}{\varepsilon_A \cdot P_{MAX}^*}$$

in cui $P_{MAX}^* = \sum_{i=1}^N V_{MPPi}^* \cdot i_{MPPi}^*$ è la massima potenza che le celle potrebbero fornire nelle condizioni operative ottimali $*$ e $i^* = \text{Max}\{i_{MPPi}^*\}$ ⁸. Poiché le condizioni ottimali $*$ sono quelle che massimizzano ε_T^* , dall'eq.3.13 si deduce che le condizioni ottimali $*$ sono anche quelle in cui è minimo il rapporto $\frac{i^*}{P_{MAX}^*}$.

Di seguito si dimostra che se $\varepsilon_T^* > \varepsilon_A$, allora, almeno in un preciso range di scostamento delle condizioni operative da quelle ottimali $*$, è conveniente utilizzare la configurazione di 2° tipo piuttosto che quella di 1° tipo.

ε_T^* è l'efficienza in condizioni ottimali, che per ipotesi è massima, quindi un cambio di condizioni operative determina necessariamente un calo dell'efficienza di trasferimento $\varepsilon_T'^* \leq \varepsilon_T^*$, dove, con $\varepsilon_T'^*$ si è indicata la nuova efficienza di trasferimento nelle nuove condizioni operative che denotiamo con $'*$. In questo caso $\varepsilon_T'^*$ si ottiene imponendo alle celle di lavorare nei nuovi MPP'^* con la nuova corrente di circuito $i'^* = \text{Max}\{i_{MPPi}^{\prime*}\}$, e vale:

$$eq. 3.14 \quad \varepsilon_T'^* = \frac{1}{\varepsilon_A} - \frac{V_0 \cdot i'^* (1 - \varepsilon_A)}{\varepsilon_A \cdot P_{MAX}^{\prime*}}$$

in cui $P_{MAX}^{\prime*} = \sum_{i=1}^N V_{MPPi}^{\prime*} \cdot i_{MPPi}^{\prime*}$ è la massima potenza che le celle potrebbero fornire lavorando ciascuna nei nuovi MPP'^* , determinati dalle nuove condizioni operative. Dall'eq.3.14 e per il fatto che $\varepsilon_T'^* \leq \varepsilon_T^*$, si ricava:

$$eq. 3.15 \quad \frac{i'^*}{P_{MAX}^{\prime*}} \geq \frac{i^*}{P_{MAX}^*}$$

e quindi, in generale scriviamo:

⁷ Nota: dallo studio effettuato nel paragrafo 3.2.4, punto d, risulta che il valore di efficienza ottenibile conoscendo le curve IV delle celle che compongono l'array, può essere maggiore dell'efficienza di trasferimento ottenuta imponendo alle celle il proprio MPP

⁸ è la minor corrente di circuito con la quale risulta possibile imporre a tutte le celle il proprio MPP^* .

$$eq. 3.16 \quad \frac{i'^*}{P'_{MAX}} = \frac{1}{K} \cdot \frac{i^*}{P_{MAX}}$$

con $K < 1$. Il numero K rappresenta lo ‘scostamento’ tra le condizioni ottimali e quelle operative. La convenienza nell’usare la connessione di 2° tipo rispetto a quella di 1° tipo si ha fintanto che $\varepsilon'_T \geq \varepsilon_A$, infatti, ε_A , che è l’efficienza dei dc_dc converter utilizzati, corrisponde anche all’efficienza di trasferimento della connessione di 1° tipo. Imponendo la precedente disuguaglianza all’eq.3.14 e sostituendo l’eq.3.16 si ottiene:

$$eq. 3.17 \quad K \geq \frac{i^*}{P_{MAX}} \frac{V_0}{(1+\varepsilon_A)}$$

Infine ricavando i^* dall’eq.3.13 si ottiene:

$$eq. 3.18 \quad K \geq \frac{(1-\varepsilon_T^* \cdot \varepsilon_A)}{(1-\varepsilon_A^2)}$$

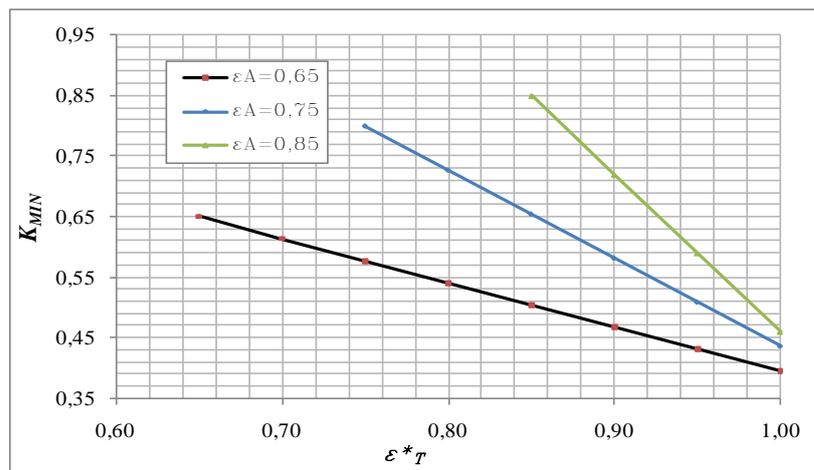


Figura 3.5 Le rette sono ottenute dal plot di K_{MIN} (eq.3.19) e rappresentano il massimo scostamento dalle condizioni ottimali *, entro il quale si verifica $\varepsilon'_T \geq \varepsilon_A$ e quindi la connessione di 2° tipo è ancora vantaggiosa su quella di 1° tipo.

Negli esempi che seguono si mostrerà che più è piccolo il valore di K (al limite K_{MIN}), tanto più il sistema si può discostare dalle condizioni operative ottimali *. K_{MIN} si ottiene dall’eq.3.18 e vale:

$$eq. 3.19 \quad K_{MIN} = \frac{(1-\varepsilon_T^* \cdot \varepsilon_A)}{(1-\varepsilon_A^2)}$$

Il plot di K_{MIN} in funzione di ε_T^* , calcolato per diversi valori di dc_dc converter utilizzati ε_A , è rappresentato in Figura 3.5.

Seguono alcuni esempi, particolari, per capire il significato fisico di K .

3.3.2 Esempi riguardanti il fattore di scostamento K

1° esempio: variazione omogenea della densità di potenza

Supponiamo di avere trovato la massima efficienza di trasferimento ε_T^* associata alla condizione ottimale * e supponiamo che le nuove condizioni operative siano determinate solo da una variazione omogenea della densità di potenza incidente sulle celle, causata ad esempio da annuvolamento o in generale da un calo della densità dello spettro solare diretto incidente, ovvero:

$$eq. 3.20 \quad \rho'_{in} = \rho_{in} \cdot g$$

dove ρ_{in}^* è la densità di spettro diretto incidente con la quale si è trovata ε_T^* , mentre ρ'_{in} è la densità di spettro diretto incidente delle nuove condizioni operative e $g < 1$ per ipotesi (calo di radiazione luminosa). La densità di potenza locale incidente su ogni cella risente solo del termine g , infatti ricordando l'eq.2.16 (equazione con cui si è definita la concentrazione locale sul ricevitore) trattata nel paragrafo 2.3.4 possiamo scrivere la densità di potenza incidente sulla cella $i -esima$, come:

$$eq. 3.21 \quad \rho'_{in} \cdot C_{XiYi} = \rho_{in} \cdot C_{XiYi} \cdot g$$

dove C_{XiYi} è la concentrazione locale nel punto X_i, Y_i del ricevitore nel quale è appunto collocata la cella $i -esima$ ⁹. Per calcolare il fattore di scostamento K legato a questo tipo di cambiamento delle condizioni operative occorre studiare l'eq.3.15, e quindi capire cosa accade alla nuova corrente di circuito i'^* e alla nuova P'_{MAX} quando si verifica il cambiamento di densità di potenza dello spettro incidente. La corrente i'_{MPPi} di ogni cella nel proprio MPP'^* , nelle nuove condizioni operative è data dalla seguente relazione:

$$eq. 3.22 \quad i'_{MPPi} = \frac{\rho'_{in} \cdot C_{XiYi} \cdot \varepsilon(\rho'_{in} \cdot C_{XiYi})}{V'_{MPPi}(\rho'_{in} \cdot C_{XiYi})}$$

dove $\rho'_{in} \cdot C_{XiYi}$ è la densità di potenza incidente sulla cella nelle nuove condizioni operative, mentre $\varepsilon(\rho'_{in} \cdot C_{XiYi})$ e $V'_{MPPi}(\rho'_{in} \cdot C_{XiYi})$ sono rispettivamente l'efficienza della cella e la tensione nel punto MPP'^* , quando la cella è sottoposta alla densità potenza incidente $\rho'_{in} \cdot C_{XiYi}$.

⁹ In questo esempio si assume che la $i -esima$ cella sia quadrata di area A e centrata in X_i, Y_i . Si assume che il valore della concentrazione locale C_{XiYi} definito con l'eq.2.16 sia ottenuto dai dati sperimentali mediati sulla superficie A centrata in X_i, Y_i .

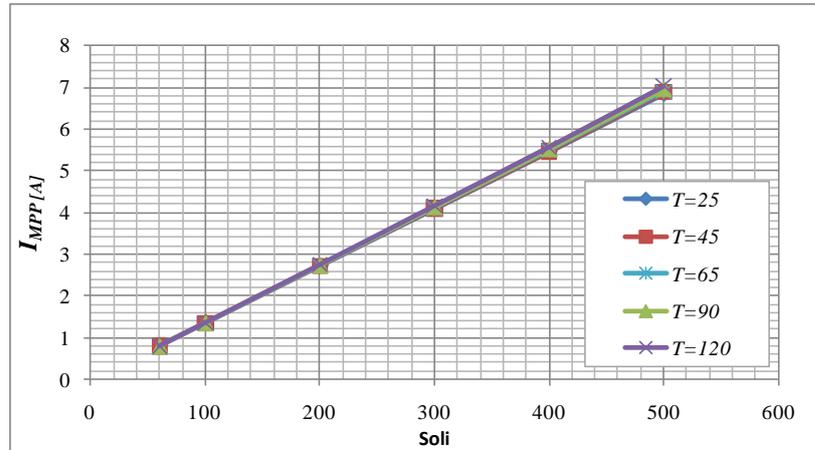


Figura 3.6 Curve della corrente I_{MPP} in funzione del numero di soli incidenti e per varie temperature. La curva è ottenuta a partire dalle curve di efficienza e di tensione nel punto di MPP fornite dalla SPECTROLAB per le celle C1MJ.

Osservando la Figura 3.6, relativa all'andamento delle i_{MPP} , ottenuta dalle curve $\varepsilon(Soli)$ e $V_{MPP}(soli)$, fornite dai datasheet SPECTROLAB, si osserva, che le curve di i_{MPP} calcolate a diversa temperatura e in funzione della concentrazione sono praticamente coincidenti sotto i 500 soli. Si può dunque approssimare dicendo che i_{MPP} è indipendente dalla temperatura (per $25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 125$ e concentrazioni fino a 500 soli)

Un calo g della densità di spettro diretto equivale ad un calo del numero di soli incidenti sulle celle e quindi (vedi Figura 3.6) un calo di tutte le i_{MPP} . La nuova corrente di circuito $i'^* = \text{Max}\{i'_{MPPi}\}$ è quindi minore della corrente di circuito in condizioni ottimali i^* , i' :

$$eq. 3.23 \quad i'^* \leq i^*$$

La i'^* si calcola a partire dalla linearizzazione delle curve i_{MPP} riportate in Figura 3.6:

$$eq. 3.24 \quad i_{MPP} = m \cdot C + q$$

in cui $m = 0,0136$ è la pendenza, C è la concentrazione in soli e $q = 0,039$ è l'intersezione con l'asse y. Valgono dunque le seguenti relazioni:

$$eq. 3.25 \quad i'_{MPPi} = m \cdot C'^* + q$$

$$eq. 3.26 \quad i_{MPPi}^* = m \cdot C^* + q$$

Dalle eq.3.25 ed eq.3.26 e considerando che $C'^* = \frac{\rho_{in}^* \cdot C_{XIVi} \cdot g}{0,1}$ e $C^* = \frac{\rho_{in}^* \cdot C_{XIVi}}{0,1}$ (si è utilizzata la definizione di concentrazione espressa in soli con densità di potenza ρ_{in}^* espressa in W/cm^2), si riesce a ricavare i'_{MPPi} nelle nuove condizioni operative, in funzione di g e della i_{MPPi}^* :

$$eq. 3.27 \quad i'_{MPPi} = i_{MPPi}^* \cdot \left(g + \frac{q}{i_{MPPi}^*} (1 - g) \right)$$

A determinare la corrente di circuito i'^* nelle nuove condizioni operative è la stessa cella che determina i^* in condizioni ottimali *, perché resta comunque la più illuminata. Possiamo dunque riscrivere l'eq.3.27 riferendoci alla cella più illuminata operando le sostituzioni $i_{MPPi}^* = i^*$ e $i'_{MPPi} = i'^*$:

$$eq. 3.28 \quad i'^* = i^* \cdot \left(g + \frac{q}{i^*} (1 - g) \right)$$

Se supponiamo che in condizioni ottimali *, la corrente di circuito $i^* \geq 4 A^{10}$, il rapporto $\frac{q}{i_{MPPi}^*} \leq 10^{-2}$ e l'eq.3.28 può essere semplificata con:

$$eq. 3.29 \quad i'^* = i^* \cdot g$$

Vogliamo ora mettere in relazione $P'_{MAX} = \sum_{i=1}^N V'_{MPPi} \cdot i'_{MPPi}$, con P_{MAX}^* . A tal fine scriviamo P'_{MAX} come somma di tutte le potenze incidenti su ogni cella moltiplicate per l'efficienza della cella stessa nelle nuove condizioni operative:

$$eq. 3.30 \quad P'_{MAX} = \sum_{i=1}^N \rho'_{in} \cdot C_{XiYi} \cdot \varepsilon(\rho'_{in} \cdot C_{XiYi})$$

in cui $\rho'_{in} \cdot C_{XiYi}$ è la densità di potenza incidente sulla i -esima cella nelle nuove condizioni operative. La potenza incidente sulla i -esima cella è data dall'eq.3.21 che sostituiamo nell'eq.3.30.

Inoltre moltiplicando ogni membro della sommatoria nell'eq.3.30, per $1 = \frac{\varepsilon(\rho_{in}^* \cdot C_{XiYi})}{\varepsilon(\rho_{in}^* \cdot C_{XiYi})}$ si ottiene:

$$eq. 3.31 \quad P'_{MAX} = \sum_{i=1}^N \rho_{in}^* \cdot C_{XiYi} \cdot g \cdot \varepsilon(\rho_{in}^* \cdot C_{XiYi}) \cdot h_i$$

con $h_i = \frac{\varepsilon(\rho_{in}^* \cdot C_{XiYi} \cdot g)}{\varepsilon(\rho_{in}^* \cdot C_{XiYi})}$. In Figura 3.7 è riportato l'andamento di h_i in funzione della concentrazione in condizioni ottimali *, espressa in soli, con $g = 0,5$ e spettro incidente di $1000 W/m^2$. Si osserva che $h_i \sim 1$ per ogni temperatura e per ogni concentrazione.

¹⁰ assunzione legittima utilizzando celle spectrolab, caratterizzata da $i_{MPP} \sim 7A$ a 500 soli

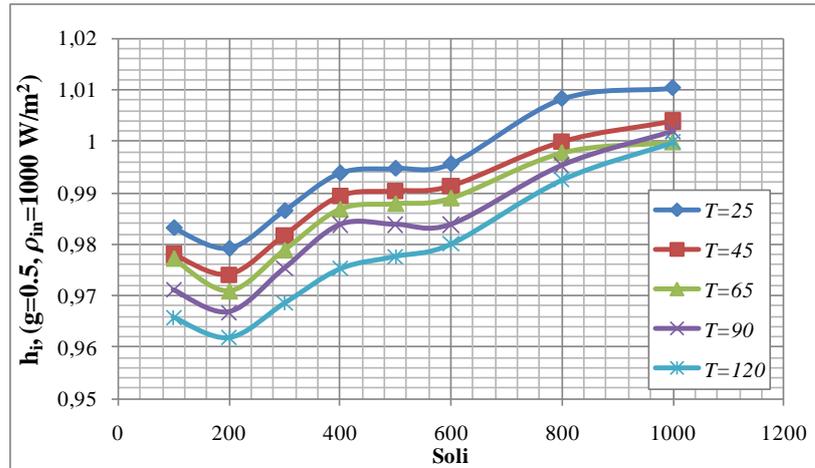


Figura 3.7 Grafico del rapporto $h_i = \frac{\varepsilon(C^* \cdot g)}{\varepsilon(C^*)}$, in cui C^* è la concentrazione in soli ($C^* = \rho_{in}^* \cdot C_{XiYi} / 0,1$). h_i serve per valutare gli effetti sull'efficienza dovuti a cambiamenti omogenei della densità della radiazione incidente tali che la nuova densità sia: $\rho_{in}' = g \cdot \rho_{in}^*$

L'eq.3.31 può dunque essere messa in funzione della P_{MAX}^* , cioè la massima potenza che le celle potrebbero fornire in condizioni ottimali *:

$$eq. 3.32 \quad P'_{MAX} = g \cdot \sum_{i=1}^N \rho_{in}^* \cdot C_{XiYi} \cdot \varepsilon(\rho_{in}^* \cdot C_{XiYi}) \cdot h_i = g \cdot P_{MAX}^* \cdot \langle h \rangle$$

in cui:

$$eq. 3.33 \quad \langle h \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{P_{Mi}^*}{P_{MAX}^*} \cdot h_i$$

con P_{Mi}^* che è la massima potenza che la cella i –esima può fornire in condizioni ottimali *. Si vede che ogni cella contribuisce ad $\langle h \rangle$ con una quantità proporzionale al proprio contributo sulla potenza totale P_{MAX}^* . Dal grafico di Figura 3.7 e dall'eq.3.33, si vede che se le celle in condizioni ottimali *, sono illuminate con concentrazioni comprese tra i 200 e i 500 soli e $g \geq 0,5$, allora si ottiene $0,962 \leq \langle h \rangle \leq 0,995$.

Per concludere siamo in grado di valutare ε_T^* :

$$eq. 3.34 \quad \varepsilon_T^* = \frac{1}{\varepsilon_A} - \frac{V_0 \cdot i^* \cdot (1 - \varepsilon_A)}{\varepsilon_A \cdot P_{MAX}^*}$$

cioè l'efficienza di trasferimento nelle nuove condizioni operative, che riscriviamo sostituendo l'eq.3.32 e l'eq.3.29 nell'eq.3.34:

$$eq. 3.35 \quad \varepsilon_T^* = \frac{1}{\varepsilon_A} - \frac{V_0 \cdot i^* \cdot g (1 - \varepsilon_A)}{\varepsilon_A \cdot g \cdot P_{MAX}^* \cdot \langle h \rangle}$$

Infine volendo confrontare ε_T^* con l'efficienza della connessione di 1° tipo, ε_A , che corrisponde a quella dei dc_dc converter utilizzati, si impone:

$$eq. 3.36 \quad \varepsilon_T^* = \frac{1}{\varepsilon_A} - \frac{V_0 \cdot i^* (1 - \varepsilon_A)}{\varepsilon_A \cdot P_{MAX}^* \cdot \langle h \rangle} \geq \varepsilon_A$$

dalla quale si ottiene per $\langle h \rangle$ l'analogo ottenuto per K con l'eq.3.18:

$$eq. 3.37 \quad \langle h \rangle \geq \frac{(1 - \varepsilon_T^* \cdot \varepsilon_A)}{(1 - \varepsilon_A^2)}$$

quindi, nel caso in cui il cambiamento delle condizioni ottimali * è dovuto solo ad un calo g della densità dello spettro diretto incidente ottimale, il fattore di scostamento K definito in precedenza corrisponde a $\langle h \rangle$. La cosa interessante è che l'eq.3.37 è quasi sempre soddisfatta, nel senso che $\langle h \rangle$ è molto prossimo all'unità anche con cali consistenti della densità dello spettro incidente ρ_{in}^* (nell'esempio $g = 0,5$) e quindi per questo tipo di cambiamento di condizioni ottimali * la configurazione di 2° tipo è in generale preferibile a quella di 1° tipo. Per fare un esempio numerico, pensiamo di aver realizzato il concentratore in modo che si sia trovato che in condizioni ottimali *, l'efficienza di trasferimento $\varepsilon_T^* = 0,85$ ottenuta utilizzando dei dc_dc converter di efficienza $\varepsilon_A = 0,77$. Inserendo i valori nell'eq.3.37 risulta:

$$eq. 3.38 \quad \langle h \rangle \geq 0,85$$

Osservando la Figura 3.7 (ottenuta per $g = 0,5$), si è già visto che fino a $g = 0,5$, $\langle h \rangle \geq 0,962$ e dunque la configurazione di 2° tipo è preferibile a quella di 1° tipo.

2° esempio: rottura o oscuramento di una cella dell'array

Un altro esempio, molto utile se si realizza un array di celle è il seguente:

Supponiamo di aver realizzato il concentratore e trovato che in condizioni ottimali *, l'efficienza di trasferimento sia ε_T^* . Ci si chiede cosa succede se, le nuove condizioni operative, sono quella causate dalla rottura o il totale oscuramento di una cella.

Se la cella interessata a rottura, non è quella che in condizioni ottimali *, fornisce la corrente di circuito $i^* = \text{Max}\{i_{MPPi}^*\}$, allora, la corrente di circuito, i'^* , nelle nuove condizioni operative che denotiamo con **, non cambia e corrisponde ancora a quella delle condizioni ottimali *, quindi:

$$eq. 3.39 \quad i'^* = i^*$$

La potenza P'_{MAX} nelle nuove condizioni operative si trova sottraendo alla massima potenza in condizioni ottimali P_{MAX}^* , la potenza persa a causa della rottura di una cella; cella che indichiamo con il pedice j :

$$eq. 3.40 \quad P'_{MAX} = P_{MAX}^* - P_{Mj}^* = P_{MAX}^* \cdot \left(1 - \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}^*}\right)$$

in cui P_{Mj}^* è la potenza massima fornita dalla cella j in condizioni ottimali *. Sostituendo quindi l'eq.3.39 e l'eq.3.40, nell'eq.3.34, si riesce dunque a scrivere l'efficienza di trasferimento ε_T^* nelle nuove condizioni operative in cui la cella j non è funzionante:

$$eq. 3.41 \quad \varepsilon_T^* = \frac{1}{\varepsilon_A} - \frac{V_0 \cdot i^* (1 - \varepsilon_A)}{\varepsilon_A \cdot P_{MAX}^* \cdot \left(1 - \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}^*}\right)}$$

Infine imponendo all'eq.3.41 di essere maggiore dell'efficienza della connessione di 1° tipo ε_A , che corrisponde all'efficienza dei dc_dc converter utilizzati, si ottiene per il termine $\left(1 - \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}^*}\right)$ l'analogo ottenuto per K con l'eq.3.18:

$$eq. 3.42 \quad \left(1 - \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}^*}\right) \geq \frac{(1 - \varepsilon_T^* \cdot \varepsilon_A)}{(1 - \varepsilon_A^2)}$$

ovvero:

$$eq. 3.43 \quad \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}^*} \leq \left(1 - \frac{(1 - \varepsilon_T^* \cdot \varepsilon_A)}{(1 - \varepsilon_A^2)}\right)$$

in cui il termine $\frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}^*}$ è chiaramente il 'peso', in termini di potenza massima relativa, che la cella j ha nel circuito in condizioni ottimali *. L'eq.3.43 quantifica il peso relativo che ogni cella dell'array può avere in termini di potenza in condizioni ottimali *. Utilizzando i valori di efficienza di trasferimento ed efficienza dei dc_dc converter, relativi al caso di calo di potenza dello spettro incidente, studiato nell'esempio precedente, $\varepsilon_T^* = 0,85$, $\varepsilon_A = 0,77$ si ottiene:

$$eq. 3.44 \quad \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}^*} \leq 0,15$$

quindi, nel caso di rottura di una cella, la configurazione di 2° tipo è preferibile a quella di 1° tipo, se in condizioni ottimali * quella cella contribuisce a meno del 15% della potenza massima P_{MAX}^* .

Si valuta ora il caso in cui a rompersi sia la cella che, in condizioni ottimali *, è maggiormente illuminata e che quindi determina la corrente di circuito $i^* = \text{Max}\{i_{MPPi}^*\}$; dopo la rottura, nelle

nuove condizioni operative che denotiamo con $'^*$, la corrente di circuito i'^* è quella determinata dalla 2° cella più illuminata nelle condizioni ottimali $*$:

$$eq. 3.45 \quad i'^* = i^* \cdot f$$

in cui $f < 1$ in quanto la corrente della 2° cella più illuminata è inferiore a i^* . Per quanto riguarda la massima potenza P'_{MAX} , calcolata nelle nuove condizioni operative $'^*$, vale esattamente il discorso fatto per giungere all'eq.3.40, semplicemente ricordandosi che in questo caso la cella j rappresenta quella che, in condizioni ottimali $*$, è maggiormente illuminata. L'efficienza di trasferimento nelle nuove condizioni operative, ottenuta sostituendo l'eq.3.40 e l'eq.3.45 nell'eq.3.34, risulta:

$$eq. 3.46 \quad \varepsilon'^*_T = \frac{1}{\varepsilon_A} - \frac{V_0 \cdot i^* \cdot f \cdot (1 - \varepsilon_A)}{\varepsilon_A \cdot P_{MAX} \cdot \left(1 - \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}}\right)}$$

Per verificare se la connessione di 2° tipo è vantaggiosa rispetto a quella di 1° tipo, nel caso in cui si rompa la cella che in condizioni ottimali $*$ è maggiormente illuminata, imponiamo all'efficienza di

trasferimento nelle nuove condizioni operative: $\varepsilon'^*_T \geq \varepsilon_A$. Si ottiene per il termine $\frac{\left(1 - \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}}\right)}{f}$, l'analogo ottenuto per K con l'eq.3.18:

$$eq. 3.47 \quad \frac{\left(1 - \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}}\right)}{f} \geq \frac{(1 - \varepsilon'^*_T \cdot \varepsilon_A)}{(1 - \varepsilon_A^2)}$$

ovvero:

$$eq. 3.48 \quad \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}} \leq \left(1 - \frac{(1 - \varepsilon'^*_T \cdot \varepsilon_A)}{(1 - \varepsilon_A^2)} \cdot f\right)$$

Utilizzando i valori di efficienza di trasferimento ed efficienza dei dc_dc converter dell'esempio precedente, $\varepsilon'^*_T = 0,85$, $\varepsilon_A = 0,77$ si ottiene che la configurazione di 2° tipo è sempre preferibile a quella di 1° tipo, per quanto riguarda il caso di rottura della cella maggiormente illuminata in condizioni ottimali $*$, se:

$$eq. 3.49 \quad \frac{P_{Mj}^*}{P_{MAX}} \leq 0,58$$

in cui si è usato per il calcolo $f = 0,5$.

3° esempio: variazione omogenea della temperatura di lavoro

Infine, concludo la parte relativa agli esempi con il caso in cui il cambiamento delle condizioni ottimali $*$, corrisponda ad un aumento della temperatura. Supponiamo dunque di avere trovato la

massima efficienza di trasferimento ε_T^* associata alla condizione ottimale *. Per semplicità consideriamo che in condizioni ottimali * tutte le celle si trovano alla temperatura T^* e supponiamo che nuove condizioni operative siano determinate solo da un aumento della temperatura uniforme e su tutte le celle. Osservando la Figura 3.6¹¹ si è già osservato che le i_{MPP} non dipendono dalla temperatura e quindi la i_{MPPi}^* prodotta da ogni cella nelle condizioni ottimali a temperatura T^* resta sostanzialmente invariata quando si passa alla nuova temperatura $T'^* > T^*$, quindi:

$$eq. 3.50 \quad i'^* = i^*$$

Nelle nuove condizioni operative la potenza massima che le celle potrebbero fornire è $P'_{MAX} = \sum_{i=1}^N V'_{MPPi} \cdot i'_{MPPi}$. Nelle nuove condizioni operative c'è stato un cambio di temperatura, ma la densità di potenza incidente su ogni cella, P_{in_i} , non è cambiata rispetto alle condizioni ottimali *. Per ogni cella i , essa può essere scritta come:

$$eq. 3.51 \quad P_{in_i} = P_{Mi}^* \cdot \frac{1}{\varepsilon_{iT^*}}$$

in cui ε_{iT^*} è l'efficienza della cella alla temperatura T^* ed è fornita dai datasheet (da non confondere con l'efficienza di trasferimento ε_T^*) e P_{Mi}^* è la massima potenza che la cella può fornire in condizioni ottimali *, e quindi alla temperatura T^* . La P'_{MAX} nelle nuove condizioni operative si può scrivere:

$$eq. 3.52 \quad P'_{MAX} = \sum_{i=1}^N P_{in_i} \cdot \varepsilon_{iT'^*}$$

in cui $\varepsilon_{iT'^*}$ è l'efficienza della cella alla temperatura T'^* (da non confondere con l'efficienza di trasferimento $\varepsilon_T'^*$) anch'essa fornita dai datasheet. Infine sostituendo l'eq.3.51 nell'eq.3.52 si ottiene:

$$eq. 3.53 \quad P'_{MAX} = \sum_{i=1}^N P_{Mi}^* \cdot \frac{\varepsilon_{iT'^*}}{\varepsilon_{iT^*}}$$

in cui ε_{iT^*} e $\varepsilon_{iT'^*}$ sono le efficienze della cella fornite dai datasheet (da non confondere con le efficienze di trasferimento) rispettivamente alla temperatura ottimale T^* e a quella nelle nuove condizioni operative di surriscaldamento T'^* e P_{Mi}^* è la massima potenza che la cella può fornire in condizioni ottimali *. Il rapporto $H_i = \frac{\varepsilon_{iT'^*}}{\varepsilon_{iT^*}}$ è graficato in Figura 3.8 con $T^* = 25^\circ C$ e per diverse temperature T'^* . Raccogliendo P_{MAX}^* nell'eq.3.52 si ottiene infine:

¹¹ la figura è ricavata dai datasheet delle celle C1MJ della SPECTROLAB, quindi vale solo per quelle celle

$$eq. 3.54 \quad P'_{MAX} = P_{MAX}^* \cdot \sum_{i=1}^N \frac{P_{Mi}^*}{P_{MAX}^*} \cdot H_i = P_{MAX}^* \cdot H_{T'^*}$$

in cui si è approssimato $H_{T'^*} = H_i$ per ogni cella. L'approssimazione segue dall'osservazione della Figura 3.8 in cui si nota che nelle ipotesi fatte (celle tutte alla stessa temperatura T'^*) e ipotizzando concentrazioni tra i 200 e i 500 *sol* H_i è pressoché costante e dipende solo dalla temperatura.

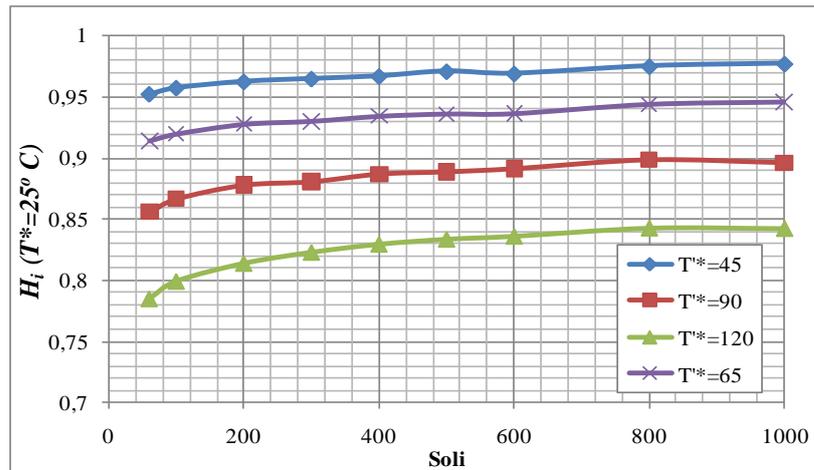


Figura 3.8 Grafico del rapporto $H_i = \frac{\varepsilon_{iT'^*}}{\varepsilon_{iT^*}}$ in funzione della concentrazione. ε_{iT^*} è l'efficienza delle celle in condizioni ottimali *, a temperatura $T^* = 25\text{ C}$, mentre $\varepsilon_{iT'^*}$ è l'efficienza delle celle in condizioni operative diverse da quelle ottimali, $T'^* \neq T^*$. H_i serve per valutare gli effetti sull'efficienza di trasferimento ε_T^* , determinati da un surriscaldamento omogeneo dell'array di celle. H_i è stato calcolato per diversi valori di temperature non ottimali, denominate con T'^* utilizzando i datasheet delle celle C1MJ della SPECTROLAB.

Con l'eq.3.54 e l'eq.3.50 possiamo infine calcolare l'efficienza di trasferimento in condizioni operative ed imporre che sia maggiore di ε_A , in modo da verificare per che valori di $H_{T'^*}$, e quindi fino a che temperatura T'^* , la connessione di 2° tipo sia preferibile a quella di 1° tipo. Si ottiene

$$eq. 3.55 \quad \varepsilon_T'^* = \frac{1}{\varepsilon_A} - \frac{V_0 \cdot i^* (1 - \varepsilon_A)}{\varepsilon_A \cdot P_{MAX}^* \cdot H_{T'^*}} \geq \varepsilon_A$$

dalla quale si ottiene per $H_{T'^*}$, l'analogo ottenuto per K con l'eq.3.18:

$$eq. 3.56 \quad H_{T'^*} \geq \frac{(1 - \varepsilon_T'^* \cdot \varepsilon_A)}{(1 - \varepsilon_A^2)}$$

Utilizzando i valori di efficienza di trasferimento ed efficienza dei dc_dc converter adoperati negli esempi precedenti, $\varepsilon_T^* = 0,85$, $\varepsilon_A = 0,77$ si ottiene che la configurazione di 2° tipo è sempre

preferibile a quella di 1° tipo, per quanto riguarda il caso surriscaldamento rispetto alle condizioni ottimali *, fintanto che:

$$\text{eq. 3.57} \quad H_{T'^*} \geq 0,85$$

Riferendoci ancora alla Figura 3.8 si deduce quindi che per temperature $T'^* \leq 90^\circ$ l'eq.3.57 è certamente verificata e la connessione di 2° tipo risulta preferibile a quella di 1° tipo.

3.3.3 Conclusioni dell'analisi teorica

Se le caratteristiche del sistema in concentrazione sono già definite (l'apparato è realizzato e finito) e nell'ipotesi di poter disporre di dc_dc converter adeguati (vedi paragrafo 3.2.2, punti a.,b.,c.,d.) , allora la scelta di quale connessione utilizzare per le celle (1° tipo o 2° tipo) deriva dalle seguenti verifiche:

1. Stabilire quali siano le condizioni ottimali * che massimizzano l'efficienza di trasferimento ε_T^* , ottenuta imponendo a tutte le celle dell'array il proprio punto di lavoro di massima potenza, MPP^* . Per far ciò si testa l'apparato in ogni condizione operativa, misurando P_{MAX}^* e la corrente di circuito $i^* = \text{Max} \{i_{MPPi}^*\}$, quindi utilizzando l'eq.3.13 si calcola ε_T^* .
2. Se l'efficienza di trasferimento trovata è $\varepsilon_T^* \geq \varepsilon_A$, in cui ε_A è l'efficienza dei dc_dc converter utilizzati e della connessione di 1° tipo, procedere con i passaggi successivi altrimenti scegliere la connessione di 1° tipo.
3. Il massimo scostamento K rispetto alle condizioni ottimali * è dato dall'eq.3.18. Si devono dunque fare delle stime (vedi paragrafo 3.3.2) sulle variazioni previste per K e verificare che i valori ottenuti soddisfino l'eq.3.18. Se ciò accade, entro questi scostamenti, la connessione di 2° tipo garantisce maggior efficienza rispetto a quella di 1° tipo.

3.4 Strumentazione

Ai fini di verificare l'analisi esposta nei paragrafi precedenti è stata realizzata una scheda elettronica per la caratterizzazione delle curve IV delle celle e per il calcolo del punto di massima efficienza di trasferimento ε_T in relazione alle condizioni operative reali. La scheda si interfaccia al PC per mezzo di una scheda di acquisizione *Agilent U2331A* e i calcoli numerici relativi alle curve IV e all'efficienza di trasferimento sono realizzati con software programmati in *Visul Basic 6.0*. Lo schema a blocchi della scheda elettronica è riportato in Figura 3.9.

3.4.1 Curva IV

Il programma ‘*Test celle.exe*’ realizzato in *Visual Basic 6.0*. gestisce la scheda elettronica via *U2331A* e si occupa di calcolare la curva *IV* nella condizioni operative reali, il punto di massima efficienza di trasferimento ε_T per la connessione di 2° tipo e di impostare i dc_dc converter alle tensioni di uscita opportune.

La curva *IV* della singola cella è ottenuta misurando la variazione di tensione ai capi di un condensatore inizialmente scarico e connesso in parallelo alla cella all’istante t_1 . Quando la scheda è accesa e si avvia il programma, le celle sono disconnesse sia dai dc_dc converter che dai condensatori.

I principali ‘step’ eseguiti da ‘*Test celle.exe*’ sulla scheda elettronica sono:

1. scarica dei condensatori ¹² (si chiudono i contatti $C_i - GND$, con $C_i = i - \text{esimo}$ condensatore)
2. t_0 : inizio acquisizione dei dati di tensione $\Delta V_{C_i}(t)$ ai capi dei C_i
3. t_1 : carica dei condensatori (si aprono i contatti $C_i - GND$ e si chiudono i contatti $i - \text{esima cella} - C_i$).

Dall’elaborazione numerica dei $\Delta V_{C_i}(t)$ si ricava la curva *IV* di ogni cella. Si assume che ogni cella stia caricando l’impedenza $Z(\omega) = r_S + R_S + \frac{1}{j \omega C_i}$ in cui r_S è la resistenza in serie del condensatore mentre R_S è sostanzialmente la resistenza del relè utilizzato per il contatto elettrico $i - \text{esima cella} - C_i$. Lo schema elettrico dell’impedenza utilizzata è riportato in Figura 3.10. Nella scheda realizzata, la carica comincia da un valore di tensione $\Delta V_0 \neq 0$ causata dalla resistenza R_0 del relè di connessione $C_i - GND$ (vedi Figura 3.10). L’equazione di carica nel dominio delle frequenze è:

$$\text{eq. 3.58} \quad \Delta V_{C_i}(\omega) - TF(\Delta V_0) = I_{C_i}(\omega) \left(r_S + R_S + \frac{1}{j \omega C_i} \right)$$

in cui $TF(\Delta V_0)$ è la trasformata di Fourier di una costante.

¹² di seguito si indica con C_i il condensatore posto in parallelo alla $i - \text{esima}$ cella.

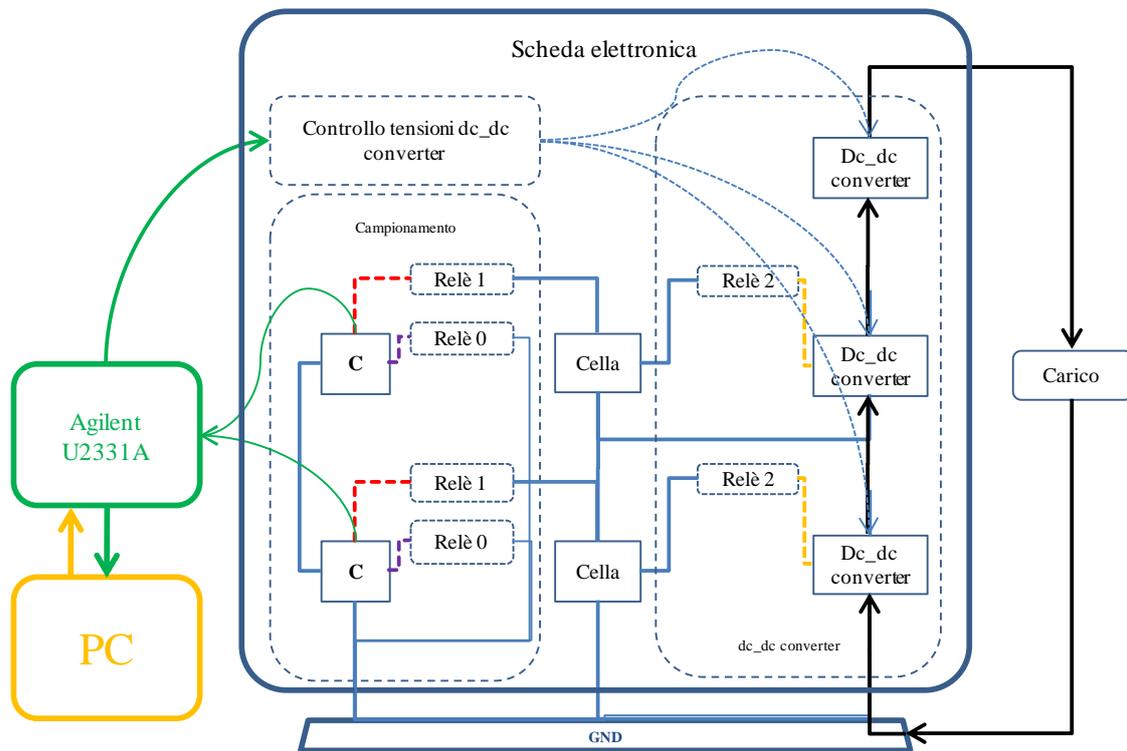


Figura 3.9 Diagramma a blocchi della scheda elettronica. Lo schema in figura, per semplificare, comprende 2 celle; in realtà la scheda ne supporta 8. Le linee viola tratteggiate indicano le connessioni $C_i - GND$. Le linee tratteggiate rosse, indicano la connessione i -esima cella - C_i . Le linee gialle tratteggiate indicano invece le connessioni cella - dc_dc converter.

I seguenti 'step' realizzati da 'Test celle.exe', calcolano $I_{C_i}(t)$, tenendo conto che si sta lavorando con dati campionati¹³. Gli step da 4 a 7 sono ripetuti per tutti i campionamenti delle tensioni dei C_i :

4. il valore ΔV_0 è ottenuto mediando $\Delta V_{C_i}(t)$ tra l'istante t_0 e l'istante t_1 . 'Test celle.exe' esegue la media sul vettore $\{\Delta V_{C_i}(t_n)\}$ ¹⁴ che contiene il campionamento; n è il numero del dato campionato che corrisponde all'istante $t_n = n/S$, dove S è il samplerate del campionamento:

$$\Delta V_0 = \frac{1}{N_1} \sum_{n=1}^{N_1} \Delta V_{C_i}(t_n)$$

con N_1 , numero di dati campionati tra l'istante t_0 e l'istante t_1 .

¹³ I parametri del campionamento e la capacità dei condensatori dipendono dalla corrente di cortocircuito della cella di cui si sta calcolando la curva IV e quindi dall'illuminazione. Per correnti di corto circuito nell'ordine dei $1 \div 3 A$ sono stati utilizzati condensatori con capacità elevate ($1,5 F$), samplerate $S = 1000 \frac{\text{lettura}}{\text{sec}}$ e numero totale di dati campionati in un processo di carica $N = 5000$

¹⁴ Di seguito si indicherà con $\{A_n\}$ il vettore contenente i campionamenti relativi alla quantità A , mentre con A_n il termine n -esimo del vettore

5. calcolo della Trasformata Discreta di Fourier (*DFT*) sul vettore $\{V'(t_n)\} = \{\Delta V_{Ci}(t_n) - \Delta V_0\}$

$$DFT(\{V'(t_n)\}) = \{V'_{Ci}(\omega)\}$$

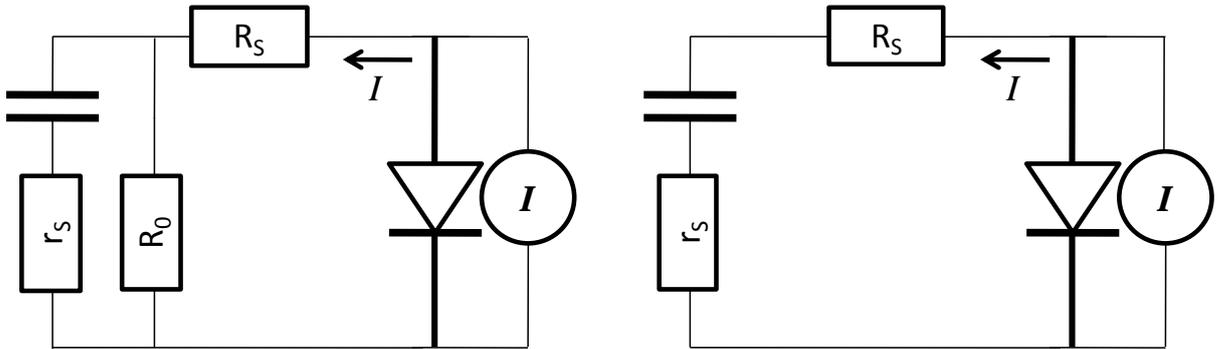


Figura 3.10 Schema per il modello di impedenza utilizzato. A sinistra, quando si scaricano i condensatori entrambi i relè sono chiusi (resistenze R_0 e R_S). La tensione su C è dunque $\Delta V_0 = \frac{I \cdot R_0}{(R_0 + R_S)}$ dove I è la corrente che la cella fornisce ad un carico $R_0 + R_S$ secondo la propria curva *IV*. A destra, circuito di carica che determina l'impedenza utilizzata nell'eq.3.58. In questo caso la resistenza $R_0 = \infty$ in quanto il relè $C_i - GND$ è aperto.

6. Al fine di calcolare il vettore $\{I'_{Ci}(\omega)\}$, il vettore $\{V'_{Ci}(\omega)\}$ viene diviso per l'impedenza del circuito secondo l'eq.3.58

$$I'_{Ci}(\omega) = V'_{Ci}(\omega) \cdot \frac{j \omega C_i}{(j \omega C_i \cdot (r_s + R_S) + 1)}$$

7. calcolo dell'*inverse - DFT* del vettore $\{I'_{Ci}(\omega)\}$. Si ottiene $\{I_{Ci}(t_n)\}$, in cui ogni elemento $I_{Ci}(t_n)$ corrisponde alla corrente fornita dalla cella all'istante $t_n = n/S$
8. Calcolo e grafico della curva *IV*, assegnando $I_{Ci}(t_n)$ al dato di tensione campionato all'istante t_n , $V_{Ci}(t_n)$

Nota: trovare la corrente $I_{Ci}(t)$ significa risalire alla corrente che un generatore, in questo caso la cella, deve fornire all'impedenza $Z(\omega)$ (rappresentata in Figura 3.10 a destra), affinché la tensione sia quella misurata nei campionamenti. A questo proposito è necessario discutere l'applicazione della *DFT*.

L'algoritmo della *DFT*, considera periodico, nel dominio del tempo, il campionamento effettuato, e l'effetto è che il segnale analizzato non è quello misurato ma quello indicato in Figura 3.11¹⁵. Tale

¹⁵ il segnale in figura non è quello ottenuto dalla caratterizzazione di una cella ma fornisce un esempio utile alla discussione sulla *DFT*

periodo vale $T = \frac{N}{S} = t_N$ in cui N è il numero totale di valori campionati ed S è il samplerate del campionamento (in Figura 3.11 il segnale campionato è costituito da $N = 60$ campionamenti). Le eventuali discontinuità tra i valori $V'(t_N)$, $V'(t_0)$ (si veda Figura 3.11, linea rossa) introdotte dalla periodicizzazione, determinano un calcolo errato degli $I_{Ci}(t_n)$ per tempi prossimi a t_0 e t_N . Senza entrare nei dettagli matematici della DFT¹⁶ si può dare una spiegazione concreta di ciò che accade.

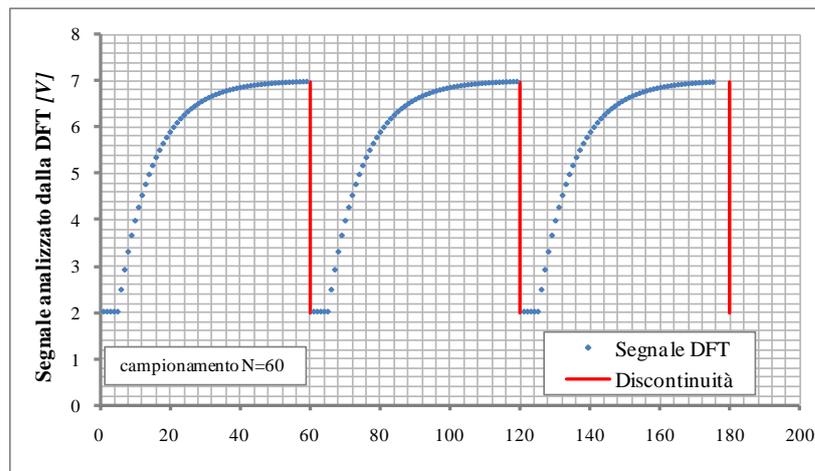


Figura 3.11 L'algoritmo della DFT trasforma il campionamento (in figura i dati campionati sono $N = 60$) in un segnale periodico. Eventuali discontinuità come quella indicata dalla linea rossa determinano problemi nel calcolo della corrente, risolvibili con gli accorgimenti descritti nel paragrafo.

Con gli step da 4 a 7 si sta calcolando la corrente che un generatore ipotetico sta fornendo ad una certa impedenza nota, $Z(\omega)$ per produrre il segnale di Figura 3.11 e non quello reale (che non sarebbe periodico perché è sostanzialmente la carica di un condensatore). Trattandosi di carica di un condensatore è noto che all'istante 0 la corrente è massima, mentre tende a 0 per $t = t_N = T \gg 0$. A causa della periodicizzazione, al tempo $t_N = T$, e in generale ad ogni periodo, il generatore ipotetico deve scaricare completamente il condensatore con uno spike di corrente negativo, cosa che ovviamente non avviene nel processo reale di carica e quindi ricominciare la carica con uno spike di corrente positivo. Il risultato è un vettore $\{I_{Ci}(t_n)\}$ che non corrisponde alla fotocorrente generata dalla cella. Per ovviare al problema è sufficiente, negli step da 5. a 7., utilizzare, ad esempio, il segnale $V'(t_n)$ ottenuto 'raddoppiando' il campionamento effettuato, secondo lo schema riportato in Figura 3.12.

Con le curve IV ricavate, 'Test celle.exe' esegue gli ultimi 'step':

¹⁶ Una trattazione più completa e matematicamente consistente è disponibile su (22)

9. utilizzando l'eq.3.9 (efficienza di trasferimento ε_T) secondo il procedimento discusso nel paragrafo 3.2.4, punto d. calcola numericamente i punti $\{V_{Ci}, i\}$ corrispondenti alla massima efficienza di trasferimento ε_T ,
10. imposta le tensioni sui dc_dc converter
11. disconnette celle e condensatori
12. connette le celle ai relativi dc_dc converter

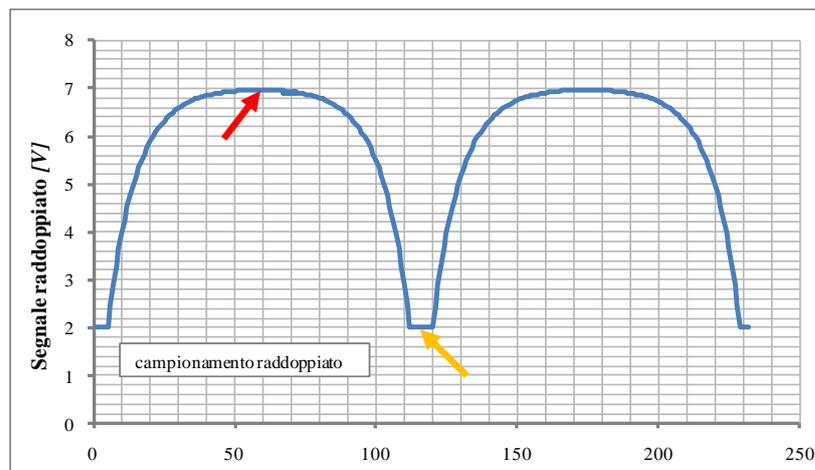


Figura 3.12 Il campionamento $N=60$, di Figura 3.11, è stato raddoppiato. L'algoritmo della DFT analizza dunque il nuovo segnale in cui sono state ridotte le discontinuità, vedi freccia rossa e gialla. E' preferibile inoltre che la parte di segnale evidenziata dalla freccia gialla sia allargata (corrisponde a $2(t_1 - t_0)$ con $(t_1 - t_0)$ tempo che intercorre tra l'inizio del campionamento e l'inizio della carica; questo serve per limitare la 'sovrapposizione' tra gli spike di corrente. Queste procedure sono automaticamente eseguite dal software.

3.4.2 Descrizione della procedura di misura e di analisi dati sperimentali

Sono stati fatti test di laboratorio allo scopo di verificare che un array di N celle in serie connesse con la connessione di 2° tipo possa essere pilotato utilizzando dc_dc converter e contemporaneamente che siano soddisfatte le previsioni teoriche sull'efficienza di trasferimento ε_T trattate nel paragrafo 3.2.3. Le verifiche sono state condotte simulando un array di $N = 6$ celle connesse in serie con configurazione di 2° tipo e le condizioni operative verranno discusse nel paragrafo 3.4.3. Di seguito si riporta la procedura di misura utilizzata. Si è utilizzata una sola 'cella test' da cui sono state ricavate le curve IV in 6 differenti condizioni operative, e si è assunto che ogni curva IV corrisponda alla condizione operativa di 1 delle 6 celle che costituiscono l'array. Le diverse condizioni operative sono state ottenute variando la densità di potenza incidente sulla 'cella test'.

Con il software *'Test celle.exe'* e i dati relativi alle 6 caratterizzazioni, è stata calcolata la massima efficienza di trasferimento ε_T dell'array, seguendo la procedura descritta nel paragrafo 3.2.4.

Come visto nel paragrafo 3.2.4, il calcolo della massima efficienza di trasferimento ε_T sopra menzionato, determina i valori di corrente di circuito i che deve scorrere nell'array di celle e i valori di tensione V_{Ci} ai quali è necessario pilotare ciascuna delle 6 celle con i dc_dc converter.

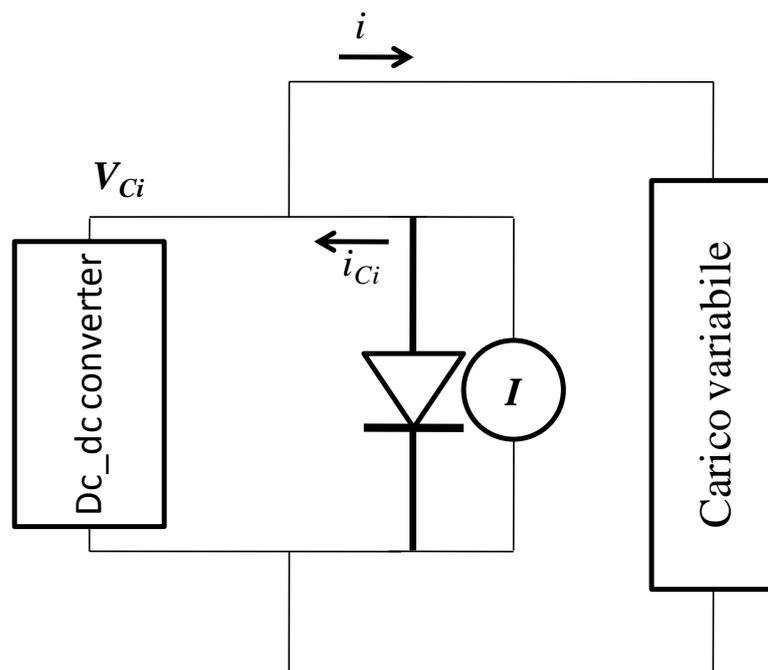


Figura 3.13 In figura è rappresentato lo schema del circuito utilizzato. Ad ogni misura la 'cella test' è messa nelle condizioni operative relative ad 1 delle 6 celle dell'array. La corrente di circuito i è invece impostata uguale in tutte le 6 misure relative alle celle. Per fissare i si agisce sul carico variabile dopo aver impostato l'out del dc_dc converter al V_{Ci} . Entrambi i valori citati derivano dal calcolo teorico di ε_T descritto nel nel paragrafo 3.2.4.

Per verificare la previsione di efficienza ε_T calcolata per l'array di 6 celle si è utilizza ancora la 'cella test' e un unico dc_dc converter, connessi secondo lo schema elettrico rappresentato in Figura 3.13. Sono state condotte 6 misure ciascuna rappresentativa di una delle 6 celle dell'array. La procedura seguita è la seguente:

1. si sono riprodotte sulla 'cella test' le condizioni operative dell' $n -esima$ cella, imponendo la corretta illuminazione, utilizzata per l' $n -esima$ caratterizzazione delle 'cella test',
2. con il dc_dc converter è stato imposta alla 'cella test', la tensione V_{Ci} , calcolata con *'Test celle.exe'* per l' $n -esima$ cella dell'array,
3. utilizzando il carico variabile è stato imposto che la corrente di circuito i fosse quella determinata dal calcolo di ε_T .

Ogni volta sono state effettuate le misure di tensione V_{Ci} ai capi della ‘cella test’, della corrente di circuito i e della corrente i_{Ci} fotogenerata dalla cella stessa. Con i valori misurati su tutte le 6 celle è stata calcolata la potenza netta P_N erogata sul carico secondo la relazione (la potenza netta è quella fornita al carico a cui si sottrae quella fornita ai dc_dc converter, vedi paragrafo 3.2.3):

$$eq. 3.59 \quad P_N = \sum_{i=1}^6 \left(V_{Ci} \cdot i - \frac{V_{Ci} \cdot (i - i_{Ci})}{\varepsilon_A} \right) + (V_0 - \sum_{i=1}^6 V_{Ci}) \cdot i \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_A} \right)$$

in cui il 3° termine dell’equazione tiene conto che nella connessione di 2° tipo l’ultimo dc_dc converter non è accoppiato a nessuna cella ed ha il solo compito di mantenere la tensione in uscita sul carico al valore V_0 . Dalle curve IV si è quindi ricavata P_{MAX} , cioè la massima potenza che le celle avrebbero potuto fornire in quelle condizioni operative. Infine da P_N e P_{MAX} è stata calcolata l’efficienza di trasferimento con i dati sperimentali:

$$eq. 3.60 \quad \varepsilon_T = \frac{P_N}{P_{MAX}}$$

e quindi è stato effettuato il confronto con il valore teorico previsto.

E’ importante notare che fare le misure sulla ‘cella test’ con questa procedura è equivalente a condurre le misure direttamente sulle 6 celle dell’array. Questo perché ogni misura effettuata sulla ‘cella test’ riproduce esattamente le condizioni di lavoro corrispondenti alla specifica cella quando essa è inserita nell’array. Tali condizioni sono, sia la curva IV , riprodotta con la corretta illuminazione, sia il vincolo di uguale corrente i , dovuto alla connessione in serie dei 6 sottoelementi *cella – dc_dc converter* che costituiscono l’array di 6 celle connesse con connessioni di 2 tipo.

Per condurre le prove, la ‘cella test’ è stata saldata sul dissipatore termico¹⁷ ed è stata usata una lampada da 500 W come sorgente della radiazione luminosa. Le diverse condizioni operative sono state ottenute variando l’alimentazione della lampada fornita da un Variac e quindi la tensione di uscita VAC del Variac è il parametro di riferimento di una determinata condizione operativa. La temperatura della ‘cella test’ è stata mantenuta costante dal flusso di acqua fatta scorrere nel dissipatore e monitorata da una termocoppia fissata in prossimità della cella stessa. Per ottenere le curve IV delle celle nelle diverse condizioni operative è stata utilizzata la scheda elettronica realizzata, mentre con il programma ‘*Test celle.exe*’ e note le curve IV , sono stati calcolati i valori di ε_T , i e V_{Ci} utilizzando la procedura descritta nel paragrafo 3.2.4.

¹⁷ La parte riguardante la dissipazione termica è argomento del prossimo capitolo

3.4.3 Studio di un array di celle

Come anticipato, è stato verificato che il valore di ε_T calcolato teoricamente per un array composto di $N = 6$ celle in condizioni operative differenti è congruente con quello misurato sperimentalmente. Di seguito verrà studiato il caso in cui 3 celle siano illuminate maggiormente rispetto alle altre 3. La curva IV delle 3 celle più illuminate è stata ottenuta caratterizzando la ‘cella test’ con la lampada alimentata a $VAC = 180 Volt$, mentre la curva IV delle 3 celle meno illuminate è stata ottenuta caratterizzando la ‘cella test’ con la lampada alimentata a $VAC = 120 Volt$.

Le curve IV e le curve di potenza della ‘cella test’ in condizioni operative $VAC = 180 Volt$ e $VAC = 120 Volt$, ricavate con la scheda elettronica realizzata, sono riportate in Figura 3.14.

Dalle curve di potenza in Figura 3.14 si ricava che la potenza massima che le 6 celle dell’array possono fornire nelle condizioni di illuminazione descritte sopra è $P_{MAX} = 12,678 W$ ($P_{MAX} = (3 \cdot 3,001 + 3 \cdot 1,225)W$).

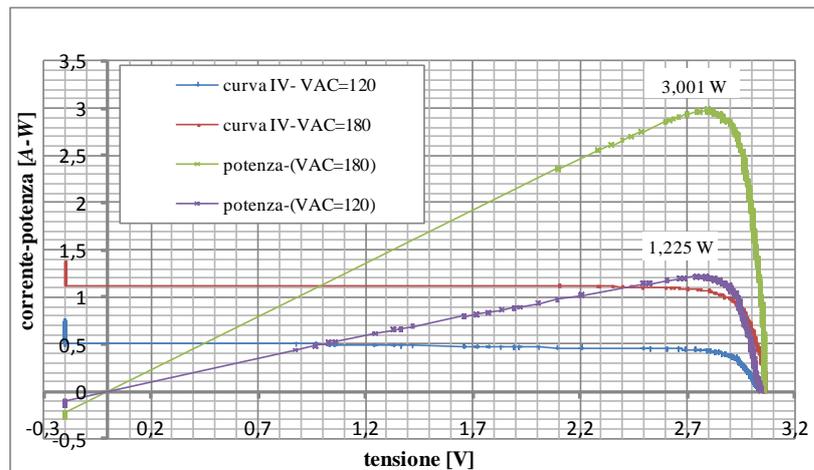


Figura 3.14 Curve IV della ‘cella test’ caratterizzata in condizioni operative $VAC = 180 V$ e $VAC = 120 V$ con relative curve di potenza. In figura sono evidenziate le massime potenze erogabili nei 2 casi.

L’efficienza di trasferimento massima ε_T , la corrente di circuito i e le tensioni delle celle V_{Ci} , calcolati secondo la procedura riportata nel paragrafo 3.2.3 per l’array di 6 celle in queste condizioni operative, dipendono dal valore di tensione V_0 con cui si decide di uscire sul carico (che in questo caso è stato fissato a $V_0 = 17,5 V$) e dall’efficienza ε_A dei dc_dc converter utilizzati.

ε_A	0.4	0.6	0.7	0.8
$i(A)$	0.436	0.964	1.035	1.072
V_{c1}	3.017	2.917	2.849	2.798
V_{c2}	3.017	2.917	2.849	2.798
V_{c3}	3.017	2.917	2.849	2.798
V_{c4}	2.791	2.742	2.742	2.741
V_{c5}	2.791	2.742	2.742	2.741
V_{c6}	2.791	2.742	2.742	2.741
V_B	0.032	0.524	0.727	0.882
ε_T	0.6	0.705	0.799	0.88

Figura 3.15 Tabella riassuntiva dei valori previsti per la massima efficienza ε_T calcolata dai dati delle curve IV ricavate con le 6 caratterizzazioni in condizioni differenti, e in funzione dell'efficienza dei dc_dc converter utilizzati. I V_{ci} sono le tensioni a cui occorre pilotare le celle per ottenere l' ε_T . V_B è la tensione sul dc_dc converter che tiene la tensione di uscita sul carico al valore $V_0 = 17,5V$ ed i è la corrente di circuito necessaria per ottenere l' ε_T previsto.

I valori di i e V_{ci} , calcolati e utilizzati per le misure sono riportati nella tabella in Figura 3.15 in relazione all'efficienza ε_A dei dc_dc converter utilizzati. Nella tabella in Figura 3.15, V_B è la tensione a cui impostare l'uscita del dc_dc converter che nella connessione di 2° tipo si occupa di mantenere la tensione sul carico al valore V_0 (vedi paragrafo 3.2.3). Nella tabella in Figura 3.15 sono riportati anche i valori dell'efficienza di trasferimento ε_T , prevista nei vari casi. Come visto, il test non è effettuato contemporaneamente su tutte le celle dell'array, ma si effettua singolarmente su ogni cella. A tal fine è stato realizzato il semplice circuito di Figura 3.13 connettendo direttamente la cella in parallelo ad un dc_dc converter e ad un carico elettronico. Per le misure di corrente si è inserito un amperometro in serie alla cella ed uno in serie al carico, mentre la misura di tensione è stata effettuata ai capi del carico.

Le misure di tensione e corrente sono caratterizzate da un errore relativo di 1/1000 del valore letto sullo strumento quindi l'errore sulla P_N calcolata con l'eq.3.59 e utilizzando i dati sperimentali è $\pm 0.002 \cdot P_N$. La massima potenza che le celle potrebbero fornire è $P_{MAX} = 12,678 W$ con errore $\pm 0.002 \cdot P_{MAX}$ e quindi il calcolo dell'efficienza di trasferimento $\varepsilon_T = \frac{P_N}{P_{MAX}}$ effettuato con i dati sperimentali porta ad un errore $\pm 0.004 \cdot \varepsilon_T$. Ad ogni misura¹⁸ i valori di V_{ci} e di corrente di circuito i gli ho impostati io e quindi corrispondono esattamente ai valori riportati nella tabella in Figura

¹⁸ Le misure totali sono 6×4 , dovendo impostare 4 volte i V_{ci} per ognuna delle 6 celle dell'array. Questo perché si vuole verificare l'efficienza di trasferimento ε_T , con 4 valori di efficienza ε_A dei dc_dc converter utilizzati. Vedi tabella in Figura 3.15.

3.15, mentre le misure ‘vere e proprie’ sono quelle relative alle correnti i_{Ci} della cella. Infatti il senso delle misure è anche quello di verificare che è possibile forzare la cella a stare in un certo punto della propria curva IV imponendo dall’esterno il V_{Ci} e la corrente di circuito i . I valori misurati per le correnti i_{Ci} sono riportati nella tabella di Figura 3.16 insieme con i risultati sperimentali del calcolo della P_N , calcolata con l’eq.3.59 e i dati sperimentali e dell’efficienza di trasferimento ε_T calcolata con l’eq.3.60.

ε_A	0.4	0.6	0.7	0.8
i_{C1}	0.432	0.964	1.075	1.065
i_{C2}	0.429	0.963	1.041	1.081
i_{C3}	0.429	0.968	1.036	1.056
i_{C4}	0.442	0.438	0.443	0.447
i_{C5}	0.435	0.433	0.447	0.446
i_{C6}	0.436	0.442	0.441	0.443
i_{C7}	0.438	0.966	1.029	1.071
P_N	7.454	8.490	9.959	10.851
ε_T	0.588	0.67	0.786	0.856

Figura 3.16 Tabella delle misure di i_{Ci} fatte sulla ‘cella test’ imponendo i V_{Ci} e la corrente di circuito i riportati nella tabella in Figura 3.15. Sono anche stati calcolati i valori della potenza netta P_N e dell’efficienza di trasferimento sperimentale ε_T in relazione ai vari casi di efficienza ε_A dei dc_dc converter utilizzati.

E’ evidente, confrontando i valori dell’efficienza di trasferimento prevista ε_T , riportati nella tabella in Figura 3.15 e quelli ottenuti con la misura sperimentale riportati nella tabella di Figura 3.16, che c’è notevole congruenza. Tuttavia non rientrano nell’errore sperimentale calcolato ad inizio paragrafo, e la probabile causa è la sottostima dell’errore sperimentale relativo alla misura di P_{MAX} .

Nota: P_{MAX} è ottenuta a partire dai segnali campionati, ma sottoposti ad un numero elevato di elaborazioni matematiche da parte del software ‘Testcelle.exe’.

E’ anche da notare che, per l’array di 6 celle su cui sono state effettuate le misure, le efficienze di trasferimento ε_T , calcolate e verificate per diversi valori ε_A di efficienza dei dc_dc converter utilizzati, risultano sempre maggiori dei valori di ε_T che si otterrebbero utilizzando la connessione di 1° tipo, infatti come visto nel paragrafo 3.2.2 la connessione di 1° tipo ha sempre efficienza di trasferimento $\varepsilon_T = \varepsilon_A$.

Capitolo 4

Dissipazione del Calore

4.1 Introduzione

Utilizzando alte concentrazioni di radiazione luminosa è determinante disporre di un sistema di dissipazione del calore, il motivo principale è che l'efficienza delle celle fotovoltaiche diminuisce con l'aumentare della temperatura. In Figura 4.2 è rappresentata la massima efficienza, calcolata rispetto alla superficie attiva (Aperture Area, linea blu in Figura 4.1.) della cella *C1MJ* della SPECTROLAB in funzione della temperatura e della concentrazione luminosa incidente (espressa in soli). La curva nera del grafico di Figura 4.2, mostra come in condizioni di test (500 soli, 25° C) il valore di efficienza sia del 37%. E' opportuno specificare che in realtà tale valore corrisponde al valore di picco di una distribuzione non gaussiana con valor medio pari a 35,5%. (13)

Molte sono le soluzioni proposte per il raffreddamento delle celle, sia in configurazione di cella singola, che connesse in array (dense array). Per quanto riguarda i sistemi point focus con singola cella sembra essere sufficiente un raffreddamento di tipo passivo (4) (3). Nel computo dell'efficienza complessiva del sistema non vi è quindi nessuna riduzione dovuta all'impiego di energia per il raffreddamento e vi può essere una riduzione dei costi di progettazione. Nei sistemi dense array invece è necessario un raffreddamento di tipo attivo che influisce certamente sia sui costi di fabbricazione che sull'efficienza complessiva del sistema. Per contro, un possibile vantaggio consiste nell'avere un sistema più compatto.

In questo capitolo si descrive il dissipatore termico progettato e realizzato dal gruppo. Nella fase di studio è stata posta particolare attenzione alle modalità di connessione delle celle. Infatti la superficie necessaria per effettuare le connessioni sui contatti top della cella, determina una perdita di potenza, perché di fatto si stanno distanziando le celle e la potenza radiativa non è intercettata da materiale attivo. In particolare nelle celle *C1MJ* una superficie $S = 0,6 \cdot 10,1 \text{ mm}^2$ è già occupata da ognuna delle 2 'bus bar' (Vedi Figura 4.1) della cella, a cui si deve sommare la superficie occupata dai cavi o dai sistemi di connessione ai contatti metallici della cella per l'estrazione della potenza fotogenerata. L'influenza del termine relativo alla superficie occupata dalle 'bus bar' è calcolabile direttamente considerando che l'efficienza fornita dalla SPECTROLAB è riferita alla sola superficie attiva della cella. Dalla Figura 4.1 si ricava che le 2 'bus bar' occupano il 10,8% della superficie totale della

cella *C1MJ*, e quindi, l'efficienza effettiva della cella è $35,5 \cdot (1 - 0,108) = 31,6\%$; nel calcolo è stato utilizzato il valor medio di efficienza (35,5%) delle celle *C1MJ*.

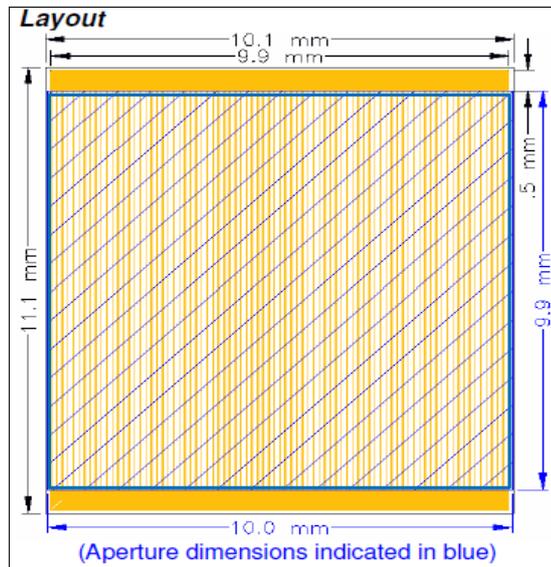


Figura 4.1 Layout della cella SPECTROLAB C1MJ_CDO_100. La linea blu ($10.0 \times 9.9 \text{ mm}^2$) delinea l'Aperture Area ovvero l'area di superficie fotovoltaica su cui sono calcolati i valori di efficienza riportati nel datasheet SPECTROLAB (13)

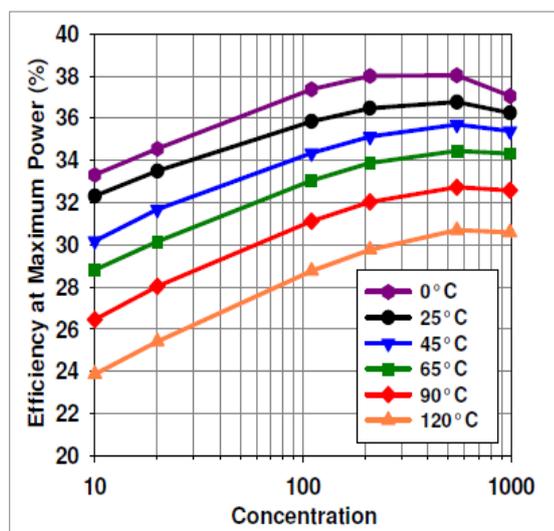


Figura 4.2 Efficienza in funzione della concentrazione a varie temperature per l'area attiva delle celle C1MJ_CDO_100 SPECTROLAB.

Per ridurre la superficie dei sistemi di connessione ai contatti metallici della cella, il dissipatore che si intende realizzare prevede la deposizione di layer di *DLC*, *Ag* e *AlN* depositati su un dissipatore realizzato in rame. L'idea è di realizzare un circuito stampato e quindi ridurre gli spazi per le connessioni, portando i contatti alle celle per mezzo di piste metalliche, analogamente a quanto si fa con qualsiasi componente elettrico su una scheda elettronica. Poiché il numero di celle dell'array può essere elevato, sono previsti diversi livelli di piste, separati da altrettanti strati di materiale isolante elettricamente. I materiali che si intende utilizzare come piste del circuito sono *Ag*, *Cu* o *Al* in quanto hanno elevata conducibilità termica ed elettrica; diversamente, come layer di separazione delle piste sono stati presi in considerazione *DLC* e *AlN*, materiali caratterizzati da elevata conducibilità termica e isolanti elettricamente.

Il paragrafo successivo è una breve introduzione all'analisi di un circuito termico, mentre nel paragrafo 4.2.2 si calcola la temperatura teorica di equilibrio delle celle, raffreddate con il dissipatore realizzato dal gruppo senza le deposizioni di layer che costituiscono il circuito stampato. Nel paragrafo 4.3 si discute la progettazione del circuito stampato che si intende depositare sul supporto prestando particolare attenzione agli spessori e alle caratteristiche dei materiali e infine nel paragrafo 4.4 si riportano i dati sperimentali relativi alle deposizioni effettuate in laboratorio.

4.2 Circuito Termico

Analogamente ad un circuito elettrico anche un circuito termico può essere schematizzato per mezzo di resistenze e capacità. L'analogia è dovuta alla somiglianza tra le equazioni che governano i 2 processi fisici; ovvero il flusso di calore e la differenza di temperatura sono legati da relazioni matematiche formalmente identiche a quelle che legano corrente elettrica e differenza di potenziale. Un requisito affinché ciò sia possibile è che la temperatura dipenda da una sola coordinata, caso nel quale si parla di circuiti termici monodimensionali.

Nei processi di conduzione termica, conduzione termica di contatto e di scambio termico convettivo, il flusso di calore φ che attraversa un certo materiale (o la superficie di contatto tra 2 materiali) è proporzionale alla differenza di temperatura ΔT secondo la relazione:

$$eq. 4.1 \quad \Delta T = \varphi \cdot r_T$$

dove φ è il flusso di calore espresso in W , ΔT è la differenza di temperatura in gradi K e r_T è la resistenza termica espressa in $\frac{K}{W}$.

Nel processo di conduzione, la resistenza termica r_T di un certo materiale, calcolata per un cilindretto di superficie s e altezza l , dipende dalla conducibilità termica χ del materiale stesso, secondo la relazione:

$$eq. 4.2 \quad r_T = \frac{l}{s \cdot \chi}$$

in cui χ è espressa in $\frac{W}{K \cdot m}$.

Nel processo di conduzione termica di contatto, cioè quando 2 corpi solidi sono posti in contatto meccanico, si utilizza la conduttanza termica di contatto h_C espressa in $\frac{W}{K}$, mentre la resistenza termica del contatto è il reciproco della conduttanza:

$$eq. 4.3 \quad r_T = \frac{1}{h_C}$$

Il valore h_C dipende dalle caratteristiche del contatto termico realizzato: rugosità delle superfici di contatto, pressione del contatto, dalla presenza di aria o altro negli spazi interstiziali ecc.

Nei processi di scambio termico convettivo, r_T dipende dal coefficiente convettivo h :

$$eq. 4.4 \quad r_T = \frac{1}{s \cdot h}$$

in cui h è espressa in $\frac{W}{K \cdot m^2}$. I valori di h sono normalmente tabulati e dipendono dalla velocità del fluido, dal tipo di fluido utilizzato e da altri parametri relativi al flusso del fluido.

L'eq.4.1 è analoga alla 1° legge di Ohm, per questo in un circuito termico, il simbolo della resistenza elettrica è utilizzato per rappresentare i processi di conduzione e convezione termica.

La capacità termica di un materiale è la quantità di calore che deve essere fornita per incrementare di $1 K^\circ$ la temperatura del materiale stesso. Si nota che sostituendo il calore alla carica elettrica e la differenza di temperatura alla differenza di potenziale, la definizione è equivalente a quella di capacità elettrica. L'equazione per la capacità termica è quindi formalmente identica a quella della capacità elettrica:

$$eq. 4.5 \quad Q = C \cdot T$$

in cui C è la capacità termica espressa in $\frac{J}{K}$ e Q è il calore espresso in *Joule*. La capacità termica è a sua volta esprimibile come:

$$eq. 4.6 \quad C = m c_p$$

in cui m è la massa espressa in Kg e c_p è il calore specifico a pressione costante. Nei circuiti termici il simbolo di condensatore è associato normalmente alle masse.

Per concludere questa breve introduzione è opportuno aprire una parentesi sul processo fisico di scambio di calore per irraggiamento termico. Questa situazione non ha analogia con processi di tipo elettrico in quanto, il flusso di calore φ tra 2 corpi, rispettivamente a temperatura T_A e T_B , definito dalla legge di Stefan-Boltzmann è proporzionale a $T_A^4 - T_B^4$ e non esistono processi elettrici in cui corrente e tensione seguano una legge simile. In ogni caso, se $T_B = T_{Amb.} \sim 25^\circ C$ e $T_A < 170^\circ C$ si può linearizzare la legge di Stefan-Boltzmann (4) come segue:

$$eq. 4.7 \quad (T_A - T_{Amb.}) = \frac{q}{4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{Amb.})^3}$$

in cui σ è la costante di Stefan e vale $5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$, ε è l'emissività e q è il flusso di calore per unità di superficie. La resistenza termica è quindi:

$$eq. 4.8 \quad r_T = \frac{1}{4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{Amb.})^3}$$

e l'errore su r_T derivante dalla linearizzazione è $\pm 0,05 \cdot r_T$.

4.2.2 Circuito termico del dissipatore

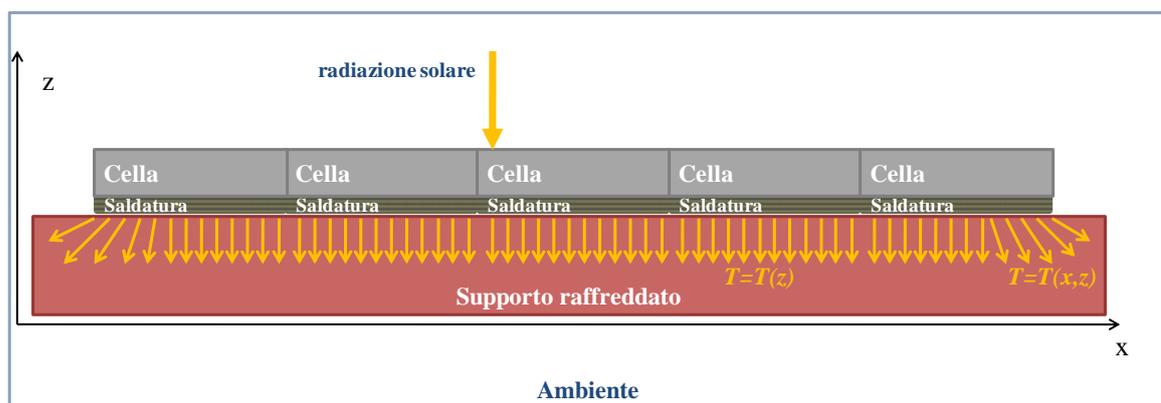


Figura 4.3 Sezione laterale dell'array di celle montate sul dissipatore. Nella zona centrale, il vettore flusso di calore è diretto lungo $-z$ e non dipende da x in quanto si assume che ogni punto dell'array si trovi nelle stesse condizioni di illuminazione; anche la temperatura dipende solo dalla coordinata z .

L'efficienza delle celle solari è maggiore quanto minore è la temperatura di lavoro della cella ed

aumenta con l'aumentare della radiazione solare incidente, fino ad un valore massimo, che per le celle *SPECTROLAB* è 37% in corrispondenza di 50 W/cm^2 alla temperatura di 25° C . Dalla Figura 4.2 è evidente il degrado dell'efficienza all'aumentare della temperatura, a parità di concentrazione. E' quindi necessario disporre di un sistema di dissipazione termica in grado di mantenere la cella alla minor temperatura possibile nonostante l'alta potenza della radiazione solare incidente. Lo schema di un generico dissipatore è rappresentato in Figura 4.3. Nel caso specifico di Figura 4.3, il supporto è realizzato in rame, l'elemento saldante è Sn62 e non si considerano i layer che costituiscono il circuito stampato, e quindi le resistenze di contatto, per il quale si rimanda ai paragrafi 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3.

Il modello mono-dimensionale della propagazione del calore presuppone che la temperatura dipenda da una sola coordinata. Riferendoci alla Figura 4.3 si osserva che l'ipotesi è valida per le celle centrali dell'array, in quanto esse si trovano tutte nella medesima situazione cioè sono affiancate sia lungo x che y da altre celle con uguale efficienza e sottoposte allo stesso flusso termico, mentre non è valida per quelle laterali che hanno i bordi esterni liberi.

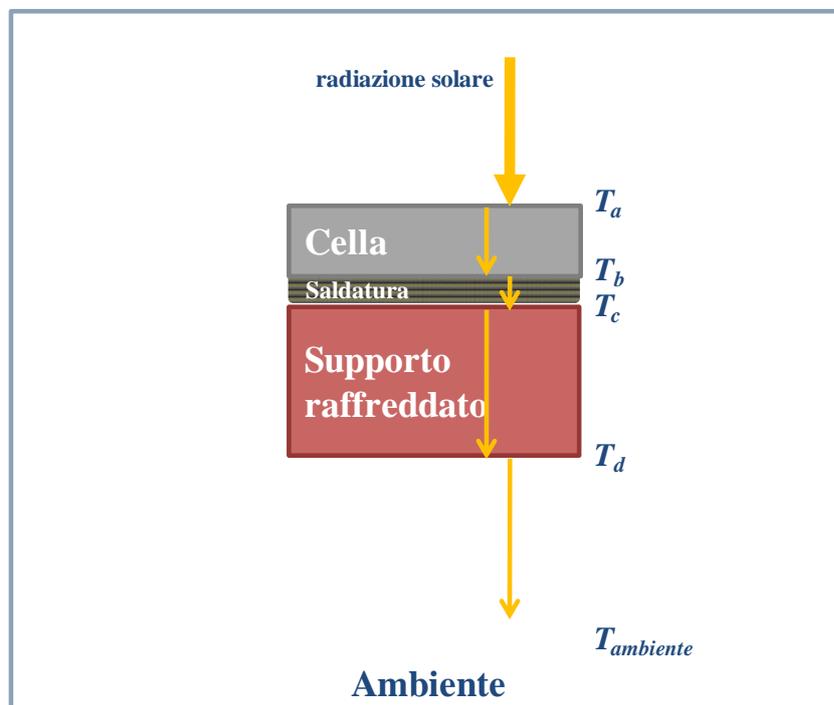


Figura 4.4 Elemento 'cella-saldatura-supporto' utilizzato per lo schema del circuito termico monodimensionale. A destra sono riportate i simboli relativi alle temperature di interfaccia calcolate e riportate nella tabella in Figura 4.8

Si conclude che nella zona centrale dell'array la temperatura dipende solo da z e non c'è flusso termico in direzione x e y (ovvero il vettore flusso di calore è orientato lungo z ed è rappresentato dalle frecce gialle in Figura 4.3).

Nel caso reale il dissipatore che è stato realizzato non è sottoposto a condizioni di flusso omogeneo, ma a densità di potenza come quelle misurate e riportate in Figura 2.13, Figura 2.14, Figura 2.15 nel paragrafo 2.3.3. Di seguito si effettuano i calcoli del ΔT che si otterrebbe per flussi termici omogenei φ , tali che $\varphi \geq \varphi_{reale}$ in cui φ_{reale} rappresenta i valori di densità di potenza misurati. Si tende quindi a sovrastimare il ΔT sulla cella e a trascurare gli effetti dei gradienti di temperatura in direzione x e y , dovuti alla non omogeneità del flusso nel caso reale.

Nelle ipotesi sovrascritte ogni elemento 'cella-saldatura-supporto' rappresentato in Figura 4.4, ha il medesimo circuito termico rappresentato in Figura 4.6. Trascurando i transienti e quindi le capacità termiche, il circuito è solo resistivo ed i valori di resistenza termica sono calcolati a partire dalle conducibilità termiche, dai coefficienti convettivi e dalle dimensioni dei materiali utilizzati per realizzare il dissipatore che sono riportati nella tabella di Figura 4.8. insieme con i valori delle temperature T_A, T_B, T_C, T_D calcolati nel caso in cui l'ambiente sia acqua in moto forzato alla temperatura $T_{Amb.} = 20^\circ C$ (valori tipici del coefficiente convettivo h per fluidi in moto forzato vanno da $0,005 \div 2 \frac{W}{K \cdot cm^2}$).

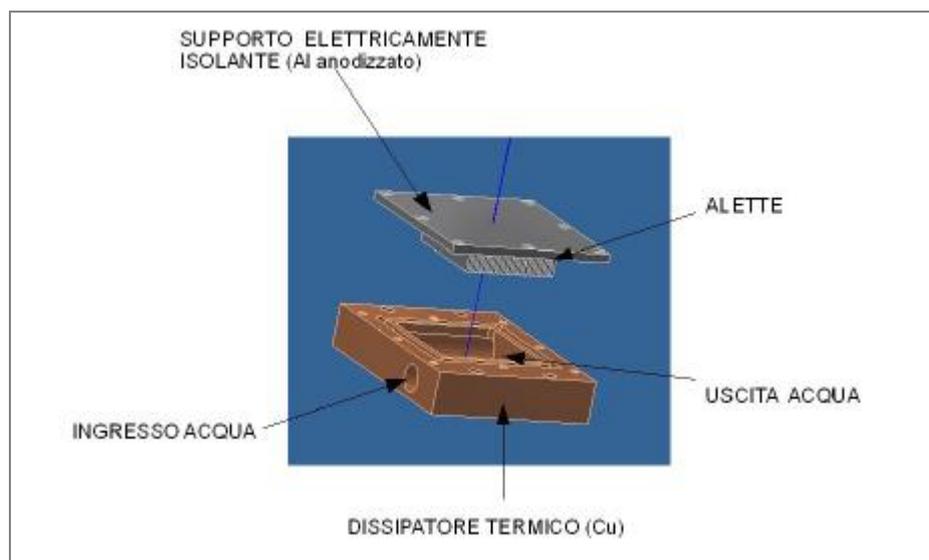


Figura 4.5 Progetto del dissipatore termico realizzato in laboratorio. L'immagine si riferisce alla versione utilizzata per effettuare le caratterizzazioni delle celle SPECTROLAB. Le specifiche sono riportate nel paragrafo 4.4.

E' opportuno puntualizzare che la resistenza termica della parte in rame è calcolata considerando l'area $s = 1 \text{ cm}^2$ e lo spessore $l = 0,3 \text{ cm}$, mentre nel calcolo della resistenza dovuta allo scambio termico convettivo tra il rame e il fluido, la superficie utilizzata è $s = 5 \text{ cm}^2$. Il supporto realizzato in laboratorio, Figura 4.5, è infatti fornito di 'alette di scambio' il cui scopo è proprio quello di diminuire la resistenza termica.

I dati di temperatura riassunti nella tabella di Figura 4.8 sono calcolati risolvendo lo schema termico in Figura 4.6 secondo l'eq.4.9, considerando una potenza incidente di $50 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$. La superficie della cella è $S \sim 1 \text{ cm}^2$ quindi il flusso termico che attraversa la cella è $\varphi = 50 \text{ W}$; il flusso termico attraverso i materiali a valle della cella: materiale di saldatura, supporto in rame e fluido è inferiore a quello incidente a causa della conversione del 35% del flusso in potenza elettrica. Inoltre una parte i' del flusso termico è irraggiata o scambiata con l'ambiente attraverso le resistenze $R_{\text{irraggiamento}}$ e $R_{\text{convettivo}}$.

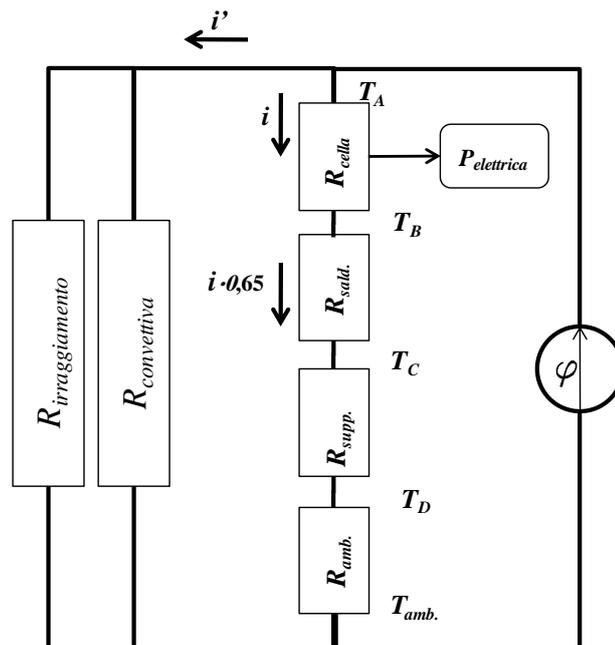


Figura 4.6 Circuito termico equivalente utilizzato per i calcoli delle temperature di interfaccia (vedi Figura 4.4 per i simboli). I valori ottenuti sono riassunti in tabella di Figura 4.8.

Le equazioni utilizzate per il calcolo sono:

$$eq. 4.9 \quad \begin{cases} \varphi = i + i' \\ i \cdot R_{cella} + i \cdot 0,65 \cdot (R_{sald.} + R_{supp.} + R_{amb.}) = i' \cdot \frac{(R_{sald.} \cdot R_{supp.})}{(R_{sald.} + R_{supp.})} \end{cases}$$

Risolvendo il sistema nell'eq.4.9 si ricavano i, T_A, T_B, T_C, T_D e quindi il ΔT della cella rispetto alla temperatura ambiente. Il termine di confronto con altri dissipatori è la resistenza termica per unità di superficie Z , relativa all'intero dissipatore. Per il dissipatore studiato si ottiene per Z :

$$eq. 4.10 \quad Z = \frac{\Delta T}{\varphi} = 3,36 \cdot 10^{-5} \frac{W}{K \cdot m^2}$$

Il valore di Z ottenuto è una stima e non è ancora stato misurato. Per ottenere resistenze termiche complessive inferiori, mantenendo la struttura del dissipatore studiata, si può, ad esempio, aumentare la portata del liquido di raffreddamento, utilizzare liquidi diversi dall'acqua ecc. Come detto nel caso dei fluidi in moto forzato il coefficiente convettivo h è in generale compreso tra $0,005 \div 2 \frac{W}{K \cdot cm^2}$. In Figura 4.7 è riportato l'andamento teorico della temperatura T_A , relativa alla temperatura superficiale della cella (vedi Figura 4.6 e Figura 4.4), per 3 valori del coefficiente convettivo h in funzione della potenza incidente. Il valore di Z nel caso in cui la radiazione incidente sia $50 W/cm^2$ e l'efficienza 35%, è rispettivamente $Z_{(h=0,1)} = 1,37 \cdot 10^{-4} \frac{W}{K \cdot m^2}$ e $Z_{(h=1)} = 2,06 \cdot 10^{-5} \frac{W}{K \cdot m^2}$.

I valori di Z ottenuti sono confrontabili con quelli riportati nella Ref. (4) per sistemi di raffreddamento analoghi.

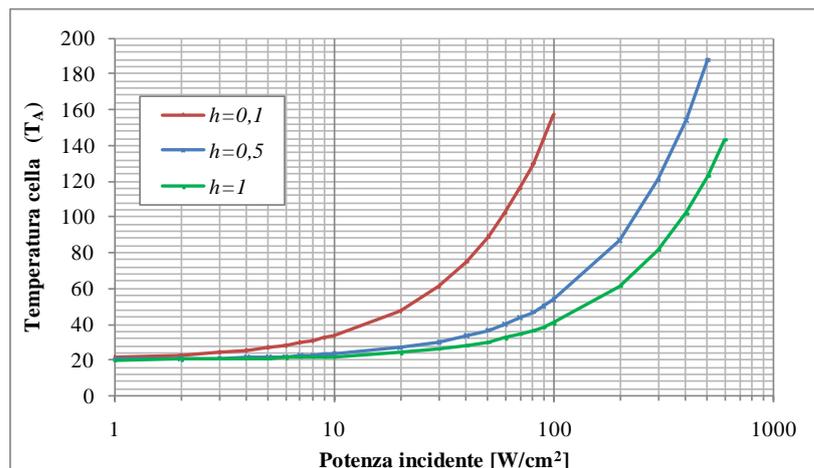


Figura 4.7 Andamento della temperatura superficiale della cella, T_A , in funzione della potenza della radiazione luminosa incidente espressa in W/cm^2 per il dissipatore analizzato. Le 3 curve corrispondono a 3 diversi valori di coefficienti convettivi h del fluido e quindi a 3 valori di resistenza termica Z nel range $1,37 \cdot 10^{-4} \frac{W}{K \cdot m^2} \div 2,06 \cdot 10^{-5} \frac{W}{K \cdot m^2}$

	materiale di riferimento	altezza (cm)	superficie (cm ²)	h (W/(cm ² K)) $\circ \chi$ (W/(K cm))	r_T	T
$R_{\text{irraggiamento}}$			1		1752.764	
$R_{\text{convettivo}}$	Aria		1	0.00155	645.161	
Cella	GaAs	0.01	1	0.55	0.018	36.784 T_A
Saldatura	Pasta per saldo brasatura	0.005	1	0.45	0.011	35.876 T_B
Supporto	Cu	0.3	1	3.86	0.078	35.515 T_C
Superficie a contatto con il fluido scambio			5	0.5	0.400	32.991 T_D
Ambiente	Acqua					20°C T_{amb}

Figura 4.8 Materiali, dimensioni e valori delle resistenze termiche utilizzate per calcolare le temperature ottenute, nel caso di un dissipatore in rame raffreddato ad acqua a $T=20^\circ\text{C}$ che monta celle SPECTROLAB C1MJ e irraggiato con densità di potenza uniforme 50 W/cm^2

4.3 Analisi del circuito stampato

Lo scopo del circuito stampato è quello di creare le connessioni tra le celle, utilizzando minor superficie possibile. Come detto, la sola presenza delle ‘bus bar’ sul top delle celle *C1MJ* determina un fattore 0,892 di riscaldamento dell’efficienza reale. Il problema è ancora maggiore se si intende realizzare array che contengono un numero elevato di celle in quanto le connessioni alle celle interne coprono necessariamente parte della superficie investita dalla radiazione solare.

I materiali scelti per realizzare il circuito stampato devono essere caratterizzati da un’ottima conducibilità termica e non influenzare la resistenza termica complessiva del dissipatore.

Inoltre, i materiali utilizzati come piste, devono possedere un’alta conducibilità elettrica, mentre i materiali utilizzati come strati isolanti tra le piste devono avere alta resistività elettrica. Gli spessori devono dunque essere determinati in modo da garantire entrambe le richieste. E’ infine importante considerare il fatto che ad ogni interfaccia layer-layer corrisponde una resistenza termica di contatto.

4.3.1 Layer di separazione

I materiali che si intende utilizzare come layer isolanti elettricamente sono *DLC* e *AlN*; i valori di conducibilità termica ed elettrica sono riportati nella tabella in Figura 4.9 e si riferiscono a materiali prodotti dalla ditta Sumitomo Electric Europe. Nel paragrafo si calcolano i ΔT determinati dal numero e dallo spessore dei layer isolanti depositati, quando il flusso di calore incidente sulla cella

fotovoltaica è di 50 W/cm^2 . Inoltre, si stima, nel caso di una array di 400 celle, la potenza elettrica dissipata attraverso i layer isolanti.

<i>AlN</i>		<i>DLC</i>	
χ [$\text{W}/[\text{K}\cdot\text{m}]$]	ρ [$\Omega\cdot\text{m}$]	χ [$\text{W}/[\text{K}\cdot\text{m}]$]	ρ [$\Omega\cdot\text{m}$]
180	1,00E+11	1000	5,00E+07

Figura 4.9 Tabella dei valori di conducibilità termica e resistività elettrica utilizzati per il calcolo dei ΔT dovuti agli strati isolanti di separazione e per il calcolo della potenza elettrica dissipata sugli stessi.

Il prototipo di concentratore solare che SolarTrento sta realizzando in collaborazione con il gruppo I.d.E.A. ha un'ottica primaria parabolica di superficie effettiva 20 m^2 . Le celle *C1MJ* hanno massima efficienza alla radiazione incidente di 50 W/cm^2 (500 *solis*) e quindi, considerando uno spettro incidente di densità di potenza di 1000 W/m^2 , il dissipatore deve avere una superficie di 400 cm^2 e ospitare circa 400 celle. Il layout dello stampato per il prototipo di 20 m^2 non è ancora stato progettato quindi le considerazioni che saranno fatte si riferiscono ad un circuito ipotetico.

Per evitare eccessive perdite di potenza sui cavi ipotizziamo di uscire dall'array con una corrente massima di circa 28 A. La corrente corrispondente al punto di massima potenza delle celle *C1MJ* (I_{MPP}) in condizioni ottimali è $\sim 7 \text{ A}$ dunque il circuito deve essere costituito da 4 serie di 100 celle, connesse in parallelo. La tensione corrispondente al punto di massima potenza della cella, V_{MPP} , è invece $\sim 3 \text{ V}$ è quindi la tensione d'uscita sul carico è $\sim 300 \text{ V}$ (questo è un esempio che ha l'unico scopo di condurre alle considerazioni di fine paragrafo e definire dei parametri di progettazione. Sia le tensioni che le correnti sono sovrastimate).

Considerato il numero elevato di celle, sembra plausibile dover realizzare uno stampato costituito da 10 layer isolanti elettricamente e 10 layer di piste, prelevando da un layer conduttivo i contatti di almeno 40 celle. Assumiamo inoltre che la differenza di potenziale media, tra i 2 layer conduttivi situati sopra e sotto ciascun layer isolante, sia di $\Delta V \sim 30 \text{ V}$, cioè corrisponda alla differenza di potenziale totale, divisa per il numero di layer conduttivi. Il valore di resistenza elettrica R del layer di materiale isolante e il ΔV , determinano la dissipazione di potenza:

$$\text{eq. 4.11} \quad \Delta P = \frac{\Delta V^2}{R}$$

Nei grafici in Figura 4.10 è riportato il ΔT calcolato su 10 strati di *AlN* e *DLC* rispetto allo spessore di 1 layer e con flusso termico di 50 W/cm^2 . Il confronto tra le 2 curve evidenzia come il *DLC* contribuisca meno all'innalzamento della temperatura della cella rispetto all'*AlN*. In entrambi i casi,

comunque, ed entro il range di spessori utilizzati ($1 \div 10 \mu\text{m}$), l'aumento di temperatura è inferiore a 1°C . Le dissipazioni di potenza elettrica di 10 strati isolanti di *AlN* e *DLC*, in funzione dello spessore del singolo layer sono riportati rispettivamente in Figura 4.11 e Figura 4.12. Per il calcolo della potenza dissipata sul singolo layer è stata utilizzata l'eq.4.11 e per R si è utilizzata la resistenza minima del layer isolante, calcolata considerando l'intera superficie del dissipatore, 400 cm^2 (è quindi stata stimata la massima perdita di potenza).

Si nota che, a causa della notevole differenza dei valori di resistività elettrica dei 2 materiali, la potenza elettrica dissipata attraverso 10 layer di spessore $1,1 \mu\text{m}$ è $6,55 \text{ W}$ per il *DLC*, e $0,0327 \text{ W}$ per l'*AlN*. A spessori di $0,1 \mu\text{m}$ il divario cresce ancora e la potenza dissipata è 70 W per il *DLC*, $0,35 \text{ W}$ per l'*AlN*.

I valori di potenza elettrica dissipata ottenuti e riportati in Figura 4.11 e Figura 4.12 sono volutamente sovrastimati e determinano il limite superiore cui si va incontro utilizzando layer di spessori indicati. Nella progettazione del layout dello stampato è necessario tenere conto di quanto detto e valutare la perdita di potenza a seconda della configurazione delle piste scelta relativamente alle tensioni previste. La perdita di potenza è localizzata solo tra layer conduttivi successivi, mentre è nulla tra piste adiacenti in quanto la resistenza elettrica lineare r_{eL} , sia del *DLC* che dell'*AlN*, interposto tra 2 piste (calcolata utilizzando piste di spessori compresi tra $0,1$ e $20 \mu\text{m}$, larghezza 1 cm che si affiancano per 20 cm alla distanza di 1 mm l'una dall'altra) è maggiore di $10^{10} \Omega$ in entrambi i casi.

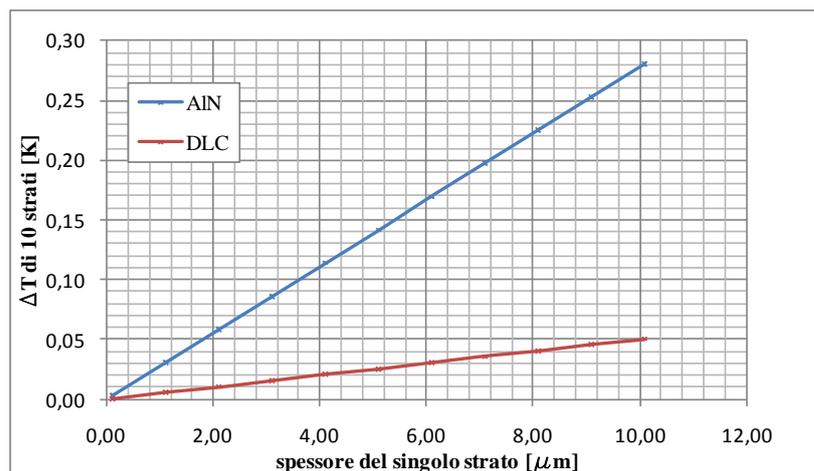


Figura 4.10 variazioni di temperatura dovuta a 10 strati di materiale isolante elettricamente in funzione dello spessore del singolo strato.

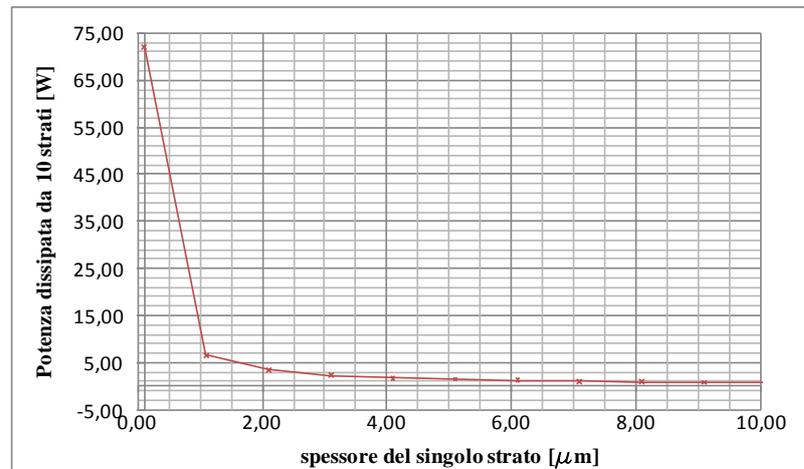


Figura 4.11 Potenza elettrica dissipata da 10 strati di DLC in funzione dello spessore del singolo strato. Nel calcolo si suppone una differenza di potenziale di 30 V

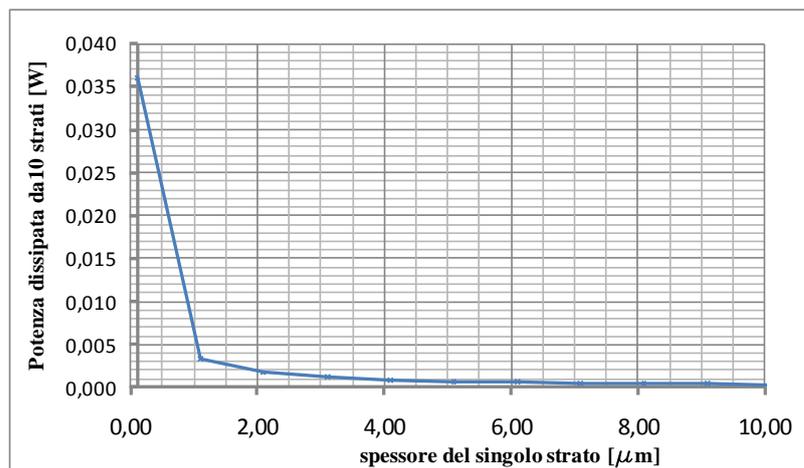


Figura 4.12 Potenza elettrica dissipata da 10 strati di AlN in funzione dello spessore del singolo strato. Nel calcolo si suppone una differenza di potenziale di 30 V

Concludendo, nella scelta del materiale da utilizzare come layer isolante, l'alta conducibilità termica del *DLC* rispetto a quella dell'*AlN* non sembra determinante, mentre, dal punto di vista delle dissipazione di potenza elettrica l'*AlN* presenta caratteristiche migliori. Tuttavia la perdita di potenza in termini assoluti è poco significativa e deve essere rapportata all'efficienza del sistema *CPV*. Ad esempio, riferendosi ad un array di 400 cm^2 , montato su un *CPV* con ottica primaria di superficie effettiva 20 m^2 ed efficienza complessiva compresa tra $20 \div 30 \%$, la potenza elettrica prodotta è nel range $4 \div 6 \text{ kW}$ (ci si sta riferendo ad uno spettro incidente con densità di potenza di 1000 W/m^2). Il calo di efficienza, dovuto alla dissipazione di potenza elettrica, sui layer isolanti è quindi compreso tra $1,7 \div 1,2 \%$ per il *DLC* (considerando 70 W di potenza dissipata) e trascurabile per

l'*AlN*. Va però considerato che nel caso di layer in *DLC*, sia la resistività elettrica che la conducibilità termica dipendono molto dai processi di produzione. Ad esempio in (17), deposizioni di *DLC* (*RF PE – CVD*) effettuate con parametri differenti producono valori di resistività elettrica minima $\rho \sim 3,5 \cdot 10^4 \Omega \cdot m$ e massima $\rho > 10^8 \Omega \cdot m$.

4.3.2 Layer conduttivi

Per layer conduttivo si intende un insieme di piste depositato sullo stesso layer isolante. Ogni pista deve essere opportunamente dimensionata in lunghezza (l) e spessore (h), affinché si mantenga una buona conduzione termica complessiva e una bassa resistenza elettrica. Le piste che si intendono depositare hanno dimensioni di $1 \text{ cm} \times 10 \mu\text{m}$ ($L \times h$), quindi la resistenza elettrica vale:

$$\text{eq. 4.12} \quad R = 10^7 \rho \cdot l$$

La potenza dissipata in funzione della lunghezza è:

$$\text{eq. 4.13} \quad P = I^2 \cdot R = I^2 \cdot 10^7 \cdot \rho \cdot l$$

in cui ρ è la resistività elettrica del materiale utilizzato per realizzare la pista ed l la lunghezza della pista. I valori di resistività elettrica di *Ag*, *Cu* o *Al* sono rispettivamente $1,59 \cdot 10^{-8}$, $1,7 \cdot 10^{-8}$, $2,82 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.

Nella stima cominciata nel paragrafo precedente, la corrente massima in un ramo del circuito, costituito da 100 celle in serie, è stata fissata a $\sim 7 \text{ A}$. Non avendo progettato il layout assumiamo che la lunghezza media delle piste relativa ad un ramo del circuito sia compresa tra $10 - 50 \text{ cm}$. Le potenze elettriche dissipate sui 4 rami del circuito, calcolate per i vari materiali proposti e considerando lo spessore $10 \mu\text{m}$ di sono:

$$P_{Cu} = 3,48 \div 17,44 \text{ W}, \quad P_{Al} = 5,63 \div 27,64 \text{ W}, \quad P_{Ag} = 3,12 \div 15,58 \text{ W}.$$

Lo stesso calcolo effettuato con piste di spessore di $1 \mu\text{m}$ porta invece a valori di potenza dissipata 10 volte maggiori e dunque sembra opportuno depositare piste con spessori $h > 10 \mu\text{m}$.

Anche in questo caso però, è opportuno valutare i valori di potenza dissipata calcolati sopra rispetto alla potenza elettrica totale prodotta. Ad esempio, riferendosi ad un array di 400 cm^2 , montato su un *CPV* con ottica primaria di superficie effettiva 20 m^2 ed efficienza complessiva del 20 %, la potenza elettrica prodotta è circa 4 kW (ci si sta riferendo ad uno spettro incidente con densità di potenza di 1000 W/m^2). Nel caso le piste siano realizzate con spessore $h = 1 \mu\text{m}$ di *Al*, la potenza dissipata sulle piste è $P_{Al} = 56,3 \div 276,4 \text{ W}$ a seconda della lunghezza media delle piste, dunque la perdita di efficienza nei 2 casi è rispettivamente del 2,74 % e del 6,07 %. Nel caso le piste siano realizzate di

spessore $h = 10 \mu m$ di Al la dissipazione di potenza è 10 volte inferiore e la perdita di efficienza risulta inferiore allo 0,7 % in entrambi i casi.

Per quanto riguarda la conduzione termica, data l'alta conducibilità termica di Ag , Cu o Al (430, 390, $236 \frac{W}{mK}$) il ΔT di 10 strati di piste sottoposto ad un flusso di $50 W/cm^2$ è sicuramente inferiore a quello calcolato per l' AlN ($\chi = 180 \frac{W}{mK}$), riportato nel grafico di Figura 4.10 in funzione dello spessore di 1 strato. L' Ag sembra quindi il miglior candidato, sia per la maggior conducibilità termica che per l'alta conducibilità elettrica.

4.3.3 Resistenze termiche di contatto

La resistenza termica di contatto fra 2 materiali è usualmente modellizzata con microcontatti separati da interstizi occupati da aria, gas o, come più probabile nel nostro caso, vuoti, poiché la deposizione dei vari strati è ottenuta per sputtering o evaporazione in vuoto. Il modello assume un flusso termico di tipo conduttivo nelle zone dei microcontatti e per irraggiamento negli interstizi vuoti, e il valore della resistenza termica di contatto dipende da diversi parametri come pressione del contatto, rugosità delle superficie di contatto, situazione negli interstizi ecc. Nel nostro caso è possibile misurare la rugosità della 1° superficie depositata, ma non è chiaro cosa accade con la deposizione della successiva, ovvero, in che percentuale siano riempite le eventuali 'asperità' presenti sulla prima.

Non sono state trovate informazioni in letteratura riguardanti le resistenze termiche di contatto di layer $DLC - Cu/Ag/Al$ o $AlN - Cu/Ag/Al$, ma sono stati raccolti dati utili ad una prima stima dell'ordine di grandezza del ΔT , che la resistenza termica di contatto alle interfacce di deposizione potrebbe provocare.

Nella tabella in Figura 4.13, riportata dalla Ref. (18) sono raccolti i coefficienti di contatto h_C riferiti a diversi materiali posti in contatto fra loro in varie condizioni di pressione, rugosità ecc. Per tutti questi valori, un flusso di $50 \cdot 0,65 W/cm^2$ (lo 0,65 tiene conto del fatto che 0,35 del flusso è convertito in potenza elettrica dalla cella) determina per ogni interfaccia un $\Delta T > 7^\circ C$.

Tuttavia, i layer che si intendono depositare hanno spessori nel range $1 \div 10 \mu m$, quindi, in relazione alla Ref. (19), un valore più probabile della resistenza termica di contatto potrebbe essere dell'ordine di grandezza di $10^{-7} \frac{m^2 K}{W}$. Nella Ref. (19) è stata misurata la resistenza termica di un coating di $0,23 \mu m$ di Cu depositato con *RF planar sputtering* su substrato di Al_2O_3 (allumina); nel caso di semplice pulizia del substrato con etanolo si è misurato $1,38 \cdot 10^{-7} \frac{m^2 K}{W}$, mentre nel caso

di pulizia con bombardamento ionico è stato misurato $6,2 \cdot 10^{-8} \frac{m^2 K}{W}$. Lo spessore del coating considerato è però molto inferiore rispetto a quello previsto per le nostre deposizioni. Il grafico in Figura 4.14, riportato da Ref. (20), mostra l'andamento della resistenza termica di contatto espressa in $\frac{m^2 K}{W}$, in funzione dello spessore di film di Au depositati su substrato di Al_2O_3 . Osservando il grafico in Figura 4.14 è plausibile, per spessori di $1 \mu m$, attendersi valori della resistenza termica di contatto prossimi a $5 \cdot 10^{-7} \frac{m^2 K}{W}$, mentre, con spessori di $10 \mu m$, si ottengono valori prossimi a $280 \cdot 10^{-7} \frac{m^2 K}{W}$ (quest'ultimo valore è più incerto in quanto ricavato facendo un fit lineare degli ultimi 3 punti della curva in Figura 4.14). Anche se i valori sono riferiti a materiali differenti possono essere utili per la stima a cui si vuole arrivare. Se i layer sono di spessore $1 \mu m$ e il flusso termico è $50 \cdot 0,65 W/cm^2$, si ottiene che ogni interfaccia layer-layer causa un $\Delta T = 0,17^\circ C$. Se i layer sono di spessore $10 \mu m$, con lo stesso flusso termico, si ottiene $\Delta T = 9,1^\circ$; si nota che il valore ottenuto è in linea, come ordine di grandezza, con il $\Delta T > 7^\circ C$, ottenuto utilizzando i coefficienti h_c riportati dalla Ref. (18).

situation	$h_c \quad W/(m^2 K)$		ΔT 1 strato (thermal flux= $50 \cdot 0,65 W/cm^2$)	
	min	max		
Iron/aluminum(70 atm)	45000		7,22	
Copper/copper	10000	25000	32,50	13,00
aluminum/aluminum	2200	12000	147,73	27,08
Graphite/metals	3000	6000	108,33	54,17
Ceramic/metals	1500	8500	216,67	38,24
Stainless steel/Stainless steel	2000	3700	162,50	87,84
Ceramic/ceramic	500	3000	650,00	108,33
Stainless steel/Stainless steel (evacuated interstices)	200	1100	1625,00	295,45
aluminum/aluminum (low pressure and evacuated interstices)	100	400	3250,00	812,50

Figura 4.13 In tabella sono riportate dalla Ref. (18) alcune resistenze termiche di contatto tra diversi materiali e in varie condizioni. Nella colonna a destra, per ogni coppia di materiali, si è calcolato il ΔT all' interfaccia considerando un flusso termico di $50 \cdot 0,65 W/cm^2$.

Il sistema *CPV* che il gruppo *I.d.E.A* sta realizzando con SolarTrento dovrebbe avere le seguenti caratteristiche: almeno $4 kW$ di potenza elettrica, dissipatore con circa 400 celle saldate, 10 layer isolanti e 10 di piste. Dalle considerazioni fatte sulla resistenza di contatto e dalla discussione fatta nei paragrafi 4.3.1 e 4.3.2 sulle temperature e sulle potenze elettriche dissipate, si conclude che $1 \mu m$ possa essere lo spessore più idoneo sia per quanto riguarda i layer conduttivi che quelli isolanti.

Poiché al momento si è ancora alla fase sperimentale di deposizione dei film (vedi paragrafo 4.4), non è ancora stata effettuata una caratterizzazione della resistenza termica totale del sistema ‘dissipatore- layer conduttivi- layer isolanti’, ma si è deciso di realizzare un semplice apparato, al momento in fase di progettazione, per la misura della resistenza termica di contatto. Nel caso l’esito della prova di resistenza termica di contatto fra i layer fosse negativo, per il proposito di realizzare un circuito stampato sul dissipatore, sarà necessario pensare alla possibilità di ‘crescere’ i diversi layer uno sull’altro orientandosi probabilmente verso diversi materiali e diverse tecniche. Il prossimo paragrafo descrive i test sperimentali condotti in laboratorio, relativi alla deposizione dei layer.

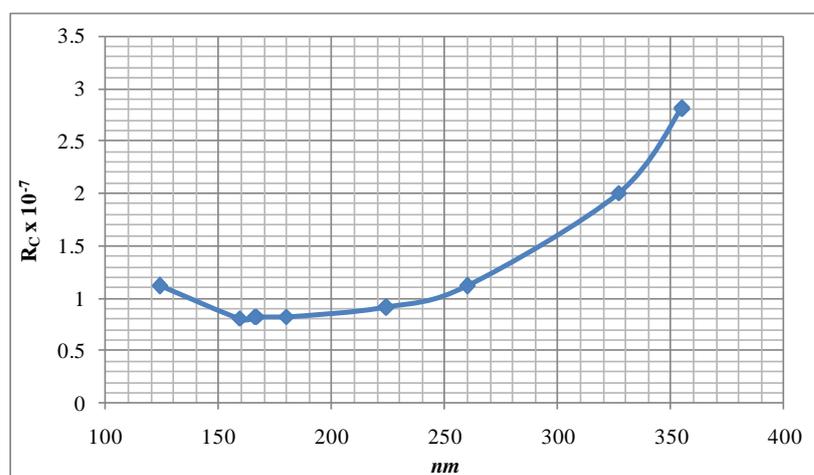


Figura 4.14 Andamento della resistenza di contatto in funzione dello spessore di un film sottile di Au depositato su substrato di Allumina; riportato dalla Ref. (20).

4.4 Dati sperimentali

Come detto nel paragrafo 4.1, si vuole realizzare un dissipatore termico e su questo depositare un circuito stampato ‘multilayer’, analogamente a quanto si fa per le schede elettroniche. Lo scopo è di effettuare le connessioni tra celle o tra le celle e l’esterno, riducendo la superficie di dissipatore non coperta da materiale fotovoltaico.

Si è deciso di realizzare le piste del circuito stampato con evaporazioni di materiali elettricamente conduttivi come *Cu* o *Ag*, e di realizzare gli strati di separazione tra le piste con deposizioni di layer in materiali elettricamente isolanti come ad esempio *DLC* e *AlN*. Tutti i materiali devono avere comunque elevata conducibilità termica per non aumentare eccessivamente la resistenza termica complessiva del dissipatore (vedi paragrafo 4.2.2). Nei paragrafi 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, sono stati

analizzati, l'incremento di temperatura e la dissipazione di potenza elettrica, provocati da 10 layer isolanti in *DLC* e *AlN*, la dissipazione di potenza elettrica provocata da 10 layer di piste in *Cu*, *Al*, *Ag*, e l'effetto delle resistenze termiche di contatto alle interfacce.

Al momento i test condotti in laboratorio, riguardano una prima versione del dissipatore in cui lo stampato è costituito da un solo layer di materiale isolante sul quale è stata fatta una successiva evaporazione delle piste, in *Cu*. A tal fine è stato costruito un dissipatore in rame (vedi Figura 4.15) sulla cui superficie è stato depositato il coating isolante e quindi sono state evaporate le piste in rame. Infine le celle *C1MJ* della *SPECTROLAB* sono state applicate sul circuito mediante saldobrasatura a stagno.

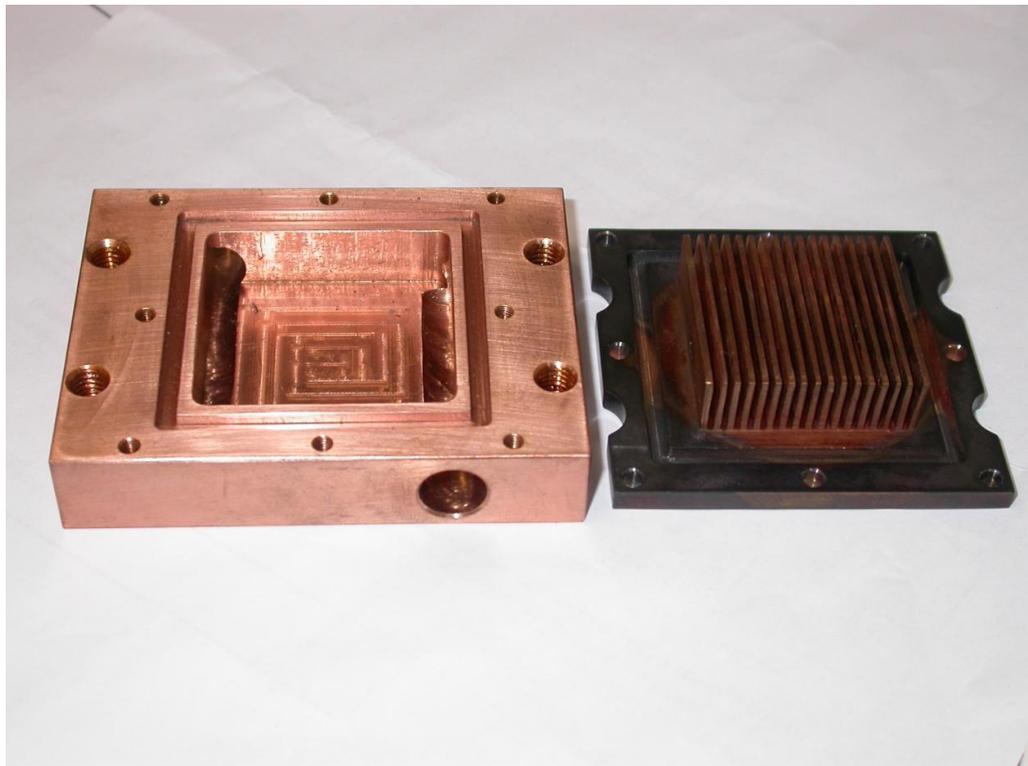


Figura 4.15 Dissipatore in rame realizzato in laboratorio. A sinistra: supporto in cui scorre il fluido di raffreddamento, realizzato in rame. A destra: corpo in rame sui cui sono stati effettuati i coating, le evaporazioni e quindi saldate le celle.

Nelle prime versioni il coating isolante è stato ottenuto in laboratorio con la tecnica di *SPUTTERING* utilizzando *AlN* (conducibilità termica $\chi = 180 \frac{W}{k \cdot m}$, resistività elettrica $\rho = 10^{11} \Omega m$). I di test di conducibilità condotti hanno però dato esito negativo in quanto le piste in rame, evaporate successivamente sul coating di *AlN*, risultavano cortocircuitate con il corpo in rame del dissipatore.

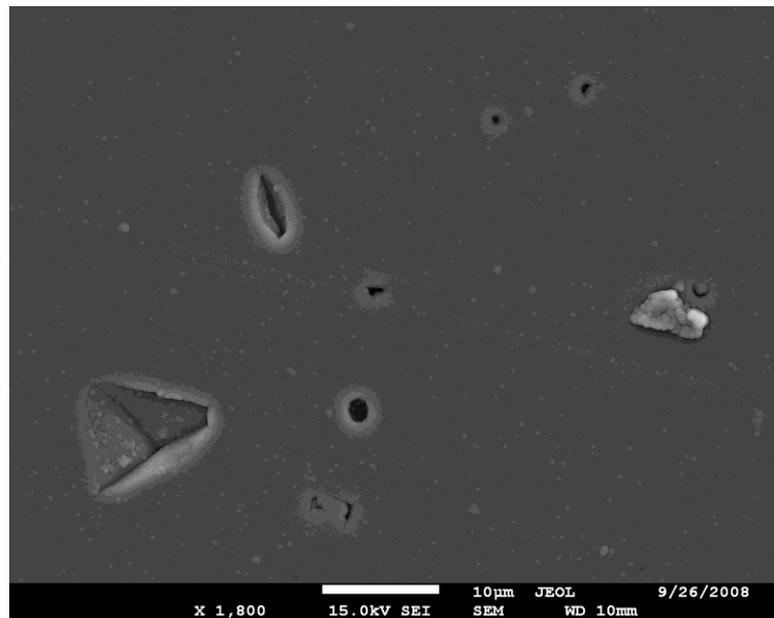


Figura 4.16 Superficie del coating di AlN sul corpo in rame del dissipatore. In figura sono evidenti i pin-hole, responsabili del corto circuito tra piste depositate e corpo in rame del dissipatore.

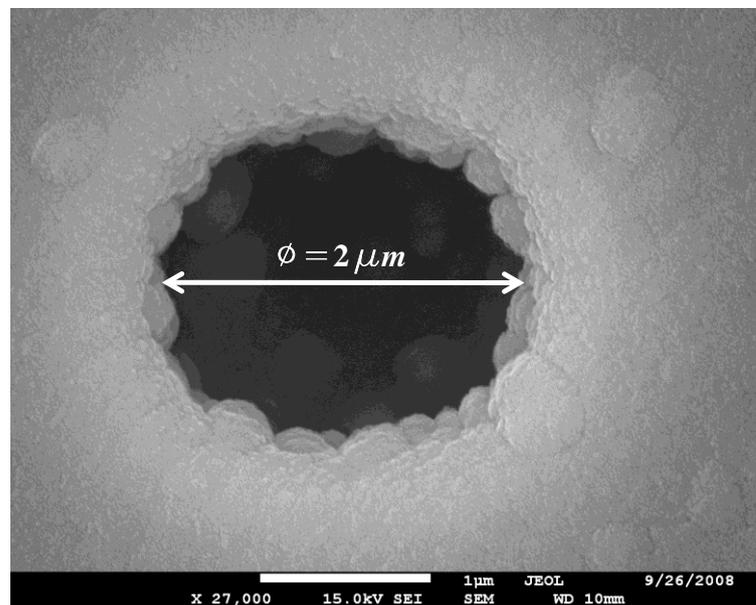


Figura 4.17 Ingrandimento di un pin-hole sul coating di AlN . Il diametro è mediamente di $2 \mu m$. La formazione è dovuta alla presenza di difetti sulla superficie di deposizione del corpo in rame del dissipatore.

Successive analisi al *SEM* hanno evidenziato che sul coating di AlN depositato erano presenti numerosi pin-hole e difetti (densità approssimativa: $350 \frac{pin\ hole}{mm^2}$; vedi Figura 4.16 e Figura 4.17)

che permettevano al rame evaporato per realizzare le piste, di raggiungere il corpo del dissipatore. Lo spessore medio dei coating in AlN depositati in questa prima fase è $\sim 1 \mu m$. Viste le complessità di deposizione descritte sopra si è deciso di procedere in 2 diverse direzioni:

1. risoluzione delle problematiche della realizzazione dei coating, con nuove prove di deposizione condotte in laboratorio ma anche testando deposizioni effettuate da ditte esterne,
2. realizzazione di un primo dissipatore con prestazioni limitate, cioè realizzato con materiali a minor conducibilità termica, ma che ci ha permesso di testare le celle utilizzando l'ottica primaria realizzata in università, descritta nel capitolo 2.

Per quanto riguarda il punto 2, il corpo del dissipatore è stato realizzato in alluminio e la superficie è stata anodizzata ottenendo uno strato superficiale di allumina (Al_2O_3). La conducibilità termica dell'allumina è $\chi = 36 \frac{W}{K \cdot m}$ e la resistività elettrica $\rho = 10^{12} \Omega m$. Sulla superficie sono quindi state depositate le piste in rame (vedi Figura 4.18) che sono risultate essere totalmente isolate l'una dall'altra e dal corpo in alluminio. Con questo prototipo di dissipatore siamo riusciti a condurre i test con più celle, descritti nella Ref. (7), mantenendo le celle a temperatura ambiente.

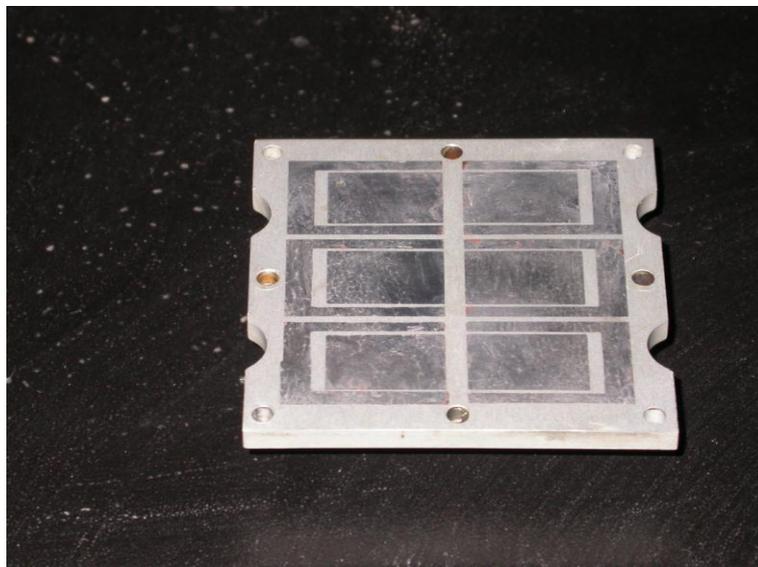


Figura 4.18 Dissipatore utilizzato per i test sulle celle, riportati nella Ref. (7). Il dissipatore è realizzato in alluminio con superficie anodizzata (allumina, Al_2O_3). Si distinguono le piste in rame evaporate sullo strato di allumina e successivamente stagnate.

Per quanto riguarda il punto 1., la ricerca di un coating isolante ha portato a testare vari materiali; i coating sono stati realizzati, sia dal laboratorio I.d.E.A, che da aziende esterne (*ARGOR, Lafer*).

All'interno del laboratorio sono stati prodotti e testati film in AlN , MgO , SiO_2 , mentre le 2 aziende esterne hanno depositato, coating in DLC .

I nuovi film in AlN , MgO e SiO_2 , prodotti in laboratorio erano di spessore compreso tra $1 \div 4 \mu m$, e hanno dato problemi di conducibilità elettrica simili a quelli descritti per il primo coating in AlN , ovvero il film depositato non garantiva un buon isolamento elettrico a causa della formazione di pin-hole. La formazione dei pin-hole è stata attribuita alla presenza di inclusioni sulla superficie del corpo in rame, su cui è stato effettuato il coating. La presenza delle inclusioni non sembra dipendere dal tipo di lavorazione o trattamento subito prima della deposizione. Al momento, infatti, lo stesso effetto è stato riscontrato depositando i coating su rame sia di tipo 'commercial grade', che 'OFHC grade', diversi per grado di purezza e finitura della superficie, entrambi trattati in laboratorio con lappatura. Non è stata comunque esclusa completamente la possibilità che eventuali trattamenti possano ridurre le inclusioni nel rame, responsabili dei pin-hole.

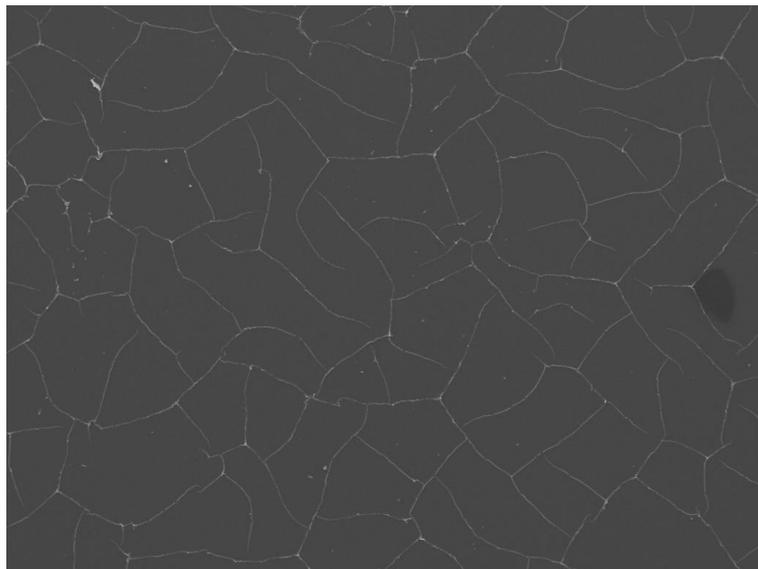


Figura 4.19 Coating in AlN di spessore $3 \mu m$. Sono visibili le linee di rottura causate dallo stress meccanico derivante dal mismatch reticolare tra Cu e AlN .

Per cercare di risolvere il problema della formazione dei pin-hole sono state effettuate alcune deposizioni di film in AlN aumentando lo spessore del coating. I coating realizzati con queste prove avevano superfici caratterizzate da molteplici linee di rottura, (vedi Figura 4.19, relativa ad uno spessore del coating di $3 \mu m$) causate molto probabilmente dallo stress meccanico cui il coating è sottoposto a causa del mismatch reticolare rispetto al Cu , con cui invece è realizzato il corpo del dissipatore. Contemporaneamente le aziende esterne hanno realizzato sullo stesso dissipatore dei

coating in *DLC* prodotti tramite *PVD* e *CVD*. Gli spessori ottenibili con tecniche *PVD* sono dell'ordine del micron mentre con *CVD* è possibile ottenere spessori di qualche micron. Inoltre con la tecnica *CVD* è possibile ottenere *DLC* in cui la frazione di carbonio *sp3* è prossima al 100% e quindi il *DLC* che si ottiene ha caratteristiche simili a quelle del diamante, ovvero alta conducibilità termica e alta resistività elettrica, mentre con tecniche *PVD*, il *DLC* prodotto contiene una frazione di carbonio *sp2* intorno al 10%, e quindi è possibile riscontrare nel *DLC* caratteristiche simili alla grafite, come ad esempio, la non desiderata, alta conducibilità elettrica.

La ditta *ARGOR* ha realizzato il *DCL* per *PVD*, mentre la ditta *Lafer* per *CVD*. Allo stato attuale sembra che i risultati migliori (di conducibilità elettrica) siano dati dal coating in *DLC* depositato per *CVD* dalla ditta *Lafer* (vedi Figura 4.20), sul quale tuttavia non sono ancora state depositate le piste elettriche per il test con le celle. Lo spessore dichiarato dall'azienda è compreso tra $2 \div 4 \mu m$.

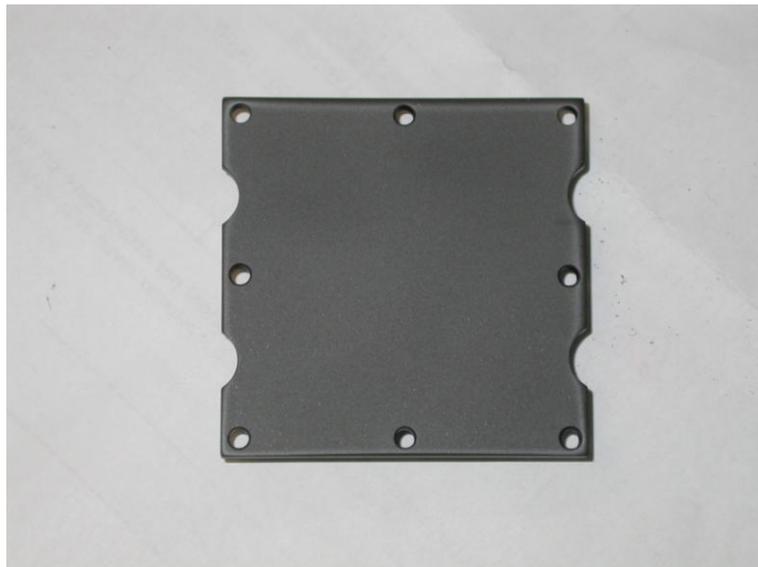


Figura 4.20 Coating in *DLC* effettuato dalla ditta *Lafer*. Lo spessore dichiarato è compreso tra $2 \div 4 \mu m$. Manca ancora l'evaporazione delle piste in rame.

Sul coating di *DLC*, realizzato dalla ditta *ARGOR*, sono state invece evaporate le piste in rame, ma sono stati riscontrati problemi di conducibilità analoghi a quelli incontrati con i film depositati in laboratorio e descritti in precedenza. La scheda tecnica del coating in *DLC* realizzato dalla ditta *ARGOR* dichiara spessori nel range di $0,005 \div 3 \mu m$, resistività elettrica $\rho = 10^7 \div 10^9 \Omega m$ e frazione *sp3* compresa tra $85 \div 95\%$. E' probabile che, sia la bassa frazione di carbonio *sp3*, sia spessori potenzialmente troppo sottili conducano ai risultati ottenuti.

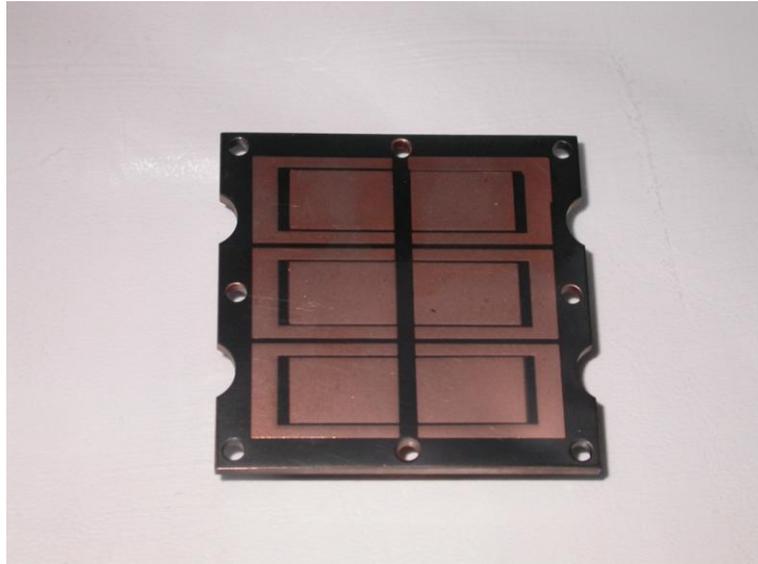


Figura 4.21 Dissipatore con coating in DLC effettuato dalla ditta ARGOR e piste in rame evaporate in laboratorio. Le piste risultano cortocircuitate al corpo in rame del dissipatore.

In conclusione, l'obiettivo di produrre il circuito stampato, costituito da un solo layer isolante e un solo layer di piste, non è ancora stato raggiunto, ma l'idea di produrre i coating in laboratorio è ancora valida, e al momento si stanno elaborando diverse soluzioni.

Il coating migliore, al momento sembra essere quello in *DLC* prodotto dalla ditta *Lafer* (vedi Figura 4.20). Se, dopo l'evaporazione delle piste in rame, il coating risulterà effettivamente isolante, allora potremo passare ai test di resistenza termica, effettuati in particolare, per verificare il discorso fatto nel paragrafo 4.3.3 relativo alle resistenze termiche di contatto. Infine, l'esito positivo dei test è determinante rispetto alla possibilità di proseguire in questa direzione nella realizzazione del dissipatore. Se al contrario si verificasse un'innalzamento eccessivo della resistenza termica complessiva del dissipatore, una possibile alternativa, mantenendo l'idea di minimizzare la superficie persa per le connessioni, sarebbe la realizzazione di un dissipatore modulare, cioè ogni cella sarebbe montata sul proprio dissipatore di 1 cm^2 , provvisto di ingresso e uscita del fluido refrigerante e dal quale si dovrebbe riuscire ad estrarre i contatti della cella. I vari moduli sarebbero poi composti per formare l'array di celle.

Capitolo 5

Studio dell'efficienza complessiva del concentratore

5.1 Introduzione

Avendo caratterizzato una porzione di $0,337 m^2$ del nostro settore parabolico (forma dello spot, e densità di potenza) in questo capitolo verrà riportata la valutazione dell'efficienza di un concentratore la cui ottica primaria è costituita unicamente da tale porzione, ma la procedura e il principio di valutazione sono estendibili a qualsiasi tipo di concentratore una volta effettuate le caratterizzazioni dello spot prodotto dall'ottica, come riportato nel capitolo 2. Per la valutazione si tiene anche conto dei test effettuati e descritti nel capitolo 3, riguardanti la connessione delle celle dell'array (connessione di 2° tipo) e delle valutazioni sul dissipatore termico esposte nel capitolo 4.

Si ipotizza infine che l'array sia realizzato con celle fotovoltaiche *C1MJ* della *SPECTROLAB* e che sia posizionato alla stessa distanza utilizzata per la caratterizzazione dello spot descritta nel capitolo 2 (80 mm fuori fuoco): questa scelta è stata fatta per non introdurre errori nell'analisi, utilizzando valori realmente misurati e quindi fornire una valutazione di efficienza attendibile.

Per effettuare la stima di efficienza in condizioni di insolazione differenti rispetto a quelle delle misure descritte nel paragrafo 2.3.3, saranno calcolati i valori di concentrazione locale C_{XY} definita nel paragrafo 2.3.4, eq.2.16, utilizzando i valori di potenza e di densità dello spot incidente relativi alla misura 3 descritta nel paragrafo 2.3.3.

5.2 Configurazione del concentratore

Dall'analisi dello spot prodotto da un settore parabolico condotta nel paragrafo 2.3.3, si è concluso che la procedura di realizzazione degli specchi è effettivamente adatta per ottenere curvature paraboliche durature nel tempo. Inoltre l'analisi allo spettrofotometro della riflettività dello specchio, in relazione allo spettro *A.M. 1.5D*, discussa nel paragrafo 2.2, porta ad una riflettività complessiva $R_C = 87,6 \pm 0,5\%$.

L'efficienza complessiva del concentratore è :

$$eq. 5.1 \quad \varepsilon = \frac{P_N}{P_{in}}$$

in cui P_{in} è la potenza di spettro solare intercettata dalla superficie effettiva del paraboloide e P_N è la potenza elettrica netta generata. Si sviluppa ora l'efficienza complessiva, ε allo scopo di evidenziare i fattori che la compongono. Tali fattori sono legati alle caratteristiche del concentratore, alla realizzazione dell'array e al circuito elettrico, e verranno discussi più approfonditamente nei paragrafi successivi. Il primo sviluppo consiste nel riscrivere l'efficienza complessiva ε come segue:

$$eq. 5.2 \quad \varepsilon = \frac{P_{RIFL}}{P_{in}} \cdot \frac{P_{Area}}{P_{RIFL}} \cdot \frac{P_N}{P_{Area}} = R_C \cdot \beta \cdot \frac{P_N}{P_{Area}}$$

in cui P_{Area} è la potenza incidente sull'area in cui si sceglie di collocare le celle e P_{RIFL} è la potenza effettivamente riflessa dall'ottica. Il primo termine al 2° membro è la riflettività dello specchio, mentre β è stato introdotto in quanto può non essere conveniente intercettare tutta la potenza riflessa; infatti l'impiego di materiale attivo in regioni a bassa densità di potenza può non essere ripagato da un aumento consistente nella potenza elettrica netta.

Per un ulteriore sviluppo dell'efficienza complessiva ε , considero il caso in cui l'array sia costituito da G rami connessi in parallelo tra loro e con il carico, e ciascun ramo costituito da M celle connesse in serie fra loro in configurazione di 2° tipo (vedi paragrafo 3.2.3). La potenza elettrica netta può essere scritta come la somma delle potenze nette generate dai G rami che costituiscono l'array: $P_N = P_{N_A} + P_{N_B} + P_{N_C} + \dots + P_{N_G}$ e l'eq.5.2 diventa:

$$eq. 5.3 \quad \varepsilon = R_C \cdot \beta \cdot \frac{P_{N_A} + P_{N_B} + P_{N_C} + \dots + P_{N_G}}{P_{Area}}$$

Si prosegue quindi, dividendo l'efficienza dei vari rami del circuito. Sviluppando l'eq.5.3 si ottiene quindi:

$$eq. 5.4 \quad \varepsilon = R_C \cdot \beta \cdot \left(\frac{P_{Area}^A}{P_{Area}} \cdot \frac{P_{N_A}}{P_{Area}^A} + \dots + \frac{P_{Area}^G}{P_{Area}} \cdot \frac{P_{N_G}}{P_{Area}^G} \right) = \\ = R_C \cdot \beta \cdot \left(g_A \cdot \frac{P_{N_A}}{P_{Area}^A} + \dots + g_G \cdot \frac{P_{N_G}}{P_{Area}^G} \right)$$

in cui il termine P_{Area}^A è la potenza riflessa sulla superficie occupata dalle celle del ramo A e g_A è quindi la frazione di radiazione riflessa che viene intercettata dalla regione di array dedicata alle celle del ramo A (celle, connessioni ecc...). Occorre quindi considerare che le celle non possono essere collocate l'una adiacente all'altra, in quanto è richiesto un minimo spazio per realizzare meccanicamente le connessioni, fra celle o con l'esterno. Diciamo che si è scelto di realizzare l'array in modo che ogni cella occupi un quadrante S di area $A_S > A_{Att}$, in cui A_{Att} è l'area attiva del

dispositivo fotovoltaico. L'eq.5.4 può allora essere ulteriormente sviluppata introducendo la potenza che effettivamente colpisce l'area attiva delle celle appartenenti al ramo A , $P_{Area}^{A,Att}$; si ottiene:

$$eq. 5.5 \quad \varepsilon = R_C \cdot \beta \cdot \left(g_A \cdot \frac{P_{Area}^{A,Att}}{P_A} \cdot \frac{P_{NA}}{P_{Area}^{A,Att}} + \dots \right) = R_C \cdot \beta \cdot \left(g_A \cdot f_C \cdot \frac{P_{NA}}{P_{Area}^{A,Att}} + \dots \right)$$

in cui, al terzo membro, f_C è il fattore di intercettazione relativo ad una cella di area A_{Att} collocata in un quadrante di area A_S .

Lo sviluppo dell'efficienza complessiva ε , prosegue tenendo conto degli effetti legati al circuito di trasferimento di potenza al carico che si intende utilizzare. L'efficienza di trasferimento di potenza al carico, ε_T è stata definita con l'eq.3.1, nel capitolo 3 e che riportiamo per comodità:

$$eq. 5.6 \quad \varepsilon_T = \frac{P_N}{P_{MAX}}$$

Proseguendo lo sviluppo si ottiene:

$$eq. 5.7 \quad \varepsilon = R_C \cdot \beta \cdot \left(g_A \cdot f_C \cdot \frac{P_{MAX,A}}{P_{Area}^{A,att}} \cdot \frac{P_{NA}}{P_{MAX,A}} + \dots \right) = R_C \cdot \beta \cdot \left(g_A \cdot f_C \cdot \tilde{\varepsilon}_A^{MAX} \cdot \varepsilon_{T_A} + \dots \right)$$

in cui, $P_{MAX,A}$ è la massima potenza che le celle del ramo A potrebbero fornire qualora fossero connesse ciascuna al proprio carico ideale: $\frac{V_{MPP}}{i_{MPP}}$ (rispetto alle condizioni operative del momento) e quindi $\tilde{\varepsilon}_A^{MAX}$ è l'efficienza massima del ramo A , ottenibile qualora tutte le celle fossero connesse ciascuna al proprio carico ideale (rispetto alle condizioni operative del momento). ε_{T_A} è invece l'efficienza di trasferimento di potenza al carico, relativa al ramo A . Questo argomento è stato ampiamente discusso nel capitolo 3.

Per concludere occorre tener conto che se la densità di potenza incidente su una cella non è omogenea, ma è caratterizzata da un forte gradiente di concentrazione, l'efficienza della cella diminuisce per l'instaurarsi di correnti trasversali interne alla cella stessa. Assumiamo che, in presenza di gradiente, e con densità di potenza media sulla cella $\langle \rho \rangle$, valga la relazione $\tilde{\varepsilon} = f_g \cdot \varepsilon(\langle \rho \rangle)$, in cui il parametro $f_g < 1$ è indipendente dall'intensità del gradiente e dal valor medio della densità di potenza incidente sulla cella $\langle \rho \rangle$, e $\varepsilon(\langle \rho \rangle)$ è l'efficienza della cella qualora fosse investita da una densità di potenza omogenea $\langle \rho \rangle$.

Con queste ipotesi sul parametro f_g (indipendenza dall'intensità del gradiente e dalla densità media di potenza incidente), l'efficienza elettrica del ramo A , $\tilde{\varepsilon}_A^{MAX}$ può essere scritta come segue: $\tilde{\varepsilon}_A^{MAX} = f_g \cdot \varepsilon_A^{MAX}$ in cui ε_A^{MAX} è l'efficienza del ramo A calcolata considerando omogenea la potenza incidente su ogni cella.

L'eq.5.7 può quindi essere riscritta per tutti i G rami del circuito, e diventa:

$$eq. 5.8 \quad \varepsilon = R_C \cdot \beta \cdot f_C \cdot f_g \cdot (g_A \cdot \varepsilon_A^{MAX} \cdot \varepsilon_{T_A} + \dots + g_G \cdot \varepsilon_G^{MAX} \cdot \varepsilon_{T_G})$$

E' da notare che, nell'eq.5.8, il termine f_C è raccolto a fattore comune in quanto, le celle dei vari rami sono identiche, ovvero hanno la stessa area attiva, A_{Att} e i quadranti S in cui sono collocate le celle dei vari rami hanno la stessa area A_S . Anche il termine f_g risulta indipendente dal ramo in quanto si è assunto che non dipenda né dal gradiente di illuminazione né dalla densità di potenza media incidente.

Nei paragrafi successivi si discutono e si calcolano i termini che costituiscono l'eq.5.8, fino a stimare il valore di efficienza finale.

5.2.1 Effetti del gradiente di densità di potenza sull'efficienza

Gli spot ottenuti sono caratterizzati da un forte gradiente spaziale di densità di potenza il cui valor medio, calcolato in base alle misure di densità di potenze descritte nel paragrafo 2.3.3, è $\sim 2,23 \frac{W}{cm^2 (mm)}$.

Un gradiente di densità di potenza, su un dispositivo fotovoltaico MJ determina delle disomogeneità nella fotocorrente e quindi un mismatch locale delle correnti fra le sottocelle. Per ogni tipo di cella di cella, SJ o MJ , il gradiente trasversale nella fotocorrente determina un aumento delle componenti trasversali della corrente. L'effetto complessivo è simile a quello di aumentare la resistenza di serie della cella, con la conseguente perdita di efficienza. Tale perdita, in un concentratore reale, può facilmente essere superiore all'1% (21) dell'efficienza che si avrebbe qualora la cella fosse investita da un'uguale densità di potenza media, ma uniforme. In Figura 5.1 A sono riportati i valori di densità di potenza misurati, relativi alla misura 3 descritta nel paragrafo 2.3.3; ogni quadratino ($3 \times 3 mm^2$) corrisponde ad una misura di densità di potenza (lo schermo applicato alla termopila ha un foro di $3 mm$ di diametro e le misure sono state effettuate nelle direzioni X e Y con passo di $3 mm$). In Figura 5.1 B è visualizzata la stessa area del ricevitore, investita dallo spot relativo alla misura 3, divisa in quadranti ($12 \times 12 mm^2$), ciascuno in grado di ospitare la cella e i collegamenti con altre celle o con il circuito. Utilizzando i valori di densità di potenza misurati (riportati in Figura 5.1 A secondo la scala di colori), è stata calcolata la densità di potenza media in ogni quadrante e il gradiente massimo. I valori ottenuti sono riportati nella Figura 5.1 B all'interno di ogni quadrante.

La dimensione dei quadranti dipende dal fatto che la realizzazione meccanica dei contatti non è ancora stata pensata, dunque si è deciso di lasciare libero circa 1 mm su ogni lato della cella, ovvero di collocare la cella nel centro di un quadrato S di superficie $A_S = 1,44\text{ cm}^2$

Nella Ref. (21) le condizioni di test che conducono alla stima di perdita dell' 1% sono molto differenti dalle nostre condizioni operative, soprattutto per quanto riguarda i valori massimi di concentrazione. Non essendo a conoscenza di prove sperimentali condotte in situazioni simili alla nostra, preferisco considerare una perdita del 5%, che penso sia una sovrastima, e quindi arrivare ad una sottostima dell'efficienza complessiva del concentratore.

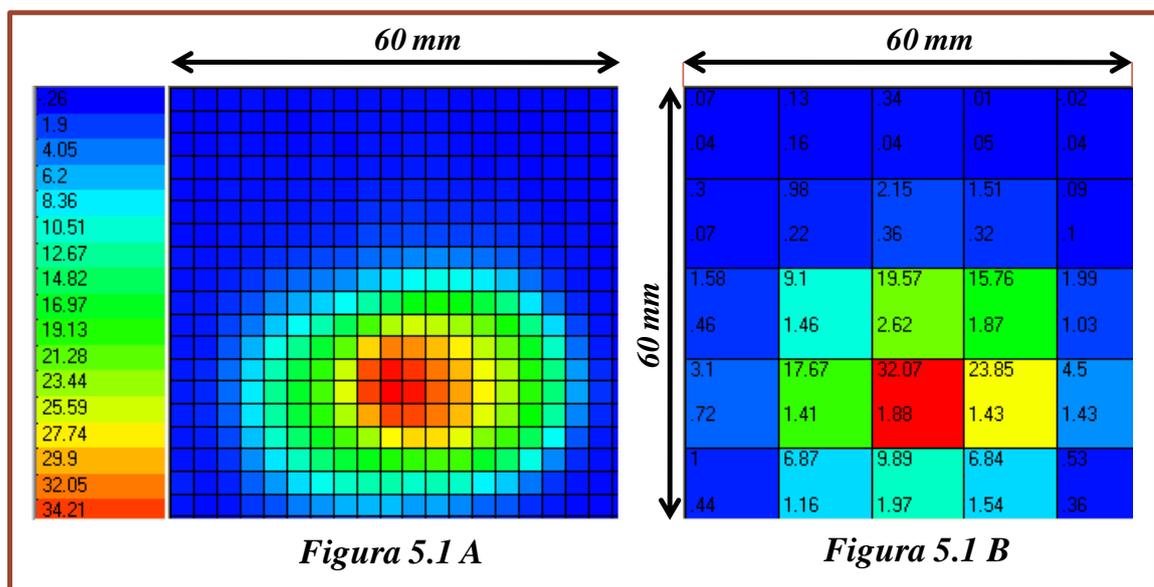


Figura 5.1 A: densità di potenza nello spot, relativa alla misura 3 descritta nel capitolo 2. Le dimensioni dei quadratini ($3 \times 3\text{ mm}^2$) dipendono dalla risoluzione della misura. La scala colori è relativa alla densità di potenza espressa in $\frac{W}{\text{cm}^2}$

Figura 5.1 B: la stessa superficie della figura A è divisa in quadranti ($12 \times 12\text{ mm}^2$) per la collocazione delle celle. Il valore in alto è la densità di potenza media del quadrante, mentre il valore in basso è il massimo gradiente di densità di potenza all'interno del quadrante ($\frac{W}{\text{cm}^2(\text{mm})}$). Per i calcoli sono stati utilizzati i valori di densità di potenza relativi alla misura 3 riportati graficamente in Figura 5.1 A.

Nel paragrafo 5.2, si è assunto che l'effetto del gradiente di concentrazione sull'efficienza della cella possa essere scritto come $\tilde{\epsilon} = f_g \cdot \epsilon(\langle \rho \rangle)$ in cui $\tilde{\epsilon}$ è l'efficienza della cella in presenza di gradiente, $\langle \rho \rangle$ è il valore medio della densità di potenza incidente e $\epsilon(\langle \rho \rangle)$ è l'efficienza che la cella avrebbe se fosse investita da una radiazione omogenea con densità di potenza pari a $\langle \rho \rangle$. Si è inoltre assunto che il fattore $f_g < 1$ che tiene conto del calo di efficienza sia indipendente dall'intensità del gradiente e

dal valor medio della densità di potenza incidente sulla cella $\langle \rho \rangle$. Considerare una perdita del 5% significa considerare il fattore $f_g = 1 - 0,05 = 0,95$. L'efficienza di una cella vale dunque $\tilde{\varepsilon}_C$:

$$eq. 5.9 \quad \tilde{\varepsilon}_C = \varepsilon_C \cdot 0,95$$

Per le celle appartenenti ad un ramo del circuito, ad esempio al ramo A , il discorso è analogo, in quanto, assumendo che f_g sia indipendente dall'intensità del gradiente e dal valor medio della densità di potenza incidente sulla i -esima cella, $\langle \rho \rangle_i$, si ottiene:

$$\tilde{\varepsilon}_A = \frac{\sum_{i=1}^N \langle \rho \rangle_i \cdot \varepsilon_{Ci} \cdot f_g}{\sum_{i=1}^N \langle \rho \rangle_i} = f_g \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \langle \rho \rangle_i \cdot \varepsilon_{Ci}}{\sum_{i=1}^N \langle \rho \rangle_i} = f_g \cdot \varepsilon_A$$

in cui $\tilde{\varepsilon}_A$ è l'efficienza del ramo A in presenza di gradiente di densità di potenza, mentre ε_A è l'efficienza del ramo qualora le celle fossero irraggiate da uguale potenza ma omogenea. Le $\langle \rho \rangle_i$ sono le densità di potenza media per ogni cella.

5.2.2 Dipendenza dell'efficienza dal fattore di intercettazione

Nei datasheet della cella $C1MJ$ della SPECTROLAB, l'efficienza riportata è riferita all'area attiva che misura $A_{Att} = 0,99 \text{ cm}^2$, mentre l'area totale della cella è $1,12 \text{ cm}^2$ (vedi figura Figura 4.1). A causa di questo una frazione di luce incidente sulla cella non viene convertita in potenza elettrica. Nel paragrafo 4.1 è stato quindi calcolato il fattore correttivo, necessario per ricavare l'efficienza reale a partire da quella fornita nei datasheet, che è riferita alla sola area attiva. Il valore ottenuto è $f_C = 0,892$. Moltiplicando per questo valore l'efficienza fornita dal datasheet si ottiene la massima efficienza reale possibile; infatti ciò corrisponde a considerare che la meccanica dei contatti copra, al massimo, la superficie delle 'bus bar'. Analogamente a quanto fatto nel paragrafo 4.1, ricalcoliamo il fattore correttivo f_C , questa volta considerando che nel circuito che si sta analizzando, ogni cella è di area attiva $A_{Att} = 0,99 \text{ cm}^2$ ed è collocata in un quadrante S di area $A_S = 1,44 \text{ cm}^2$:

$$eq. 5.10 \quad f_C = \frac{\langle \rho_s \rangle \cdot A_{Att}}{\langle \rho_s \rangle \cdot A_S} = \frac{A_{Att}}{A_S} = 0,694$$

Il termine $\langle \rho_s \rangle$, nell'eq.5.10 è la densità di potenza media calcolata sul quadrante S che ospita la cella. Infine, il fattore correttivo, calcolato per un gruppo di celle con uguale area attiva A_{Att} , collocate in quadranti di uguale area A_S , è lo stesso di quello trovato con l'eq.5.10 per una cella, infatti:

$$\text{eq. 5.11} \quad f_C = \frac{\sum_i (\rho_s)_i \cdot A_{att}}{\sum_i (\rho_s)_i \cdot A_S} = \frac{A_{att}}{A_S} = 0,694$$

Dall' eq.5.11 risulta che, nella configurazione ipotizzata, un 30% dell'efficienza è perso a causa del fattore f_C . Si fa notare che il calo di efficienza è dovuto alla decisione di lasciare 1 mm di spazio su ogni lato della cella in modo da poter realizzare le connessioni. In ogni caso, anche riuscendo a sistemare le celle con i lati adiacenti, il minor valore del fattore di correzione ottenibile è 0,892, valore determinato dalla superficie occupata sulle celle dalle 'bus bar'. Un valore più alto è probabilmente ottenibile progettando e realizzando un'ottica secondaria in grado di guidare la radiazione luminosa solo sulla superficie attive delle celle.

5.2.3 Dipendenza dell'efficienza dalla scelta dei quadranti utilizzati

In Figura 5.1 B, l'area del ricevitore è stata suddivisa in quadranti, ciascuno dei quali potrebbe ospitare una cella. Lo step successivo è scegliere quali quadranti riempire con una cella e quali lasciare vuoti. I problemi di mettere una cella dove l'insolazione è molto bassa sono sostanzialmente 2. Il primo è che si aumenta la quantità di materiale attivo utilizzato e quindi il costo complessivo dell'apparato, ricavando poca potenza netta; il secondo è che una cella poco illuminata può influire molto sull'efficienza finale del concentratore, in modo dipendente da quale circuito di adattamento al carico si sceglie. L'insolazione corrispondente alla misura 3, riportata nella Figura 5.1 A si riferisce ad una situazione di spettro incidente diretto pari a 740 W/m^2 e globale pari a 900 W/m^2 (vedi paragrafo 2.3.3). I valori della densità di potenza media, misurati in alcuni quadranti, sono molto bassi e non c'è motivo di pensare che in altre situazioni reali, sia possibile raccogliere una potenza molto maggiore. In questa analisi si decide perciò di eliminare 10 quadranti non collocando in essi nessuna cella. Indicativamente, si sono eliminati i quadranti in cui la densità di potenza media è inferiore a 1.5 W/cm^2 . Le altre 15 celle sono invece divise in 3 rami, costituiti ognuno da 5 celle connesse in serie con la connessione di 2° tipo (vedi paragrafo 3.2.3). I 3 rami sono invece connessi in parallelo fra loro e quindi con il carico.

La scelta di dividere il circuito in 3 rami, dipende dal fatto che le celle appartenenti al ramo A e indicate con la lettera A in Figura 5.2, sono caratterizzate da alti valori di concentrazione locale media e quindi la corrente I_A sarà notevolmente maggiore rispetto a quella dei rami B e C . Analogamente la corrente nel ramo B (I_B), sarà certamente maggiore di quella del ramo C , (I_C).

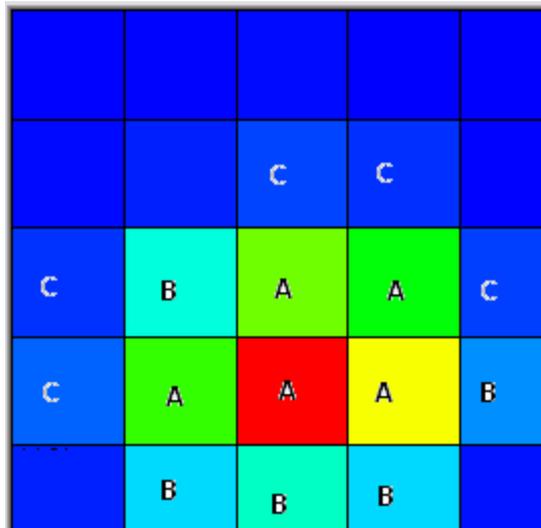


Figura 5.2 Divisione dell'area del ricevitore in quadranti. I quadranti contenenti le lettere sono quelli che ospitano le celle ed ogni lettera corrisponde ad un ramo del circuito.

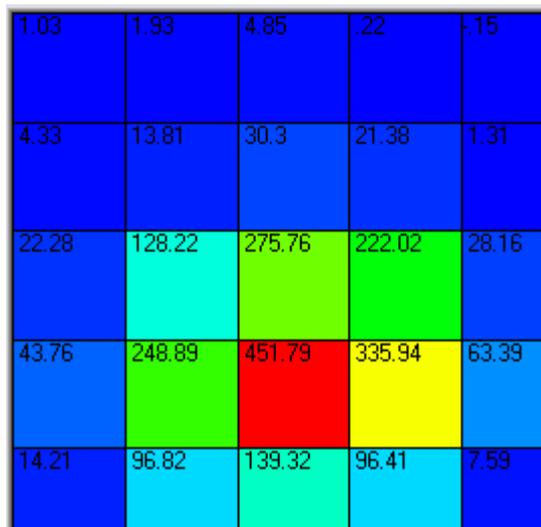


Figura 5.3 In ogni quadrante è stata calcolata la concentrazione locale $\langle C_{sXY} \rangle$ definita con l'eq.5.14. La potenza per unità di superficie all'interno di un quadrante si ottiene con l'eq.5.15.

Una volta decisa la disposizione delle celle nell'area del ricevitore è possibile calcolare i termini β , g_A , g_B , g_C introdotti nello sviluppo dell'efficienza complessiva del concentratore ε , svolta nel paragrafo 5.2. Si ricorda che:

1. β è la frazione di potenza riflessa dallo specchio e intercettata dall'array; $\beta \leq 1$ in quanto le celle (l'array) possono non coprire tutta l'area del ricevitore.

2. g_A , è la frazione di potenza incidente sul ramo A , calcolata rispetto alla potenza intercettata dall'array. Si ha che $g_A + g_B + g_C = 1$

Questi fattori non dipendono dall'intensità dello spettro incidente, e possono essere calcolati una volta per tutte utilizzando, ad esempio, i valori di densità di potenza media riportati in Figura 5.1 B relativi alla misura 3, tenendo conto della collocazione delle celle e che il circuito è stato diviso in 3 rami (Figura 5.2). Si ottiene:

$\beta = 0,985$, $g_A = 0,696$, $g_B = 0,238$, $g_C = 0,066$. L'errore su ogni termine è del $\pm 2\%$ in quanto come s'è visto le misure di densità di potenza effettuate sono caratterizzate da un errore $\pm 1\%$

5.2.4 Effetti della variazione della densità di potenza dello spettro incidente

Gli unici parametri che dipendono dall'intensità dello spettro incidente sono le efficienze delle celle e le efficienze di trasferimento di potenza al carico dei vari rami. Dai valori di densità di potenza nello spot relativi alla misura 3, descritta nel paragrafo 2.3.3, in cui la densità di potenza dello spettro diretto incidente era 740 W/m^2 è possibile calcolare i valori di densità di potenza che si avrebbero nello spot con diverse densità di potenza dello spettro diretto incidente. Richiamando le considerazioni fatte nel paragrafo 2.3.4, riguardo alla concentrazione locale C_{XY} , ci si aspetta che la densità di potenza in ogni punto dello spot vari rispetto alla densità di potenza incidente sullo specchio, secondo la relazione lineare

$$\text{eq. 5.12} \quad \rho_{XY} = \rho_{in} \cdot C_{XY}$$

in cui ρ_{in} è la densità di potenza per unità di superficie dello spettro incidente in un dato istante della giornata e ρ_{XY} è la densità di potenza per unità di superficie attesa nel punto di coordinate X, Y dello spot (nei calcoli che seguono, il valore di ρ_{XY} è esteso all'area del quadratino di lato 3 mm centrato in X, Y ; 3 mm è il passo utilizzato nelle misure di potenza da cui si sono ricavati i ρ_{XY}). L'errore su C_{XY} è $\Delta C_{XY} = \pm 0.03 C_{XY}$, in quanto calcolato a partire dalle misure di densità di potenza effettuate nello spot che hanno errori dell' $\pm 1\%$ e da misure di densità dello spettro incidente che hanno errori del $\pm 2\%$. Di conseguenza l'errore sulla densità di potenza è $\Delta \rho_{XY} = \pm 0.05 \rho_{XY}$. Definiamo ora la densità di potenza media del quadrante S di dimensioni $1,2 \times 1,2 \text{ cm}^2$, che denotiamo con $\langle \rho_S \rangle$. Essa è l'integrale numerico dei valori di densità di potenza all'interno del quadrante (eq.5.12) moltiplicati per la risoluzione della misura, per la densità di potenza incidente e divisi per la superficie del quadrante:

$$eq. 5.13 \quad \langle \rho_S \rangle = \frac{\rho_{in} \cdot 0.3^2 \cdot \sum_X^S \sum_Y^S C_{XY}}{1,2^2}$$

in cui le sommatorie su X e Y si intendono sui valori misurati di coordinate comprese tra (X, Y) e $(X + 1, 2, Y + 1, 2)$. L'errore su $\langle \rho_S \rangle$ vale dunque $\Delta \langle \rho_S \rangle = \pm 0.05 \langle \rho_S \rangle$. Per praticità definiamo concentrazione locale media della superficie S la quantità:

$$eq. 5.14 \quad \langle C_{SXY} \rangle = \frac{0.3^2 \cdot \sum_X^S \sum_Y^S C_{XY}}{1,2^2}$$

in modo che l'eq.5.13 può essere riscritta più semplicemente come:

$$eq. 5.15 \quad \langle \rho_S \rangle = \rho_{in} \langle C_{SXY} \rangle$$

In Figura 5.3, al posto dei valori assoluti di densità di potenza per unità di superficie si sono sostituiti i valori di concentrazione locale media $\langle C_{SXY} \rangle$. Con queste considerazioni l'efficienza di una cella collocata nel quadrante S , può essere riscritta tenendo conto della dipendenza dell'efficienza dalla potenza dello spettro incidente secondo la relazione:

$$eq. 5.16 \quad \varepsilon_C = \varepsilon_C(\rho_{in} \langle C_{SXY} \rangle)$$

L'eq.5.16 è l'efficienza riportata sui datasheet, considerando la cella irraggiata con densità di potenza media $\rho_{in} \langle C_{SXY} \rangle$.

5.2.5 Dipendenza dell'efficienza dal sistema di connessione e adattamento al carico

Il circuito, come detto, è costituito da 3 rami in parallelo A, B, C , ciascuno costituito di 5 celle connesse in serie tra loro con la connessione di 2° tipo presentata nel paragrafo 3.2.3.

Per il calcolo delle efficienze di trasferimento di potenza al carico $\varepsilon_{TA}, \varepsilon_{TB}, \varepsilon_{TC}$ è necessario definire i parametri del circuito, quindi, sia ε_A l'efficienza dei dc_dc converter e sia $V_0 = 13 V$, la tensione di uscita sul carico. Le stime dell'efficienza di trasferimento saranno effettuate ipotizzando di utilizzare dc_dc converter con diversi valori di efficienza ε_A .

Nel paragrafo 3.2.4 si è visto che il calcolo dell'efficienza di trasferimento ε_T necessita di conoscere le curve IV delle celle. Nello stesso paragrafo è stato anche mostrato che imponendo alle celle di lavorare ciascuna nel proprio punto di massima potenza, MPP , l'efficienza di trasferimento che si ottiene è minore o uguale di quella realmente ottenibile. Non potendo disporre delle curve IV delle celle proseguiamo l'analisi calcolando l'efficienza di trasferimento dei 3 rami nel caso in cui ogni cella sia forzata a stare nel proprio MPP , ricordando che in questo modo si sta sottostimando il valore di efficienza di trasferimento che si potrebbe ottenere.

L'efficienza di trasferimento è stata calcolata in 3 situazioni (che simulano diversi momenti della giornata) caratterizzati da una densità di potenza dello spettro incidente diretto di $350 \frac{W}{m^2}$, $500 \frac{W}{m^2}$ e $750 \frac{W}{m^2}$. L'analisi è stata fatta inoltre per 3 ipotetiche temperature delle celle: 45° , 65° , 90° C.

Gli step per il calcolo dell'efficienza di trasferimento ε_T di ogni ramo sono i seguenti:

1. si utilizzano l'eq.5.15 e la Figura 5.3 per trovare la densità di potenza media incidente in ogni quadrante in funzione della densità di potenza dello spettro incidente,
2. dalla curva di efficienza in funzione della densità di potenza incidente, fornita dalla *SPECTROLAB*, si ricava la P_{MPP} di ogni cella (massima potenza che la cella può fornire in quelle condizioni operative),
3. conoscendo la P_{MPP} di ogni cella, è stata utilizzata la curva di V_{MPP} in funzione della densità di potenza incidente, fornita dalla *SPECTROLAB*, per calcolare le i_{MPP} ($i_{MPP} = \frac{P_{MPP}}{V_{MPP}}$),

Gli step sono ripetuti per ogni cella, per ogni densità di potenza dello spettro diretto incidente e per ogni temperatura. Una volta note le P_{MPP} e le i_{MPP} delle celle è possibile calcolare le efficienze di trasferimento dei vari rami del circuito relative al caso in cui le celle siano forzate a stare nel proprio *MPP*. Ad esempio, per il ramo *A* e nella condizione operativa in cui le celle siano forzate a stare nei propri *MPP*, l'efficienza di trasferimento è:

$$eq. 5.17 \quad \varepsilon_{T_A} = \frac{P_{N_A}}{P_{MAX_A}} = \frac{P_{MAX_A}^{-(1-\varepsilon_A)} \cdot i_A \cdot V_0}{P_{MAX_A} \cdot \varepsilon_A}$$

in cui la corrente del ramo è $i_A = \text{Max}\{i_{MPP}\}_A$ e P_{MAX_A} è la massima potenza che le celle del ramo *A* potrebbero fornire in quelle condizioni operative. Per dettagli relativi alla scelta della corrente si rimanda al paragrafo 3.2.4. Per svolgere gli step è stata realizzata una *MACRO* in un foglio elettronico *EXCEL* contenente i valori digitalizzati delle curve di efficienza e di V_{MPP} in funzione della concentrazione, fornite nei datasheet delle celle *SPECTROLAB*. Come anticipato ad inizio paragrafo è stato scelto $V_0 = 13 V$ e sono state fatte diverse stime di efficienza di trasferimento utilizzando diversi valori di efficienza ε_A dei dc_dc converter.

La stessa *MACRO* calcola infine l'efficienza finale ε del concentratore utilizzando l'equazione eq.5.8 e utilizzando i valori dei parametri β , g_A , g_B , g_C , f_C , f_g calcolati nei paragrafi precedenti.

Per meglio valutare l'effetto della connessione di 2° tipo sull'efficienza, procediamo definendo 'efficienza elettrica complessiva' il termine dell'eq.5.8:

$$eq. 5.18 \quad \varepsilon_{EL_COMPL} = (g_A \cdot \varepsilon_A^{MAX} \cdot \varepsilon_{T_A} + g_B \cdot \varepsilon_B^{MAX} \cdot \varepsilon_{T_B} + g_C \cdot \varepsilon_C^{MAX} \cdot \varepsilon_{T_A})$$

Definiamo anche la massima efficienza elettrica possibile, come l'efficienza elettrica complessiva che si otterrebbe se tutti i rami del circuito avessero efficienza di trasferimento $\varepsilon_T = 1$:

$$eq. 5.19 \quad \varepsilon_{EL_MAX} = g_A \cdot \varepsilon_A^{MAX} + g_B \cdot \varepsilon_B^{MAX} + g_C \cdot \varepsilon_C^{MAX}$$

e infine definiamo l'efficienza di trasferimento media $\langle \varepsilon_T \rangle$ del circuito il rapporto:

$$eq. 5.20 \quad \langle \varepsilon_T \rangle = \frac{\varepsilon_{EL_COMPL}}{\varepsilon_{EL_MAX}}$$

Nelle tabelle in Figura 5.4, sono riportati, per ogni valore di efficienza dei dc_dc converter, per ogni temperatura e per ogni densità di potenza dello spettro incidente, i valori di efficienza elettrica complessiva e di efficienza di trasferimento media $\langle \varepsilon_T \rangle$, ottenuti con gli step descritti nel paragrafo e utilizzando le eq.5.18, eq.5.19, eq.5.20. Nella tabelle in Figura 5.5 sono riportate le efficienze elettriche massime nelle varie condizioni operative di temperatura e intensità dello spettro incidente.

T_{cella}	ε elettrica complessiva			$\langle \varepsilon_T \rangle$			ε_A
	350 W/m ²	500 W/m ²	750 W/m ²	350 W/m ²	500 W/m ²	750 W/m ²	
45C	0,185	0,164	0,191	0,543	0,477	0,543	0,5
65C	0,144	0,134	0,136	0,450	0,400	0,408	
90C	0,113	0,101	0,113	0,366	0,323	0,356	
45C	0,237	0,223	0,244	0,695	0,648	0,693	0,6
65C	0,201	0,2	0,201	0,628	0,597	0,604	
90C	0,177	0,171	0,18	0,573	0,546	0,568	
45C	0,293	0,29	0,302	0,859	0,843	0,858	0,77
65C	0,266	0,274	0,272	0,831	0,818	0,817	
90C	0,249	0,25	0,256	0,806	0,799	0,808	
45C	0,3	0,297	0,311	0,880	0,863	0,884	0,8
65C	0,275	0,284	0,282	0,859	0,848	0,847	
90C	0,259	0,259	0,266	0,838	0,827	0,839	
45C	0,323	0,322	0,332	0,947	0,936	0,943	0,9
65C	0,299	0,312	0,31	0,934	0,931	0,931	
90C	0,285	0,289	0,293	0,922	0,923	0,924	

Figura 5.4 Tabella con i dati di efficienza elettrica complessiva e di efficienza di trasferimento media per il circuito analizzato, in funzione dell'efficienza dei dc_dc converter utilizzati. Il valore di tensione d'uscita sul carico è 13 V.

T_{cella}	ε_{EL_MAX}		
	350 W/m ²	500 W/m ²	750 W/m ²
45C	0,341	0,344	0,352
65C	0,32	0,335	0,333
90C	0,309	0,313	0,317

Figura 5.5 Efficienze elettriche massime ottenibili dal circuito di 3 rami in parallelo costituiti ognuno da 5 celle connesse in serie con connessione di 2° tipo

Dalla tabella in Figura 5.4 si nota che per valori di efficienza dei dc_dc converter $\varepsilon_A \geq 0,6$ l'efficienza di trasferimento media risulta $\langle \varepsilon_T \rangle \geq 0,6$, eccezion fatta per il caso di efficienza $\varepsilon_A = 0,6$ e temperatura $T = 90^\circ C$, per cui $\langle \varepsilon_T \rangle$ risulta di poco inferiore. Ricordando quanto detto nel capitolo 3, questo significa che in tutti i casi simulati con $\varepsilon_A \geq 0,6$, la connessione di 2° tipo è certamente più conveniente rispetto a quella di 1° tipo. Vorrei infine evidenziare che le efficienze elettriche complessive ε_{EL_COMPL} , realizzabili con dc_dc converter di efficienza $\varepsilon_A \geq 0,77$ risultano sempre $\varepsilon_{EL_COMPL} \geq 0,249$; ciò significa che, con la connessione di 2° tipo, le condizioni operative possono cambiare di molto (range di temperatura tra $45 \div 90^\circ C$ e densità dello spettro diretto incidente tra $350 \div 750 W/m^2$), senza influire notevolmente sull'efficienza elettrica complessiva (vedi anche paragrafo 3.3).

5.3 Efficienza complessiva del concentratore e conclusioni

Nella tabella in Figura 5.6 sono riportate le efficienze finali ε del concentratore, calcolate con la *MACRO* di *EXCEL* descritta nel paragrafo 5.2.5, utilizzando l'eq.5.8 e i valori dei parametri β , g_A , g_B , g_C , f_C , f_g , R_C calcolati nei paragrafi precedenti, di cui di seguito sono riportati i valori:

$$\beta = 0,985, g_A = 0,696, g_B = 0,238, g_C = 0,066, f_C = 0,694, f_g = 0,95, R_C = 0,876.$$

Dalla tabella si osserva che considerando il concentratore con ottica primaria di $0,337 m^2$, con efficienza dei dc_dc converter $\varepsilon_A \geq 0,77$, temperatura di $45^\circ C$ e spettro incidente $\geq 350 W/m^2$ si possono ottenere efficienze finali del concentratore da 16,7% fino a 18,9%.

Per commentare le stime riporto l'eq.5.8 sostituendovi le eq.5.18, eq.5.19, eq.5.20:

$$eq. 5.21 \quad \varepsilon = R_C \cdot \beta \cdot f_C \cdot f_g \cdot \langle \varepsilon_T \rangle \cdot \varepsilon_{EL_MAX}$$

in cui $f_C = 0,694$, $f_g = 0,95$, $R_C = 0,876$, $\beta = 0,985$, mentre le efficienze di trasferimento medie $\langle \varepsilon_T \rangle$ e le efficienze elettriche massime ε_{EL_MAX} sono riportate rispettivamente nelle tabelle in Figura 5.4 e in Figura 5.5, in dipendenza delle condizioni operative.

T_{cella}	ε			ε_A
	350 W/m ²	500 W/m ²	750 W/m ²	
45C	0,105	0,093	0,108	0,5
65C	0,082	0,076	0,077	
90C	0,064	0,057	0,064	
45C	0,135	0,127	0,139	0,6
65C	0,114	0,114	0,114	
90C	0,1	0,097	0,103	
45C	0,167	0,165	0,172	0,77
65C	0,151	0,156	0,154	
90C	0,141	0,142	0,145	
45C	0,171	0,169	0,177	0,8
65C	0,156	0,161	0,16	
90C	0,147	0,147	0,151	
45C	0,184	0,183	0,189	0,9
65C	0,17	0,177	0,176	
90C	0,162	0,164	0,167	

Figura 5.6 Tabella delle efficienze finali del concentratore calcolate per diversi valori di efficienza dei dc_dc converter, a varie temperature e per diverse densità di potenze dello spettro incidente.

Le osservazioni riguardo le stime effettuate sono le seguenti:

1. osservando le tabelle riportate in Figura 5.4 si nota che le efficienze elettriche complessive ottenibili con dc_dc converter di efficienza $\varepsilon_A \geq 0,77$ risultano superiori al 24% entro l'ampio range di temperature e densità degli spettri diretti incidenti valutato. Questo significa che con la connessione di 2° tipo è stato parzialmente risolto il problema del trasferimento di potenza al carico e limitato il problema dell'innalzamento della temperatura.
2. il fattore maggiormente responsabile, dei valori di efficienza finale ε ottenuti è, nell'eq.5.21, il fattore di intercettazione $f_C = 0,694$. Il problema, illustrato nel paragrafo 5.2.2 è puramente meccanico e può essere migliorato fino ad un valore massimo $f_C = 0,892$, ottenuto con un array di celle perfettamente adiacenti. Ipotizzando di realizzare tale valore di f_C , le efficienze calcolate e riportate nella tabella in Figura 5.6 aumentano di un fattore 1,285.

3. Nel calcolo si è stimato un fattore $f_g = 0,95$; volutamente sovrastimato per tener conto dei forti gradienti di densità di potenza nello spot (vedi Figura 5.1 B). Ipotizzando di lavorare fuori fuoco o utilizzando ottiche secondarie per omogeneizzare la densità di potenza si potrebbe portarsi a valori $f_g = 0,99$. In questo caso le efficienze calcolate e riportate nella tabella in Figura 5.6 aumentano di un fattore 1,042.
4. ad inizio capitolo si è specificato che la stima sarebbe stata effettuata su un concentratore solare con un ottica primaria corrispondente agli $0,337 m^2$ di settore parabolico caratterizzati e descritti nel paragrafo 2.3.3. Nello stesso paragrafo si è anche visto che con i soli $0,337 m^2$ non si sono raggiunte le densità di potenza di $50 W/cm^2$, valore per cui le celle C1MJ, utilizzate per la stima, hanno valori di efficienza massima. Questo significa che ponendosi in queste condizioni, nell'eq.5.21, i termini ε_{EL_MAX} possono essere maggiori, rispetto a quelli riportati nella tabella in Figura 5.5. Un modo è ad esempio, utilizzare come ottica primaria l'intero settore parabolico o tutto il paraboloide.
5. Il valore di efficienza finale ε del concentratore, calcolato con le stime, presuppone che tutte le celle siano forzate a stare nel proprio punto di massima potenza. Nel paragrafo 3.2.4 si è visto che l'efficienza calcolata in queste condizioni è minore o uguale di quella che si potrebbe ottenere nelle stesse condizioni, il cui calcolo, però, richiede la conoscenza delle curve IV di tutte le celle che compongono l'array.

Con le considerazioni fatte nei punti 2 e 3, considerando l'efficienza dei dc_dc converter $\varepsilon_A \geq 0,77$ e temperatura di $45^\circ C$, si passa dalle efficienze iniziali comprese tra $16,7 \div 18,9\%$ a valori di efficienza compresi tra $22,5\% \div 25\%$.

Per effettuare un paragone con efficienze di sistemi già realizzati (vedi tabella in Figura 1.8) ho calcolato l'efficienza nel caso che lo spettro incidente sul collettore sia quello *ASTM G173 – 03 Globale* (densità di potenza $\sim 1000 W/m^2$; il calcolo è fatto utilizzando la densità di potenza della componente diretta $\sim 900 W/m^2$). Considerando l'efficienza dei dc_dc converter $\varepsilon_A \geq 0,77$ e temperatura di $45^\circ C$, l'efficienza risulta compresa tra $17,5\% \div 19,3\%$. Tenendo presente le considerazioni fatte ai punti 2 e 3 si ottiene invece che l'efficienza è compresa tra $23\% \div 26\%$ ¹⁹.

Per concludere, il concentratore da noi realizzato (ottica costituita da 3 settori parabolici, ciascuno di $0,818 m^2$) consente di lavorare con rapporti di concentrazione 'a scelta', data l'ampia superficie riflettente disponibile; ponendo l'array fuori fuoco, dove il gradiente di densità è minore, ci si aspetta

¹⁹ Nel calcolo di efficienza sviluppato in questo capitolo non è stato considerato il consumo di energia necessario per l'inseguimento in quanto il motore in nostro possesso (Oriental Motor, potenza assorbita 80 W) sovrastima sensibilmente la potenza necessaria per muovere un collettore di $0,337 m^2$.

quindi di ottenere effettivamente $f_g = 0,99$. Per quanto riguarda il fattore di intercettazione f_C , si sta studiando e realizzando il ricevitore-dissipatore (vedi capitolo 4) in modo tale che permetta una collocazione delle celle adeguata, per ottenere valori prossimi a $f_C = 0,892$.

Bibliografia

1. **G., John.** *Global Solar Photovoltaic Market Analysis and Forecasts to 2020.* s.l. : PRL.Org - Global Press Release Distribution, 2009.
2. *Some results of the EUCLIDES photovoltaics concentrator prototype.* **altri, G.Sala e.** s.l. : Progress in photovoltaics:research and application, 1997, Vol. 5.
3. *Thermal analisys and test for single concentrator solar cells.* **Cui Min, Chen Noufu, Yang Xiaoli, Wang Yu, Bai Yiming, Zhang Xingwang.** 4, s.l. : Journal of Semiconductors, 2009, Vol. 30.
4. *Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review.* **Anja Royne, Christopher J.Dey, David R.Mills.** s.l. : Solar Energy Materials & Solar Cells, 2004.
5. *Analisis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic system.* **King, D.L. and Boyson, W.E. and Kratochvil.** 1356-1361, s.l. : Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE, 2002.
6. *Limiting efficiencies of ideal single and multipleenergy gap terrestrial solar cells.* **Henry, C.H.** 51, s.l. : J. Appl. Phys., 1980.
7. *Celle solari multigiunzione III-IV:teoria e accoppiamento ad un sistema fotovoltaico in concentrazione.* **Eccher, Massimo.** 2009.
8. *High concentration photovoltaic systems applying III-V cells.* **Ghassan Zubi, José L.Bernal-Agustin, Gian Vincenzo Fracastoro.** s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, Vol. 13.
9. www.solarsystems.com.au. [Online] Solar System.
10. www.coolearthsolar.com. [Online] Cool Heart Solar.
11. **Marco Bettonte, Roberto S. Brusa, Antonio Miotello.** *Solar Concentrator, method and equipement for its achievement.* PCT/EP20071011181 12 19, 2007.
12. *Micro facet solar concentrator.* **Kussul, E.,Baidyk, T.,Lara-Rosano, F.,Saniger, J.M,Bruce,N. and Estrada.** 2, s.l. : International Journal of Sustainable Energy, 2008, Vol. 27.
13. www.spectrolab.com/DataSheets/TerCel/C1MJ_CDO-100.pdf. [Online] SPECTROLAB.
14. *SURFIT.* **Languasco, Franco.** s.l. : <http://www.flanguasco.org>, 2001.

15. *Solar cell array parameters*. **Meena Aggarval, A.Kapor, K.N. Tripathi**. 45, s.l. : Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997.
16. *Cascaded DC-DC converter connection of Photovoltaics Modules*. **Geoffry R.Walker, Paul C.Sernia**. 4, s.l. : IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS, 2004, Vol. 19.
17. *Properties of DLC thin films produced by RF PE-CVD from pyrrole monomer*. **O. Takaia, V. Anita, b,T, N. Saitoc**. s.l. : Surface & Coatings Technology, 2005, Vol. 200.
18. **J.H.Lienardh IV, J.H.Lienardh V**. *A heat transfer textbook*. Cambridge : Phlogiston Press, 2008.
19. *Correlation between the adhesion and thermal contact resistance:effects of substrate ion bombardment etching*. **A.Lahamar, N.Hmina,Y.Scudeller,J.P.Bardon**. s.l. : Thin Solid Films, 1998, Vol. 325.
20. *Experimental investigation on the thermal contact resistance between gold coating and ceramic substrates*. s.l. : Thin Solid Films, 2001, Vol. 389.
21. *IV testing of concentration modules and cells with non-uniform light patterns*. **I.Anton, R. Solar, G.Sala, and D.Pachon**. s.l. : proc. 17 EPSEC, 2001.
22. **W.Smith, Steven**. *The Scientist and Engineering's guide to Digital Signal Processing*. San Diego : California Technical Publishing, 1997-1999.
23. **ASTM_G173-03**. *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*. 1992.

