

UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI
CORSO DI LAUREA IN FISICA



TESI DI LAUREA
Fotovoltaico a Concentrazione: misure di efficienza

Relatore: prof. Sandro Centro

Laureando: Pasqualotto Stefano

ANNO ACCADEMICO: 2009 / 2010

Sommario

1	Fotovoltaico.....	4
1.1	Tipologie di celle esistenti.....	5
1.2	La strada della concentrazione.....	5
1.3	Il mercato dei concentratori.....	6
1.4	La radiazione solare.....	7
1.4.1	Lo spettro solare.....	7
1.4.2	Componenti della radiazione solare.....	8
1.5	Principio di funzionamento di una cella fotovoltaica.....	9
1.5.2	Effetti della temperatura.....	11
1.5.3	Effetti della concentrazione.....	12
1.5.4	Efficienza (approccio termodinamico).....	13
1.5.5	Concentratori.....	13
1.5.6	Celle.....	15
1.5.7	Ottica.....	16
1.5.8	Meccanica di inseguimento.....	18
1.5.9	Elettronica.....	18
1.6	Confronto fra celle a giunzione multipla e a giunzione singola.....	19
1.6.1	Limiti teorici di una singola giunzione.....	19
1.6.2	Celle multi giunzione.....	20
1.6.3	Aberrazione cromatica.....	22
1.6.4	Dipendenza dallo spettro.....	23
1.7	Caratterizzazione delle celle fotovoltaiche.....	23
1.7.1	Il modello circuitale della cella fotovoltaica.....	23
1.7.2	La curva V-I.....	24
1.8	Figure di merito.....	25
1.9	Connessione di più celle.....	26
2	Il prototipo di inseguitore.....	28
	Le celle Emcore.....	28
2.1.1	Unità di misura e condizioni standard.....	28
2.1.2	Celle utilizzate.....	28

2.2	La scheda del prototipo studiato	29
2.2.1	Basetta.....	29
2.3	Fissaggio della cella	31
2.3.1	Connettori laterali (bonding)	31
2.4	Test della prima cella	33
2.5	Inseguitore	38
2.6	Meccanica.....	38
2.7	Ottica.....	38
2.8	Raffreddamento	39
2.9	Elettronica di controllo.....	41
2.9.1	Fotodiodi	42
2.9.2	La piramide (fotoresistenze).....	47
2.9.3	Logica di controllo	50
2.9.4	Interconnessione fra le schede.....	53
2.10	Controllo Labview	54
3	Misure	57
3.1.1	Risultati attesi	57
3.1.2	Misura di temperatura	59
3.2	Misure di riflettività	60
3.3	Test su una singola cella.....	61
3.4	Misure in laboratorio sulle celle	64
3.4.1	Il simulatore solare.....	64
3.4.2	Variazioni di V_{oc} e di I_{sc} in funzione della temperatura	64
3.5	Test su varie tipologie di specchio.....	67
4	Conclusioni.....	73
4.1	Celle	73
4.1.1	Raffreddamento	73
4.2	Elettronica	74
4.3	Ottica.....	74

1 Fotovoltaico

Benché l'interazione tra fotoni ed elettroni e la sua utilizzabilità per produrre corrente elettrica sia nota fin dal '800, fu solo con lo studio sistematico dei semiconduttori che questo fenomeno fisico assunse un ruolo chiave nel panorama delle energie alternative. Usando i semiconduttori, infatti, si è riusciti a realizzare le prime celle che garantissero una certa efficienza di conversione dell'energia solare in energia elettrica.

Uno dei principali impieghi delle celle fotovoltaiche è stato in ambito spaziale. I satelliti vennero da subito dotati di sistemi di alimentazione a pannelli fotovoltaici. Per esempio il Vanguard della NRL (National Research Lab) nel 1958.

Oggi l'energia elettrica è indispensabile per lo svolgimento delle nostre attività. Per questo motivo siamo sempre alla ricerca di nuove fonti. L'attuale produzione energetica è basata principalmente su combustibili fossili. Essi sono disponibili in quantità limitate sul nostro pianeta e destinati ad esaurirsi. L'aumento della popolazione mondiale, ma anche delle esigenze dei singoli individui, porta ad un costante incremento della richiesta di energia.

Il sole è certamente un valido candidato tra le varie fonti alternative. Esistono vari modi di utilizzare l'energia solare. La prima grande distinzione può essere fatta fra solare termico e fotovoltaico.

Con *il solare termico* si cerca sostanzialmente di produrre calore per irraggiamento. Generalmente questa energia viene utilizzata per riscaldare acqua, per uso sanitario o per scaldare ambienti. Esistono anche centrali termoelettriche che utilizzano il sole come sorgente di calore. In questa applicazione il sole viene concentrato con specchi parabolici per produrre vapore la cui energia viene trasformata in energia elettrica tramite turbine.

Il fotovoltaico sfrutta l'effetto fotoelettrico. Si utilizzano materiali semiconduttori di vario tipo. Come si vedrà in seguito, i fotoni interagiscono con le giunzioni a semiconduttore creando una separazione di cariche positive e negative. Il semiconduttore agisce da generatore di corrente, in condizioni opportune che vedremo in dettaglio nel paragrafo 1.5

In questo campo il panorama è variegato. Il semiconduttore più utilizzato per applicazioni commerciali è attualmente il silicio. Il silicio per uso fotovoltaico oggi è in vendita in forma monocristallina, policristallina, film sottile, amorfo. Ognuna di queste forme ha pregi e difetti. L'idea per abbattere i costi delle strutture in silicio è quella di ridurre lo spessore. Essendo un semiconduttore a bandgap indiretto, il silicio soffre di una limitazione intrinseca per quanto riguarda il coefficiente di assorbimento, cioè la sua capacità di interagire con i fotoni. Questo rende necessari spessori relativamente grandi rispetto ad altri semiconduttori.

Oltre al silicio sono disponibili materiali più efficienti, ma più costosi. In applicazioni dove il costo diventa secondario rispetto ad altre esigenze (per esempio il peso nelle applicazioni spaziali), hanno trovato spazio le celle multigiunzione. Si tratta di eterogiunzioni composte da elementi dei

gruppi III-V della tavola periodica. L'uso terrestre di tali pannelli senza concentrazione è improponibile. Il costo per unità di superficie è molto più alto di quelli al silicio.

Nel 1973 la crisi petrolifera portò ad esplorare in modo più intensivo la possibilità di usare il fotovoltaico anche per applicazioni terrestri. Oltre ai pannelli piani in silicio che sono tutt'oggi l'unica tecnologia commerciale di largo consumo, si cercò di percorrere anche un'altra strada. Si tratta del fotovoltaico a concentrazione.

1.1 Tipologie di celle esistenti.

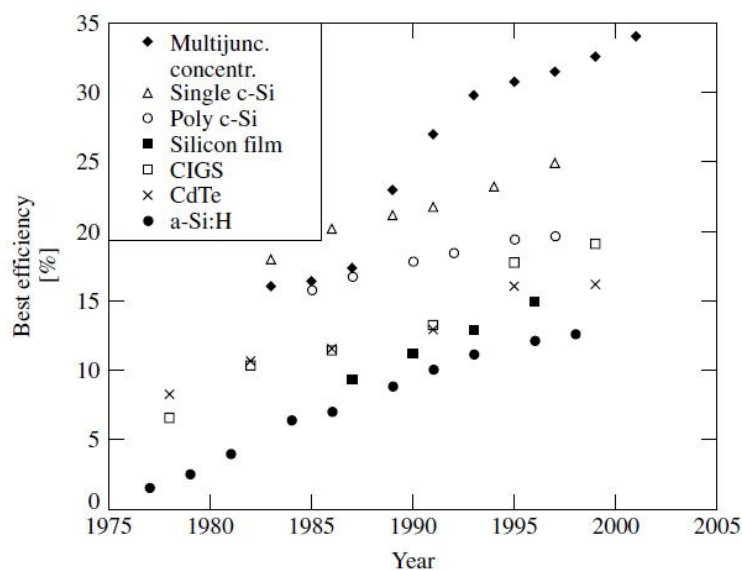


Figura 1.1-1 Efficienza di alcune tipologie di celle fotovoltaiche, e loro evoluzione nel tempo.

Attualmente sul mercato esistono vari tipi di celle e di tecnologie costruttive. Consideriamo che il solo silicio è presente in varie forme. Esistono il silicio monocristallino, policristallino, film sottile, amorfo. Oltre a questo ci sono ad esempio film sottili al CdTe. Come si vede dalla Figura 1.1-1, le celle multi giunzione sono le più efficienti, anche se al momento sono le più costose. Queste ultime sono ampiamente usate per applicazioni spaziali dove le esigenze economiche si

scontrano con altri aspetti fondamentali, come il peso dell'apparato. Attualmente il mercato è dominato dal silicio, per vari motivi. La strada futura, comunque, sembra essere quella delle celle multi giunzione o comunque verso sistemi che sfruttino meglio lo spettro solare, per un serie di motivi che verranno chiariti in seguito. L'alta efficienza dei sistemi multigiunzione, infatti, ha un fondamento teorico e non solo tecnologico.

1.2 La strada della concentrazione

Fin dagli anni '70, quando iniziarono degli studi sistematici per l'applicazione terrestre del fotovoltaico, ci si rese conto che andavano sviluppate nuove idee per rendere sostenibile questa tecnologia. I costi dei semiconduttori, infatti, non possono essere ridotti in misura tale da renderli convenienti rispetto ai combustibili fossili. Esiste un'altra strada percorribile. L'idea è di utilizzare celle di piccole dimensioni ed elementi ottici (specchi o lenti) per concentrare la luce di superfici estese su celle di piccole dimensioni. Questa idea, benché concettualmente semplice, presenta

diversi problemi nella sua realizzazione. Innanzitutto le celle vanno costruite per questo preciso scopo. Il sistema richiede un inseguimento del sole, quindi non si possono costruire pannelli piani o pannelli flessibili come nel caso del silicio. Sono necessarie delle ottiche ad hoc. L'aumento della densità di energia rispetto alle applicazioni tradizionali comporta precisi problemi dal punto di vista termico. Tutto questo verrà esaminato in dettaglio nei prossimi paragrafi.

1.3 Il mercato dei concentratori

Anche se attualmente i concentratori esistono solo a livello di prototipo, ha senso pensare a quale potrebbe essere il target di utilizzatori. Uno di punti che ha frenato lo sviluppo di questa tecnologia è proprio questo.

Le piccole applicazioni domestiche sembrano per il momento poco probabili, visto che il posizionamento classico dei pannelli fotovoltaici è sui tetti. I pannelli piani tradizionali oggi richiedono una manutenzione pressoché nulla, grazie anche all'introduzione degli impianti grid connected. L'eliminazione degli accumulatori ha ridotto l'impianto medio ad una stringa di pannelli, un inverter e pochi elementi di interconnessione. La presenza di parti in movimento e di una elettronica di gestione, rendono i sistemi CPV più complessi.

La collocazione naturale, quindi, sembra essere quella dei grandi impianti produttivi. Per quanto riguarda le applicazioni su grandi centrali, però, si entra in competizione con un vasto panorama di energie alternative e tradizionali. I combustibili fossili, ma anche le biomasse, il biogas, l'eolico, l'idroelettrico, ... Per poter coesistere in modo competitivo con le altre fonti di energia, il CPV deve raggiungere il traguardo di un costo minore di \$2.00/W. Raggiungere questo obiettivo è necessario, ma non sufficiente. Parallelamente allo sviluppo di questi sistemi, infatti, si dovranno studiare soluzioni per immagazzinare e distribuire in modo efficiente l'energia. Per sua natura, infatti, l'energia prodotta dal fotovoltaico è fluttuante nel tempo, la sua disponibilità è limitata ad alcune ore del giorno e condizionata dagli eventi atmosferici. Tra le soluzioni per immagazzinare l'energia, la possibilità di produrre idrogeno per elettrolisi. Il procedimento è molto semplice, tanto che si può fare anche a livello domestico. La disponibilità di grosse quantità di energia elettrica, potrebbe rendere questo processo economicamente conveniente. Il fotovoltaico, comunque, mantiene il grande vantaggio che la fonte di energia è disponibile a tutti.

1.4 La radiazione solare.

È fondamentale comprendere le caratteristiche della radiazione solare per poter scegliere correttamente i componenti di un sistema fotovoltaico.

Lo spettro solare e quindi la potenza utile per il fotovoltaico sono influenzati dal fatto che i raggi devono attraversare l'atmosfera terrestre. Per caratterizzare lo spettro solare, quindi, è stato introdotto un indice: l' Air Mass (di seguito AM seguito da un numero). L'indice esprime la quantità relativa di atmosfera che i raggi solari attraversano prima di arrivare sul nostro apparato.

Lo spettro AM0, per esempio, denota l'assenza di atmosfera. È lo spettro che si misura convenzionalmente alla distanza di 1UA, nello spazio libero. Le celle sui satelliti sono ottimizzate per uno spettro AM0.

Lo spettro AM1, invece, è lo spettro che possiamo misurare su una superficie orizzontale al livello del mare con il sole che vi incide normalmente. La Figura 1.4-1 illustra la definizione di Air Mass. Il raggio r1 attraverserà una quantità di atmosfera che chiamiamo AM1. Si suppone che l'atmosfera sia di densità uniforme attorno al globo terrestre. Se adesso un raggio che indichiamo con r2 viene raccolto ad una latitudine diversa, esso attraverserà una quantità di aria pari ad

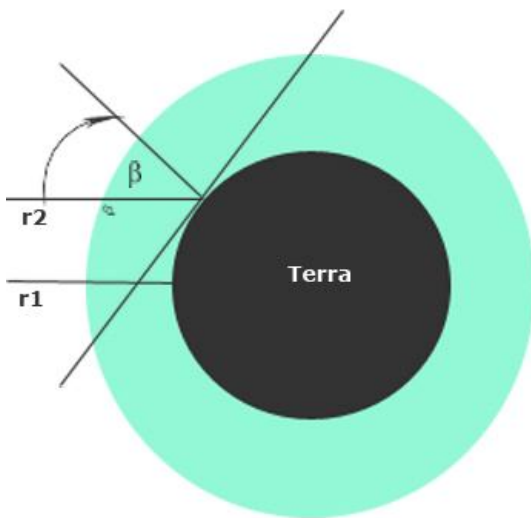


Figura 1.4-1 Air mass. La quantità di atmosfera attraversata dipende dall'angolo di incidenza.

$$AM = \frac{1}{\cos \beta}$$

Dove β è l'angolo tra i raggi incidenti e lo zenith. La formula per calcolare l'air mass è valida in buona approssimazione per β tra 0 e 70°. Per angoli superiori va considerata anche la curvatura della Terra. La valutazione dell'indice AM ha una precisa funzione dal punto di vista pratico. Attraversando l'atmosfera, infatti, lo spettro solare cambia e diminuisce anche la potenza che possiamo sperare di ricevere. L'indice è un parametro indicativo e la determinazione degli spettri effettivi è materia di discussione. Si trovano apposite tabelle che riportano i dati sugli spettri standard.

1.4.1 Lo spettro solare

L'irraggiamento al di fuori dell'atmosfera alla distanza di 1UA è di 1367W/m². Questa quantità prende il nome di costante solare. Sulla Terra l'irraggiamento medio è circa 1000W/m². La presenza dell'atmosfera provoca quindi una attenuazione dell'energia utile. Il passaggio in

atmosfera comporta anche una modificazione dello spettro come si vede in Figura 1.4-2, causato dall'interazione delle onde elettromagnetiche con alcuni elementi. In nero abbiamo riportato lo spettro AM0, in azzurro lo spettro AM1, in rosso lo spettro AM1.5d¹. Come si può vedere la componente ultravioletta più energetica viene filtrata, essa infatti interagisce con l'ossigeno in alta atmosfera producendo ozono. Vediamo anche una modificazione dello spettro nella componente infrarossa. Tutto questo viene considerato in fase di realizzazione delle celle. Le celle per uso terrestre sono tarate su uno spettro AM1.5. In genere cambiano gli spessori delle giunzioni che si adattano all'intensità delle varie lunghezze d'onda.

ASTM G173-03 Reference Spectra

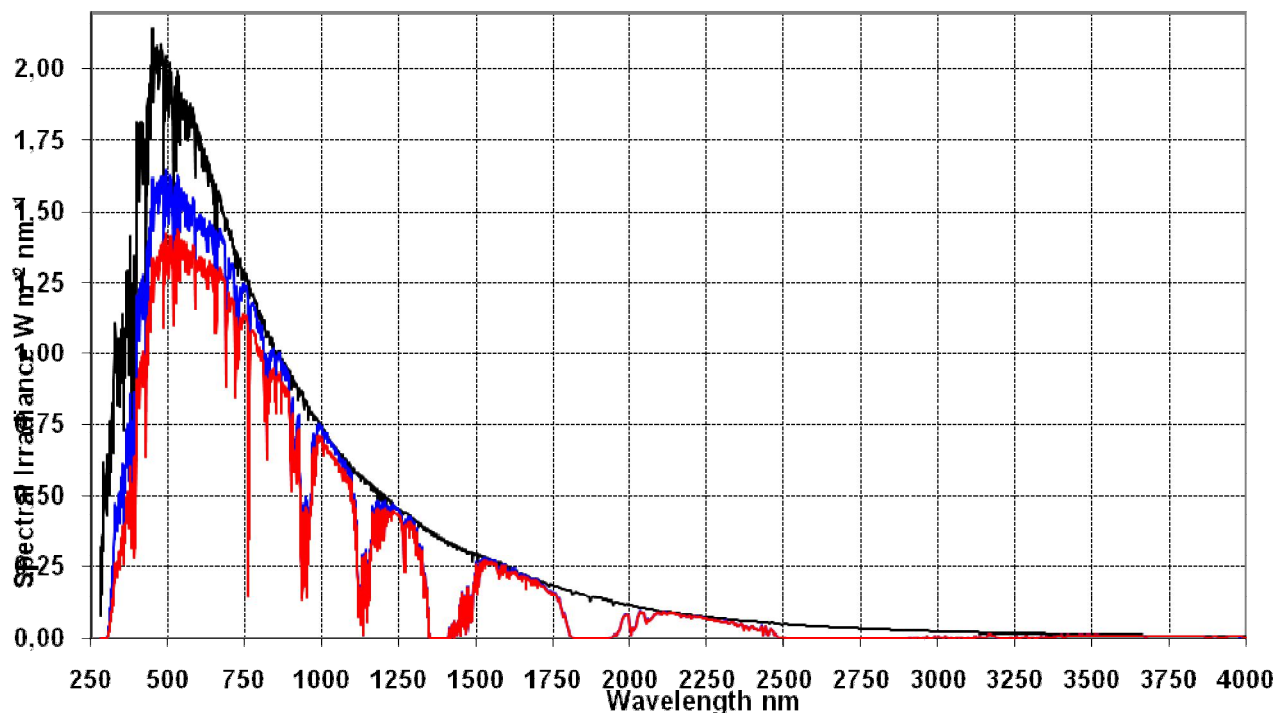


Figura 1.4-2 spettro solare AM0 nero ; AM1 rosso; AM1.5d azzurro

1.4.2 Componenti della radiazione solare

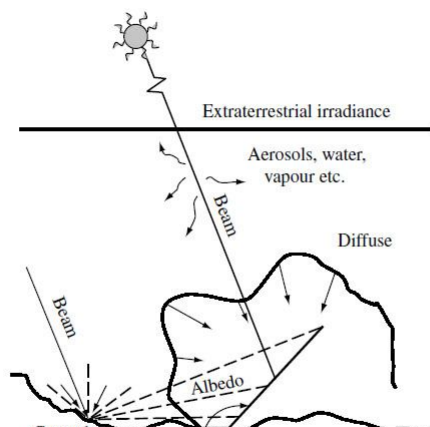


Figura 1.4-3 componenti della radiazione solare

La radiazione solare che può colpire una qualunque superficie sulla Terra è suddivisibile in tre componenti diverse. La situazione è illustrata in Figura 1.4-3.

Radiazione diretta. E' tutta quella parte di radiazione che non subisce deviazioni nel percorso Sole - Terra.

¹ La 'd' si riferisce alla porzione dello spettro riferita alla luce diretta, cioè ad esclusione di quella diffusa dagli oggetti che circondano il sensore (di solito la cella solare), come ad esempio il suolo, gli edifici circostanti, le nuvole..

Radiazione diffusa. E' la parte di radiazione che viene diffusa dalle particelle o dal vapore acqueo che inevitabilmente si trovano in atmosfera.

Albedo. E' la parte che raggiunge la superficie in esame per riflessione su altre superfici. Il contributo di questa componente in condizioni normali è abbastanza basso. Potrebbe avere una qualche rilevanza in caso di grandi superfici innevate.

Distinguere queste tre componenti è importante quando ci si occupa di fotovoltaico a concentrazione. Le ottiche di questi sistemi, siano esse lenti o specchi, focalizzano correttamente solo la componente diretta. Mentre un pannello piano tradizionale può essere investito anche dalle altre componenti. Questo comporta uno svantaggio intrinseco per i sistemi a concentrazione che sono più sensibili a pulviscolo, umidità, velatura del cielo etc ... La componente diffusa è generalmente un 15% della radiazione totale misurabile a terra in un punto qualunque con il cielo sereno. La presenza di pulviscolo o umidità può far oscillare notevolmente tale percentuale. Questa considerazione pone già dei limiti all'utilizzabilità di un sistema a concentrazione. Esso, infatti, si adatta più che altro a climi secchi e a bassa industrializzazione. Gran parte delle aree che si affacciano sul mediterraneo presentano tali caratteristiche, e costituirebbero il target di un eventuale produzione industriale.

1.5 Principio di funzionamento di una cella fotovoltaica.

Qualunque cella fotovoltaica attualmente esistente è costruita con materiali semiconduttori. E' opportuno quindi vedere come funziona un semiconduttore dal punto di vista teorico prima di entrare nello specifico dei materiali attualmente in uso. Questo consente di capire i limiti e i vantaggi di ciascuna tecnologia.

Possiamo classificare i solidi secondo la loro capacità di condurre o meno la corrente in presenza di

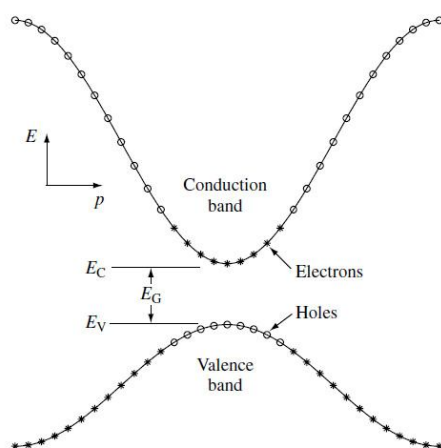


Figura 1.5-1 modello energetico semiconduttore a bandgap diretto

una differenza di potenziale. Questa classificazione avviene secondo il modello a bande di energia. Qualunque materiale è caratterizzato da una banda di valenza e da una banda di conduzione. La disposizione di tali bande determina la sua natura di isolante, conduttore, semiconduttore. Questo meccanismo delle bande è fondamentale anche nel caso delle celle fotovoltaiche.

Per semplicità esaminiamo un monocristallo ideale costituito da un elemento puro. Gli elettroni dei vari atomi sentono l'effetto di un potenziale periodico. Risolvendo le equazioni della meccanica quantistica relative a questi elettroni, vediamo che le energie possibili sono suddivise in bande. In un cristallo semiconduttore le bande utili ai nostri fini sono la banda di

Per semplicità esaminiamo un monocristallo ideale costituito da un

silicio. Sono semiconduttori che rientrano in questa classe le etero giunzioni con elementi del gruppo III-V.

1.5.1.2 Bandgap indiretto

Il semiconduttore tradizionalmente usato per le celle fotovoltaiche commerciali, cioè il silicio, ha un

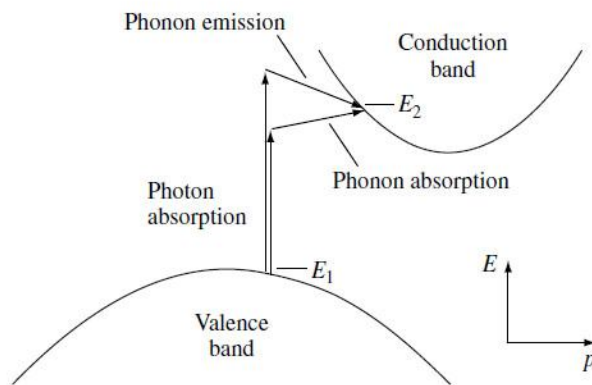


Figura 1.5-3 modello energetico semiconduttore a bandgap indiretto

meccanismo di funzionamento più articolato, perché è un semiconduttore a bandgap indiretta. Nel caso di semiconduttori a bandgap indiretta il massimo della banda di conduzione e il minimo della banda di valenza si presentano in corrispondenza di valori diversi del crystal momentum. Per tale motivo non è sufficiente che il fotone fornisca una adeguata energia, ma occorre anche che lo stesso sia accoppiato in modo corretto con un fonone. Come si vede dalla Figura

1.5-3 il fonone può essere emesso o assorbito. La cosa fondamentale è che globalmente si conservi il momento e l'energia delle particelle coinvolte. Proprio la conservazione del momento richiede l'accoppiamento del fotone e dell'elettrone con una terza particella.

E' evidente che in questo caso la probabilità che vi sia una interazione utile, cioè tale da produrre coppie elettrone-lacuna, è inferiore, rispetto al bandgap diretto. E' necessario quindi aumentare lo spessore del semiconduttore. Il silicio è un semiconduttore a bandgap indiretto. Questa situazione impone un limite intrinseco allo spessore che deve avere una cella.

I fenomeni sopra descritti sono quelli dominanti nei vari tipi di semiconduttore. C'è comunque una probabilità non nulla che fotoni sufficientemente energetici possano eccitare elettroni in un semiconduttore a bandgap indiretto, come può avvenire l'accoppiamento con fononi anche nel caso di bandgap diretto.

1.5.2 Effetti della temperatura

Il modello fisico di una giunzione a semiconduttore ci porta a stabilire che vi è una dipendenza della tensione V_{oc} dalla temperature. Questa va quantificata e considerata perché influisce sul rendimento complessivo del sistema.

Dalla fisica dello stato solido sappiamo che

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} * \ln \frac{I_{sc}}{I_0}$$

Dove k è la costante di Boltzmann, q è la carica dell' elettrone, I_{sc} è la corrente di cortocircuito della cella e I_0 è la corrente inversa di saturazione della giunzione.

Il bandgap tende a diminuire con la temperatura secondo una legge del tipo

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T}{T + \beta}$$

Dove α , β sono delle costanti che dipendono dal semiconduttore considerato.

Ricordando che la corrente di cortocircuito I_{sc} è legata alla V_{oc} dalla seguente equazione

$$I_{sc} \approx I_0 * e^{\frac{q*V_{oc}}{kT}} \approx BT^\zeta e^{\frac{-E_g(0)}{kT}} * e^{\frac{q*V_{oc}}{kT}}$$

Dove si tiene conto della dipendenza della corrente di saturazione dalla temperatura, otteniamo in ultima analisi che

$$V_{oc}(T) = \frac{1}{q} E_g(0) - \frac{kT}{q} \ln \frac{B * T^\zeta}{I_{sc}}$$

Da quest'ultima equazione si evince che ci si dovrà aspettare un calo della tensione a circuito aperto all'aumentare della temperatura.

1.5.3 Effetti della concentrazione

Se la luce viene concentrata di X soli ci si aspetta che la corrente $I_{sc}(X) = X * I_{sc}(1)$ dato che il numero di fotoni aumenta linearmente.

Ricordando l'espressione di $V_{oc}(I_{sc})$, otteniamo che la tensione in funzione della concentrazione sarà del tipo

$$V_{oc}(X) = V_{oc}(1) + \frac{kT}{q} \ln X$$

Quindi ci si aspetta un leggero aumento della tensione a circuito aperto con la concentrazione.

E' interessante notare come l'aumento della concentrazione generi due fenomeni contrapposti. La concentrazione infatti è responsabile anche dell'aumento della temperatura.

1.5.4 Efficienza (approccio termodinamico)

Prima di passare ad un'analisi specifica dei limiti dei sistemi fotovoltaici esistenti, credo sia il caso di fare alcune considerazioni sui limiti teorici imposti dalla termodinamica a questi sistemi di conversione. L'analisi fu compiuta da Shockley fin dal 1960. Innanzitutto possiamo considerare il sole come un corpo nero alla temperatura di 5777K. Come sappiamo dalla termodinamica, qualunque processo che opera tra due sorgenti a temperatura T_1 e T_2 ha come valore limite irraggiungibile il rendimento di un ciclo di Carnot. Considerando una temperatura del nostro sistema di circa 300K otteniamo un rendimento di circa il 95%. Questo limite considera un sistema che non produca una variazione di entropia. Valutazioni più precise che tengono conto anche di una riflessione ineliminabile portano ad un rendimento limite del 93.3%. Tutto questo senza utilizzare alcuna proprietà del sistema di produzione dell'energia.

Se andiamo invece sullo specifico esaminando sistemi a semiconduttore, il limite teorico per una singola giunzione ideale è del 40.7%. Mentre il limite teorico supponendo di accostare n giunzioni opportune è 86,8%. La cella ad n -giunzioni si avvicinerebbe parecchio ad un sistema di Carnot.

Consideriamo sempre che tali limiti vengono calcolati ipotizzando proprietà del tutto generiche ed ideali, cioè si fa uso di "semiconduttori costruiti ad hoc". E' utile comunque aver presente questi numeri. Ci dicono fino a dove possiamo spingerci. Si spiegano inoltre gli sforzi per sviluppare sistemi adeguati all'uso di celle multi giunzione.

1.5.5 Concentratori

Il primo prototipo di concentratore esposto al sole nasce nel 1976 ai National Sandia Laboratories con una installazione da 1KW. Impianto a lenti di Fresnel, concentrazione 50X, tracking biassiale.

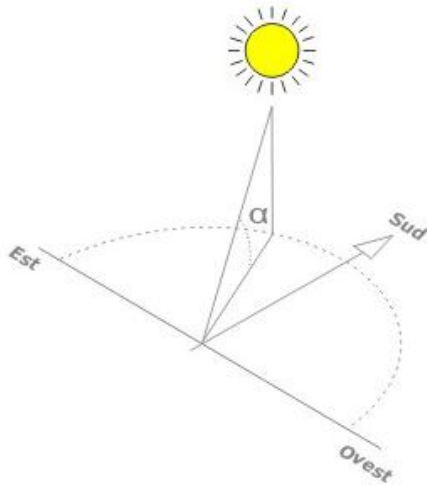
In generale un concentratore per fotovoltaico è un sistema composto essenzialmente da quattro elementi

- Celle ottimizzate per la concentrazione (multigiunzione o silicio).
- Ottica per raccogliere e focalizzare la luce (lenti o specchi).
- Meccanica per l'inseguitore.
- Elettronica per pilotare il sistema in modo efficiente.

Dagli anni '70 ad oggi ciascuno di questi punti è stato esplorato, studiato, migliorato. Numerosi sono stati i prototipi e le installazioni sperimentali che si trovano sfogliando un qualunque libro sull'argomento. Nello studio di questo nostro primo prototipo sono state considerate tutte queste parti.

Tracking biassiale

Un sistema fotovoltaico a concentrazione, per poter operare, deve avere l'asse ottico sempre orientato verso il sole. Per poter inseguire il moto apparente del sole in cielo durante la giornata e durante tutto l'anno è necessario che l'apparato possa ruotare attorno a due assi, cioè il sistema deve avere due gradi di libertà.



1.5-4 altezza solare

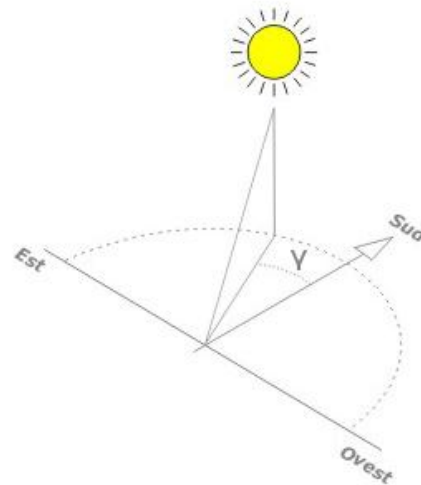


Figura 1.5-5 azimuth

Come si vede in figura 1.5-4 la posizione del sole si può determinare conoscendo due angoli α detto altezza solare che è il complemento dello zenith e γ detto azimuth che è l'angolo tra la direzione sud e la proiezione ortogonale sul piano ...

L' altezza solare si può determinare conoscendo alcuni parametri locali secondo l'equazione:

$$\sin \alpha = \sin L * \sin \delta + \cos L * \cos \delta * \cos h$$

Dove L indica la latitudine del luogo in cui si trova il nostro inseguitore, δ è la declinazione, h è la distanza angolare tra il sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste; è anche pari all'angolo di cui deve ruotare la terra affinché il sole si porti sopra il meridiano locale.

Declinazione δ

La declinazione è l'angolo che formano i raggi solari a mezzogiorno, nella località considerata, con il piano equatoriale.



Figura 1.5-6 declinazione

La declinazione si può calcolare in modo approssimato con la seguente formula di Cooper:

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right)$$

Dove n indica il giorno dell'anno. In questa formula la declinazione viene considerata costante nell'arco di una giornata. La sua variazione sarebbe di circa 0.4°/giorno.

Azimuth γ

E' l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud; è positivo se la proiezione cade verso est (prima del mezzogiorno solare) ed è negativo se la proiezione cade verso ovest (dopo mezzogiorno) come si vede in Figura 1.5-5. Anche questo angolo si può calcolare conoscendo i parametri locali Latitudine e declinazione. La formula per la determinazione di tale angolo è la seguente:

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta * \sin h}{\cos \alpha}$$

Dato che la posizione del sole è completamente determinata dagli angoli α , γ e che ciascun angolo ha una dipendenza temporale è necessario disporre di un sistema che sia in grado di ruotare attorno a due assi per ottenere una corretta orientazione durante la giornata.

1.5.6 Celle

Come si vedrà nel paragrafo 1.6, la soluzione ottimale sembra attualmente quella delle celle multi giunzione. Esse, infatti, sono le uniche che, anche dal punto di vista teorico, hanno limiti di efficienza molto elevati. Tali celle sono oggetto di studio nel prototipo analizzato in questo lavoro.

1.5.7 Ottica

Le ottiche possibili sono sia specchi che lenti. Entrambe le soluzioni, infatti, se di forma opportuna possono focalizzare la luce. Le lenti che si usano sono quelle di Fresnel, per le loro caratteristiche peculiari, rispetto ad altre tipologie di lenti.

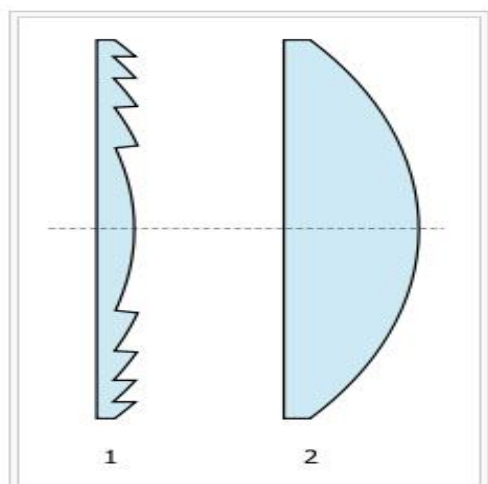


Figura 1.5-7 lente di Fresnel (1) lente equivalente tradizionale (2)

soluzioni sperimentate dagli anni '70 ad oggi usano questo tipo di tecnologia.

E' abbastanza facile da costruire. E' sufficiente, infatti, costruire una scatola con la lente come "coperchio", di dimensioni opportune affinché la focalizzazione sia localizzata sulla cella.

Le lenti funzionano secondo il principio della rifrazione. Quando un raggio luminoso incide sulla superficie di separazione fra due mezzi, con indice di rifrazione diverso, viene rifratto secondo la legge di Snell

1.5.7.1 Approccio a lenti di Fresnel (rifrazione)

La lente utilizzata nei sistemi fotovoltaici è quella di Fresnel. La lente di Fresnel è caratterizzata dal fatto di avere una larga apertura e una focale corta. Ha un volume estremamente ridotto rispetto ad una lente equivalente costruita in modo tradizionale come si vede in Figura 1.5-7. Viene prodotta in materiali plastici o su supporto vetroso. E' la tecnologia più facile da usare per iniziare con un prototipo. La maggior parte delle

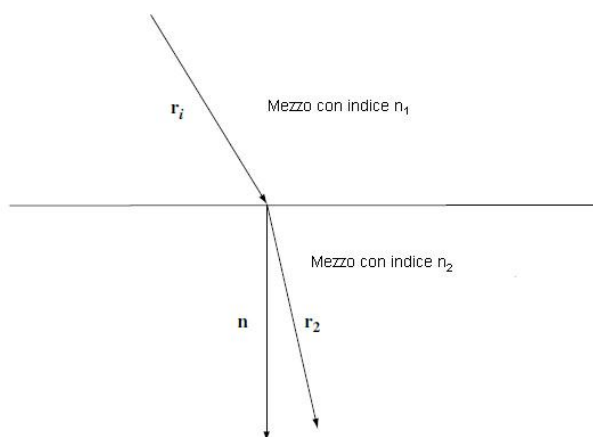


Figura 1.5-8 rifrazione di un raggio luminoso

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

con n_1 ed n_2 indici di rifrazioni dei mezzi. L'indice di rifrazione è generalmente una funzione $n(\lambda)$ con λ lunghezza d'onda della luce incidente. Per questo motivo l'approccio rifrattivo comporta la presenza dell'aberrazione cromatica. Tale fenomeno è dannoso per

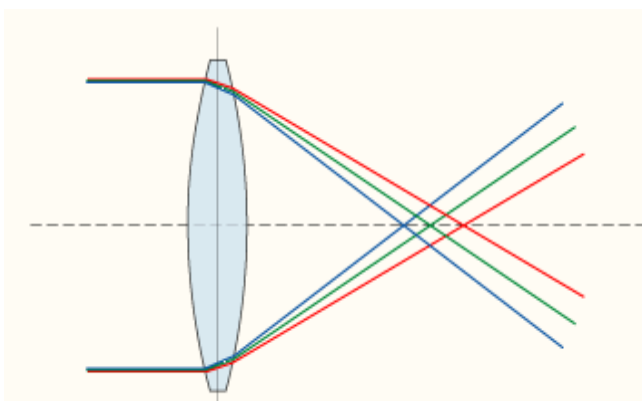
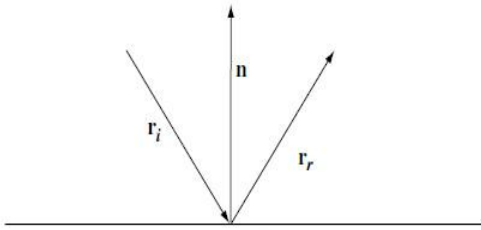


Figura 1.5-9 aberrazione cromatica

l'efficienza del sistema fotovoltaico. Si vedrà in seguito che le celle multigiunzione sono ottimizzate per ricevere tutto lo spettro in modo uniforme, l'eventuale disuniformità provoca uno sbilanciamento delle correnti.

L'approccio a lenti di Fresnel richiede comunque l'uso di omogeneizzatori per adattare lo spot della lente alla cella e per rendere uniforme l'intensità luminosa su di essa. Tra i motivi per cui nei prototipi moderni si usano celle sempre più piccole c'è anche questo. L'altro motivo è che la potenza termica da dissipare si riduce e quindi dovrebbe essere più facile realizzare un sistema di dissipazione adeguato.



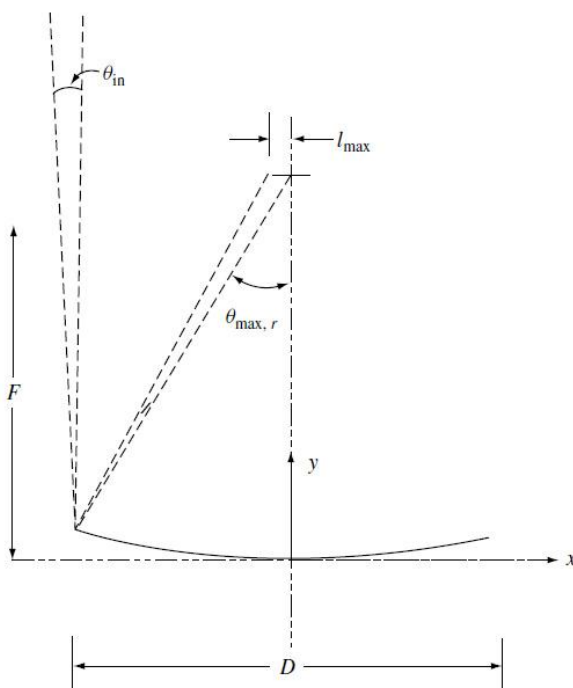
1.5.7.2 Approccio a Specchi (riflessione)

Figura 1.5-10 riflessione su una superficie

In riflessione non si presenta il problema dell'aberrazione cromatica. L'angolo di incidenza è semplicemente uguale all'angolo di riflessione. Si può quindi pensare di realizzare una superficie di forma opportuna che focalizzi i raggi su un punto o su una linea e porre le celle in corrispondenza della luce concentrata. Le celle vanno poste ad una distanza opportuna dal piano focale in modo tale che l'illuminazione sia uniforme.

La configurazione più semplice per ottenere uno specchio concentratore è quella in cui la superficie riflettente ha una forma parabolica. Uno specchio parabolico è definito dalla semplice equazione

$$y = \frac{x^2}{4 \cdot F}$$



1.5-11 riflessione di raggi non perfettamente paralleli all'asse ottico

se immaginiamo un piano cartesiano con l'asse y in corrispondenza dell'asse della parabola. F è la distanza focale della parabola. È facile vedere che raggi paralleli all'asse della parabola, convergono tutti sul fuoco.

Entrambi gli approcci, riflessivo e rifrattivo, richiedono una sorgente luminosa che invia raggi paralleli. Il sole, quando lo specchio o la lente sono opportunamente orientati, però non può essere considerato con

buona approssimazione una sorgente di questo tipo: l'angolo sotto il quale dalla terra si vede il sole è di circa 0,5 gradi (esattamente 32').

1.5.8 Meccanica di inseguimento

In sistema a concentrazione deve necessariamente disporre di una meccanica per l'inseguimento. Oggi esistono anche sistemi a pannelli piani dotati di meccanica di inseguimento. Nel caso dei pannelli piani, però, si tratta di una opzione facoltativa. L'inseguimento per tali sistemi consente di raccogliere sempre la massima quantità di energia, rendendo minimo l'angolo di incidenza sulla superficie del pannello. Quando i raggi sono fortemente inclinati rispetto al pannello, infatti, la densità di energia è inferiore L'incremento di energia prodotta a parità di potenza installata fra un modulo a silicio con inseguitore e uno senza è del 30%.

In un sistema a concentrazione, l'inseguimento è una necessità. Come abbiamo visto sopra, infatti, il principio di funzionamento è legato a considerazioni di ottica geometrica. La focalizzazione sulla cella funziona correttamente solo se i raggi arrivano da una determinata direzione, che è quella parallela all'asse ottico del sistema di lenti o specchi, altrimenti la cella non viene illuminata. I sistemi sono disegnati per focalizzare raggi che incidono in modo normale al piano di giacenza dello specchio. Cioè, dal punto di vista pratico, lo specchio deve essere sempre rivolto verso il sole. Le condizioni quindi sono più stringenti. Mentre per i pannelli piani ci si può permettere un certo scarto, per un inseguitore ottico l'errore di posizionamento deve idealmente tendere a zero, compatibilmente con la tecnologia in uso.

La meccanica è certamente uno dei punti chiave dal momento che deve rispondere a requisiti di precisione, affidabilità e semplicità.

In un ambiente non sperimentale, la meccanica è sottoposta a sollecitazioni (vento, piogge), usura, ossidazione. Per tale motivo il sistema di movimentazioni dovrà essere semplice e robusto. La necessità di focalizzare su regioni piccole ($\leq 5\text{mm} \times 5\text{mm}$) richiede inoltre una notevole precisione del sistema di movimentazione. In questo prototipo abbiamo utilizzato la struttura di movimentazione di un telescopio già esistente; non ci saranno quindi particolari considerazioni a tal proposito.

1.5.9 Elettronica

Un sistema che insegue il sole non può fare a meno di un controllo di tipo elettronico. Di seguito verrà trattato in modo dettagliato l'approccio che abbiamo utilizzato per automatizzare l'inseguitore.

Gli approcci possibili sono vari. Si può pensare ad un'elettronica che con appositi sensori misuri lo spostamento del sole e faccia muovere l'apparato. Altre idee sono quella di inserire in un apposito software le tabelle con le posizioni del sole calcolate e far muovere il sistema di conseguenza. Si

potrebbe anche pensare di seguire il criterio della massima potenza per regolare l'apparato. Ogni approccio presenta dei limiti che possiamo riassumere in tabella.

La soluzione scelta e studiata in questo lavoro è la prima: sensori che misurano il movimento apparente del sole in cielo. Il circuito è completamente indipendente, non richiede indicazioni temporali o geografiche per funzionare.

	Pregi	Difetti
Elettronica passiva.	<ul style="list-style-type: none"> • Non richiede geolocalizzazione • Non richiede sincronizzazione temporale 	<ul style="list-style-type: none"> • Reazioni limitate ad eventi atmosferici • Richiede sensori che possano spaziare su un ampio angolo solido
Controllo con tabelle software.	<ul style="list-style-type: none"> • Può trovare il sole in qualunque momento 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede geolocalizzazione • Richiede sincronizzazione temporale • Le formule sono approssimate e probabilmente richiedono correzioni sul lungo periodo
Controllo con computer	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di inserire comportamenti "intelligenti" in presenza di eventi atmosferici • Possibilità di controllo varie e personalizzabili 	<ul style="list-style-type: none"> • Poco adatto ad installazioni di piccole dimensioni

1.6 Confronto fra celle a giunzione multipla e a giunzione singola

L'attuale tendenza per i sistemi di nuova generazione è verso l'uso di celle multi giunzione. E' opportuno quindi esaminare le motivazioni, anche teoriche, che hanno condotto a questa scelta.

1.6.1 Limiti teorici di una singola giunzione

Una cella fotovoltaica a bandgap singolo è caratterizzata dalla proprietà di assorbire i fotoni con energia $h\nu > E_g$ dove E_g è la bandgap caratteristica del semiconduttore. L'energia in eccesso $h\nu - E_g$ viene dispersa in calore. I fotoni con energia inferiore ad $h\nu$ non sono abbastanza energetici da eccitare elettroni, quindi ai fini pratici non concorrono a produrre corrente. Una cella a singola

giunzione, quindi, è limitata in modo intrinseco dal suo bandgap. Lo spettro solare utile è compreso tra energie di 0 e 4eV. Stabilito che una cella a singola giunzione può assorbire solamente una

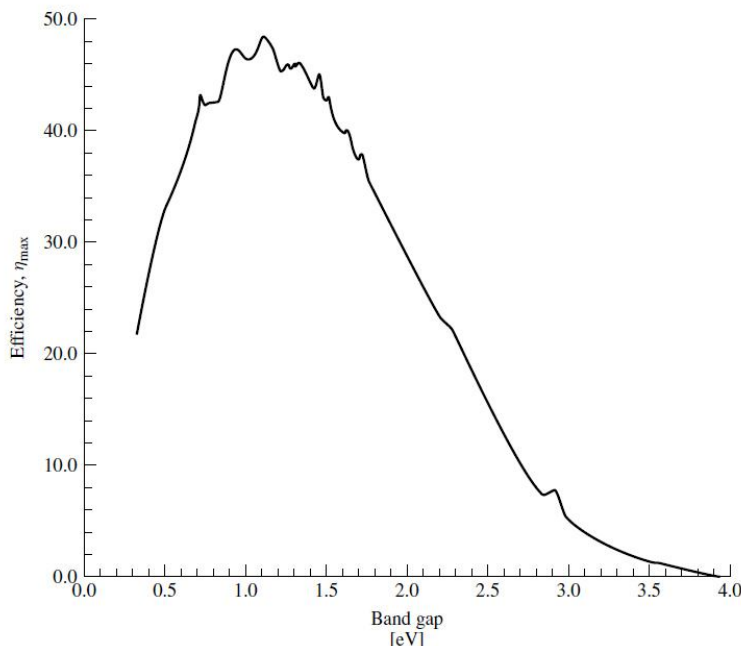


Figura 1.6-1 efficienza teorica in funzione del bandgap del semiconduttore

porzione limitata dello spettro solare, ci si può chiedere quale sia il bandgap ottimale, e quindi quale sia la massima efficienza teorica raggiungibile con un opportuno semiconduttore. In Figura 1.6-1 vediamo il grafico dell'efficienza teorica in funzione del bandgap del semiconduttore usato. Il picco di efficienza è attorno a 1.1eV che corrisponde al bandgap del silicio. Sebbene il limite teorico per il un semiconduttore a singola giunzione sembri essere del 48%, altre considerazioni sulla struttura del Silicio portano ad un'efficienza del 30%. Attualmente non esiste nessun pannello con tale efficienza che è comunque un valore teorico.

1.6.2 Celle multi giunzione

Fin dai primi anni di studio sistematico dei semiconduttori, ci si chiese se fosse possibile creare dei sistemi più efficienti, tali da coprire una porzione di spettro maggiore. L'idea, abbastanza intuitiva, fu quella di pensare a delle giunzioni multiple. Le cosiddette celle multi giunzione sono caratterizzate da bandgap multipli via via decrescenti, in questo modo possono assorbire gran parte dell'energia che andrebbe perduta su una singola giunzione.

Ci si può chiedere se esiste un numero ottimale di giunzioni e quanto sia sensato spingersi troppo oltre. Come esperimento mentale si può pensare di coprire al limite tutto lo spettro utile. Ammesso comunque di trovare il giusto mix di semiconduttori, uno studio teorico di Henry [1], ha dimostrato che per un numero basso di giunzioni (2 o 3) l'incremento è significativo. La pendenza della curva nel grafico, infatti è molto marcata nei primi punti. L'incremento è sempre più basso, aumentando il numero di giunzioni. Non vi è quindi un vantaggioso rapporto costo-beneficio per realizzare celle con un numero eccessivo di giunzioni. La tripla giunzione sembra, al momento, un compromesso ragionevole.

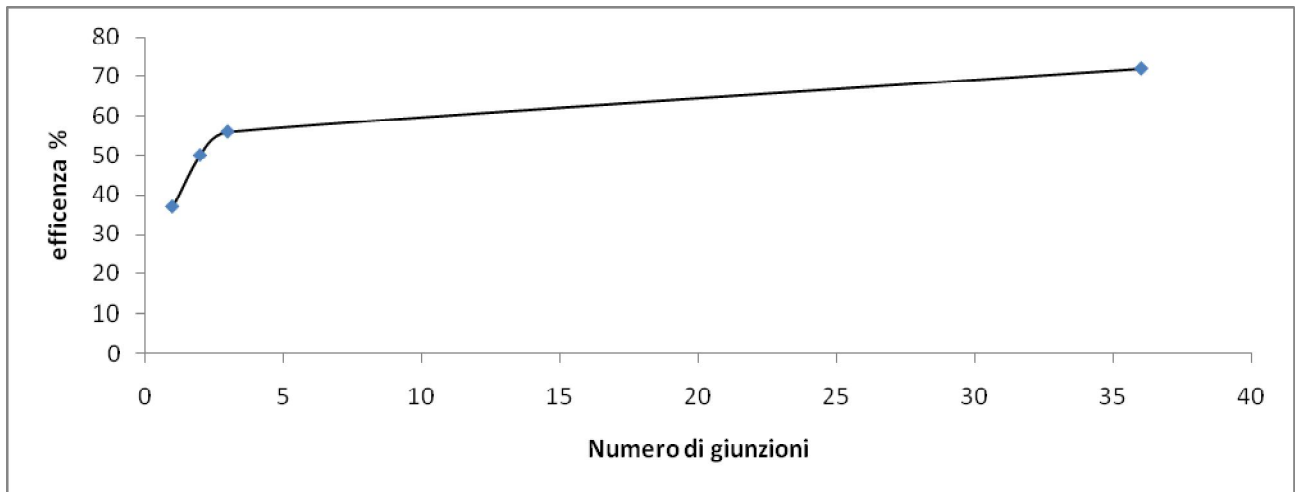
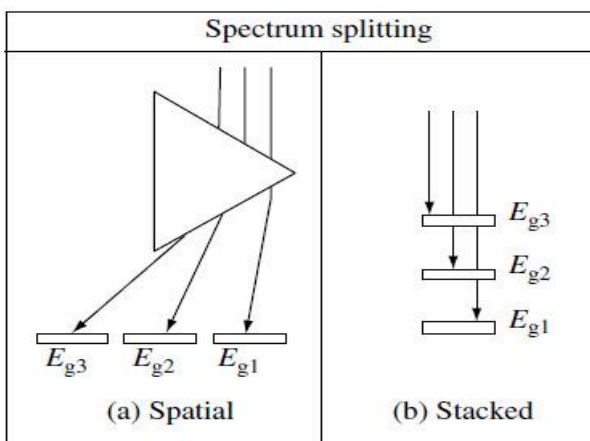


Figura 1.6-2 efficienza in funzione del numero di giunzioni

I metodi per lavorare con un sistema multi giunzione, concettualmente possono essere due. Si potrebbe usare un mezzo dispersivo, quale un prisma per suddividere lo spettro. Le varie porzioni verrebbero inviate a celle specifiche. Tale metodo è stato oggetto di studio e di prototipizzazione. (Spectrum Splitting con specchi diecrici Enea)



Il secondo approccio è quello di sovrapporre le giunzioni. Scegliendo una serie di bandgap opportuna è possibile assorbire l'energia che le giunzioni soprastanti non utilizzano. In questo approccio il bandgap è via via decrescente. La situazione è illustrata in Figura 1.6-4.

L'approccio a giunzioni sovrapposte, a sua volta, si può dividere in due sottosistemi.

Figura 1.6-3 (a) splitting spaziale dello spettro con un prisma. (b) splitting dello spettro per sovrapposizione di giunzioni con diverso bandgap. ($E_{g3} > E_{g2} > E_{g1}$)

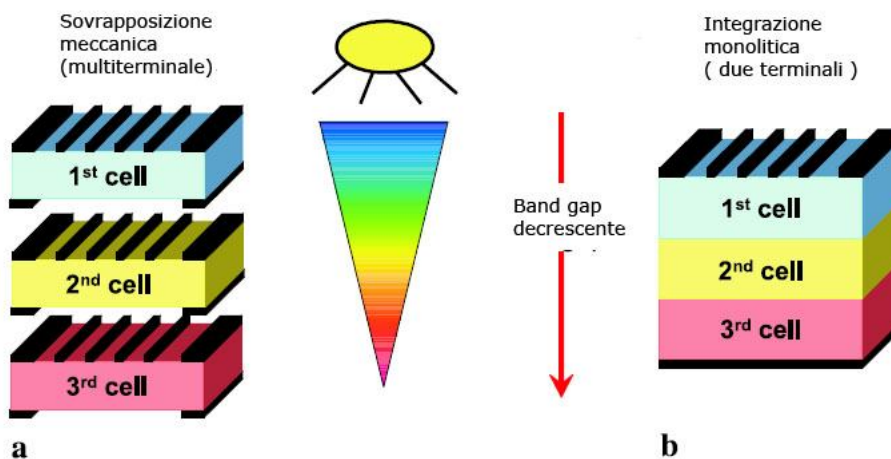


Figura 1.6-4 (a) celle sovrapposte, con contatti metallici. (b) cella monolitica, contatti solo agli estremi del blocco

E' possibile pensare ad una sovrapposizione meccanica nella quale le singole giunzioni vengono unite da contatti metallici, oppure l'integrazione monolitica, nella quale le giunzioni vengono fatte crescere una sull' altra.

Dal punto di vista tecnologico la soluzione di integrazione monolitica si è dimostrata più semplice. La configurazione monolitica richiede che la fotocorrente nelle singole giunzioni sia la stessa. Se così non fosse, infatti, la giunzione che produce meno corrente dominerebbe sulle altre, essendo il sistema connesso in serie. In fase di costruzione, quindi, si sceglie in modo accurato la struttura delle bande. Fortunatamente gli elementi del gruppo III-V su substrato di germanio, hanno evidenziato buone proprietà di "band matching".

[1] Henry C, *J. Appl. Phys.* **51**, 4494–4500 (1980).

1.6.3 Aberrazione cromatica

In celle di questo tipo l'illuminazione deve essere molto uniforme. E' evidente, infatti, che una eventuale dispersione della luce da parte del concentratore (es: lenti) andrebbe a creare uno sbilanciamento delle giunzioni, cioè la distribuzione delle correnti sarebbe non omogenea. Se fossimo in presenza di aberrazione cromatica, per esempio, avremmo porzioni di spettro concentrare su regioni specifiche. Essendo la struttura di assorbimento verticale, le giunzioni non lavorerebbero correttamente.

1.6.4 Dipendenza dallo spettro

Lo spettro diretto che misuriamo sulla superficie terrestre è diverso dallo spettro AM0 misurato nello spazio libero. La presenza dell'atmosfera condiziona le lunghezze d'onda presenti nella luce diretta. Lo standard usato solitamente per applicazioni terrestri è lo spettro AM 1.5d . Al lato pratico, per quel che riguarda il design della cella, la variazione di spettro si traduce nella necessità di uno spessore diverso per la giunzione superiore. Indicativamente 0.5 μ m per applicazioni AM0 e 1 μ m per applicazioni AM 1.5. In realtà la situazione non è così definita, perché lo spettro reale è generalmente diverso e l' AM 1.5 si potrebbe considerare un valore limite.

Le celle a tripla giunzione per uso terrestre sono ottimizzate in genere per uno spettro AM1.5d. Lo spettro solare diretto, attraversando l'atmosfera, perde una porzione di lunghezze d'onda nella regione del blu. La luce azzurra viene diffusa più facilmente. Il design della cella deve tenere conto di queste fluttuazioni di spettro dovute alla presenza dell'atmosfera.

1.7 Caratterizzazione delle celle fotovoltaiche

1.7.1 Il modello circuitale della cella fotovoltaica

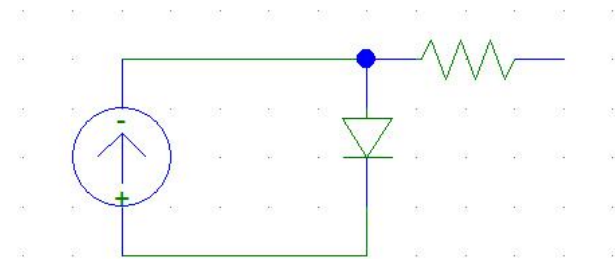


Figura 1.7-1 modello circuitale della cella fotovoltaica

poter comprendere meglio il suo comportamento e verificare se i dati misurati corrispondono alle aspettative. Come abbiamo visto in precedenza, i fotoni interagiscono con la giunzione facendo accumulare cariche negative da una parte e positive dall'altra. Quindi se applichiamo un connettore alle estremità della giunzione, le cariche tenderanno a riequilibrarsi.

La cella ideale si può immaginare come un generatore di corrente con in parallelo un diodo. Nel nostro caso dovremmo considerare tre giunzioni diverse, ma ai fini pratici possiamo raggrupparle in un unico diodo con tensione di innesco opportuna. Il verso della corrente fotogenerata è tale da polarizzare direttamente la giunzione. In Figura 1.7-1 è illustrato il modello circuitale, completo di una resistenza che rappresenta l'impedenza d'uscita del sistema. Tale resistenza in genere è minima e viene accuratamente calcolata in fase di costruzione della cella. Dal modello circuitale appare chiaro il comportamento della cella in presenza di un carico. Applicando un carico variabile, infatti,

E' consuetudine in elettronica sostituire elementi complessi con il loro modello circuitale, laddove questa operazione sia possibile, per poter studiare il loro comportamento in reti più o meno complesse. Dato che nel nostro prototipo la cella va collegata a carichi e strumenti di misura, è utile esaminarne il modello circuitale equivalente per

la corrente tende a fluire sullo stesso, fino a quando la caduta di potenziale sul carico non è uguale alla tensione di innesco del diodo. In questo momento la corrente fluisce attraverso la giunzione, azzerando la corrente che misuriamo sul carico. Fino a quando la differenza di potenziale indotta sul carico dalla corrente generata dalla cella è inferiore alla tensione di innesco, il sistema si comporta come un generatore di corrente pressoché costante. Un esempio più dettagliato viene fornito nel paragrafo 1.9 dove andiamo a considerare la serie di più celle.

1.7.2 La curva V-I

Per caratterizzare una cella fotovoltaica è necessario tracciare la sua curva caratteristica V-I. Si tratta di misurare la corrente fornita dalla cella ad una tensione determinata dall'utilizzatore (cioè in presenza di un certo carico). La curva giace sul primo quadrante del piano V-I ed interseca l'asse delle ascisse nel punto $(V_{OC}, 0)$ e l'asse delle ordinate nel punto $(0, I_{SC})$. V_{OC} tensione a circuito aperto, I_{SC} corrente di cortocircuito sono due parametri caratteristici della cella.

La curva è una fotografia di tutti i punti di lavoro possibili della cella, fissate le condizioni di temperatura e intensità luminosa. Esaminando la curva possiamo vedere quale è la potenza erogabile in funzione del carico. La potenza è facilmente calcolabile misurando la tensione e la corrente del punto di lavoro. L'area del rettangolo di vertici $(0, 0)$, $(V_{max}, 0)$, (V_{max}, I_{max}) , $(0, I_{max})$ è la potenza erogata dal sistema. Come si vede dalla

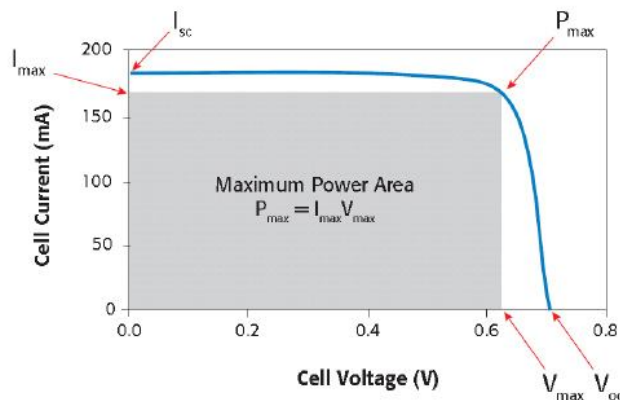


Figura 1.7-2 curva V-I di una cella fotovoltaica. L'area in grigio definisce la potenza erogata dalla cella.

si vede dalla spostando il punto di lavoro otteniamo potenze diverse. Non è quindi così immediato connettere un carico ad un sistema fotovoltaico se vogliamo ottenere il massimo rendimento. L'ideale sarebbe posizionare il punto di lavoro in modo da massimizzare l'area del rettangolo grigio.

In un sistema di laboratorio esposto ad una sorgente luminosa uniforme e costante, il punto di lavoro con la massima potenza può essere facilmente misurato. In condizioni reali la sorgente luminosa è il sole e le condizioni ambientali sono mutevoli nel tempo. Il punto

di lavoro fluttua continuamente in modo imprevedibile, perché dipende sia dall'illuminazione che dalla temperatura (si pensi, ad esempio, al caso estremo in cui passa una nuvola che oscura temporaneamente il sole). L'inseguimento del punto di massimo è così importante che ormai tutti gli inverter di una certa potenza integrano un'elettronica opportuna dedicata a questo compito (maximum power point tracking: MPPT). Lavorare in condizioni non ottimali, infatti, comporterebbe una perdita di efficienza che può essere anche notevole, con una conseguenza perdita economica.

1.7.2.1 Tracciare la curva V-I

Dal punto di vista sperimentale per tracciare la curva V-I, si collega un carico variabile capace di assorbire una potenza massima opportuna, cioè pari almeno alla potenza erogata dal sistema fotovoltaico che stiamo testando.

La variazione del carico consente di percorrere l'insieme dei punti di lavoro. Molta attenzione deve essere posta all'eliminazione di resistenze di contatto fra i cavi

1.8 Figure di merito

Una volta tracciata la curva V-I, una sua analisi completa fornisce l'insieme delle figure di merito del sistema. Tali figure caratterizzano completamente il sistema fotovoltaico in esame.

Se fossimo in presenza di un sistema completamente ideale, potremmo immaginare la giunzione come un circuito aperto per tensioni sul carico minori della tensione V_{oc} . Al raggiungimento di tale tensione, avremmo un cortocircuito e la corrente fluirebbe tutta sulla giunzione.

Per misurare il discostamento dall'idealità si introduce il Fill Factor. Questo parametro è definito dal rapporto tra la massima potenza ottenibile dal sistema e la potenza che si otterrebbe con un profilo perfettamente rettangolare.

$$FF = \frac{V_{max} * I_{max}}{V_{sc} * I_{sc}}$$

Altro parametro del sistema fotovoltaico è l'efficienza η

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

Dove P_{in} è la potenza ottica che arriva alla cella, P_{max} è la potenza massima erogata dalla cella.

La corrente I_{sc} dipende essenzialmente dall'intensità della luce che arriva alla cella, nel nostro caso dalla concentrazione. La tensione V_{oc} a circuito aperto è una caratteristica della cella e dipende dalla temperatura e dalla concentrazione.

Dalla fisica dello stato solido si comprende che la tensione tende a diminuire aumentando la temperatura. Se guardiamo il modello a bande, vediamo infatti che la tensione dipende dalla posizione dei livelli di Fermi nelle due parti della giunzione. Aumentando la temperatura il livello di Fermi tende a portarsi al centro della bandgap, riducendo quindi il disallineamento dei livelli il FF dipende anche dalla resistenza serie della cella.

1.9 Connessione di più celle

La tipica tensione delle celle fotovoltaiche a tripla giunzione in uso è tra 2,8V e 3V, mentre quelle al silicio hanno 0,7V. Volendo sviluppare un prototipo che possa essere connesso in rete o comunque ad inverter e utilizzatori standard, è necessario avere tensioni più elevate. Un tipico inverter per piccole installazioni non accetta meno di alcune centinaia di Volt.

L'utilità di avere tensioni elevate è un fatto generale quando sono coinvolti sistemi per produrre energia elettrica. E' meno dispersivo distribuire la potenza con alte tensioni e basse correnti sulle linee. La potenza dissipata su un cavo è proporzionale a $R \cdot I^2$, per ridurre la resistività di un cavo è necessario aumentarne la sezione. Comunemente le linee di distribuzione principali dell'energia elettrica sono a tensioni dell'ordine di 10^5 V. Tensione che viene poi trasformata in prossimità degli utilizzatori a valori più bassi.

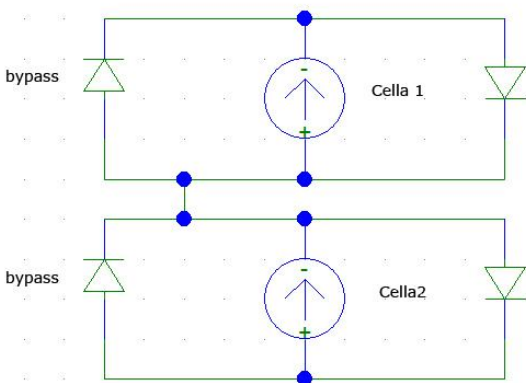


Figura 1.9-1 circuito equivalente di due celle in serie

Connettendo in serie più celle, abbiamo che la corrente rimane costante, la tensione che possiamo prelevare diventa la somma delle tensioni. Se la catena non è perfettamente bilanciata, cioè se le correnti delle varie celle sono diverse (caso tipico è il parziale ombreggiamento del sistema fotovoltaico, nel CPV si può anche pensare ad un ottica parzialmente non funzionante o ad una cella difettosa), si può avere la contro polarizzazione della giunzione. La soluzione standard per ovviare a questo inconveniente è illustrata in Figura 1.9-1. Si introducono dei diodi di bypass con polarità inversa rispetto a quella della cella. In questo modo aggiungiamo un ramo su cui può scorrere la corrente "in eccesso". Se le celle funzionano correttamente, ogni generatore equivalente assorbe la corrente della catena che lo precede, altrimenti interviene il diodo di bypass. Vediamo brevemente quali sono i casi possibili.

Circuito aperto

A circuito aperto, in caso di funzionamento ideale, la corrente circola e si chiude sulla giunzione di ciascuna cella. Tutti i diodi equivalenti saranno direttamente polarizzati e quindi andremo a misurare una tensione V_{oc} che è esattamente la somma delle tensioni a circuito aperto di ciascuna cella. Anche se una cella funziona parzialmente, cioè produce meno corrente delle altre, avremo che la tensione misurata sarà la somma delle tensioni V_{oc} delle celle. Essa infatti è determinata dalla polarizzazione della giunzione di cella e non dalla quantità di corrente generata.

Connettendo in serie più celle, abbiamo che la corrente rimane costante, la tensione che possiamo prelevare diventa la somma delle tensioni. Se la catena non è perfettamente bilanciata, cioè se le correnti delle varie celle sono diverse (caso tipico è il parziale ombreggiamento del sistema fotovoltaico, nel CPV si può anche pensare ad un ottica parzialmente non funzionante o ad una cella difettosa), si può avere la contro polarizzazione della giunzione. La soluzione standard per ovviare a questo inconveniente è illustrata in Figura 1.9-1. Si introducono dei diodi di bypass

Corto circuito

Essendo le celle connesse in serie, la corrente di cortocircuito è la stessa che fluisce da una singola cella. In caso di parziale funzionamento di una delle celle, la corrente di corto circuito sarà sempre vicina alla massima. La eventuale corrente in eccesso proveniente da altre celle, infatti, fluirebbe in parte sul ramo di bypass, in parte verrebbe assorbita dal generatore di corrente equivalente della cella.

Situazioni intermedie (carico variabile)

Applicando un carico variabile abbiamo tutta una serie di situazioni intermedie. La tensione misurata ai capi della serie di celle, sarà data dalla legge di Ohm applicata al carico. Supponiamo di indicare con R la resistenza del carico, I_{sc} la corrente massima erogabile dalla cella, ci si aspetta una tensione data da

$$V = R * I_{sc}$$

La corrente reale sarà inferiore a I_{sc} , ma in prima approssimazione possiamo considerarla costante. Questo meccanismo funziona fino a quando $V < V_{oc}$. Dove V_{oc} è la tensione dell'array misurata a circuito aperto. Avvicinandosi alla tensione di array, le giunzioni iniziano a polarizzarsi direttamente costituendo un canale preferenziale per la corrente e portando ad un rapido smorzamento. La pendenza della curva in questa regione è quasi verticale. Di fatto la curva caratteristica V-I illustra questo meccanismo.

Se una delle celle funzionasse parzialmente, lo si vedrebbe sulla curva caratteristica. Essa infatti presenterebbe dei "gradini" in corrispondenza delle correnti dalla cella meno attiva. La situazione verrà illustrata meglio nel capitolo riguardante le misure, dove una curva caratteristica presenta proprio questa anomalia.

2 Il prototipo di inseguitore

Iniziamo ora ad analizzare il prototipo che è stato testato in questo lavoro.

Le celle Emcore

2.1.1 Unità di misura e condizioni standard

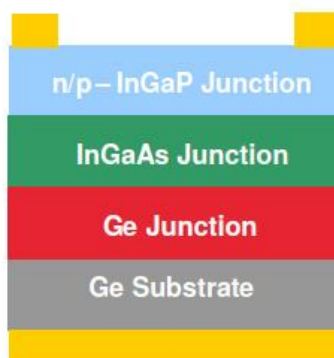
Le specifiche tecniche delle celle fotovoltaiche vengono fornite per sistemi operanti a 25°C con irraggiamento di 1000W/m².

La concentrazione viene misurata in “soli”. 1 sole = 1000W/m². In questa unità di misura la concentrazione è definita come

$$C = \frac{P_{in}}{0,1 \cdot S}$$

Dove P_{in} è la potenza ottica incidente su una singola cella, S la superficie della cella espressa cm². E' essenzialmente il numero di sorgenti luminose capaci di erogare 1KW/m² necessario ad ottenere la stessa intensità luminosa sulla cella, in assenza di concentrazione.

2.1.2 Celle utilizzate

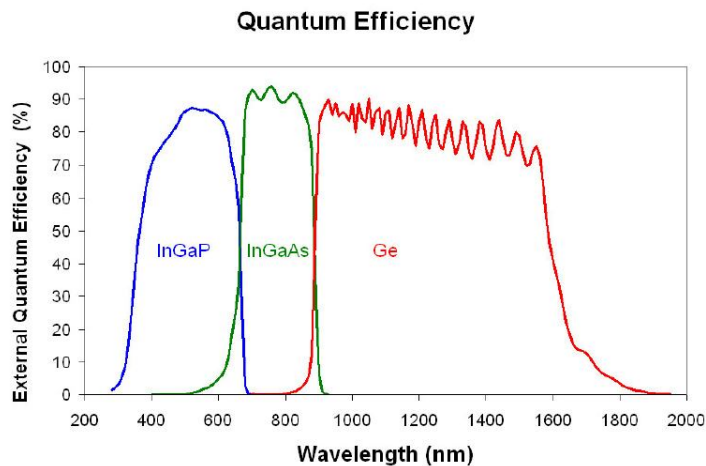


Le celle utilizzate in questo nel nostro prototipo di sistema fotovoltaico a concentrazione, sono prodotte dalla Emcore. Si tratta di celle a tripla giunzione composte da elementi dei gruppi III-V. E' una cella monolitica con la prima giunzione in fosforo di indio - gallio, la seconda giunzione su arseniuro di indio-gallio, la terza giunzione su germanio. Il tutto su un substrato di germanio. L' area utile della cella è 5,5mm x 5,5mm.

Si tratta di celle concepite in modo specifico per uso terrestre, quindi ottimizzate per uno spettro AM1.5d. Queste celle possono operare a concentrazioni attorno ai 1500X.

Come si vede esaminando le specifiche tecniche fornite dal produttore (figura 0-1), le celle hanno una elevata efficienza quantica su un' ampia regione dello spettro solare. Vediamo che tra i 300nm e i 1600nm l'efficienza quantica dichiarata è tra 80-95%. Coprono quindi la porzione di spettro solare dove l'energia è maggiore.

L'efficienza globale dichiarata dal costruttore, raggiunge picchi del 38% in condizioni standard, cioè a 25°C. Il massimo si ottiene attorno ai 500X. A concentrazioni più alte si vede un calo di efficienza come mostrato in Figura 0-2.



Per quanto riguarda I parametri caratteristici, vengono fornite le variazioni a 800X. Vediamo che la tensione cala leggermente con la temperatura, come ci si aspetta anche dal modello fisico delle giunzioni. La densità di corrente aumenta, dato che aumenta la corrente inversa del diodo con la temperatura. L'efficienza cala con la temperatura.

0-1 efficienza quantica

$$\Delta V_{oc} = -5.9 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta J_{sc} = 7.2 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta \text{efficiency} = -0.06\% \text{ (absolute)}/^{\circ}\text{C}$$

Le condizioni standard di test sono per un sistema operante a 25°C, questo fatto evidenzia già alcuni limiti nel raggiungere le prestazioni dichiarate. Lavorare a questa temperatura, infatti, comporta sicuramente l'uso di un qualche sistema di raffreddamento attivo, almeno per concentrazioni abbastanza elevate, cioè di centinaia di soli. Da simulazioni effettuate ci aspettiamo un ΔT anche dell'ordine dei 100°C, tra basetta e cella in condizioni passive, quindi una perdita di efficienza minima del 6% rispetto a quanto riportato sul datasheet. Un traguardo accettabile per il nostro sistema a concentrazione dovrebbe essere attorno al 30%, almeno in questa prima fase.

Efficiency vs. Concentration

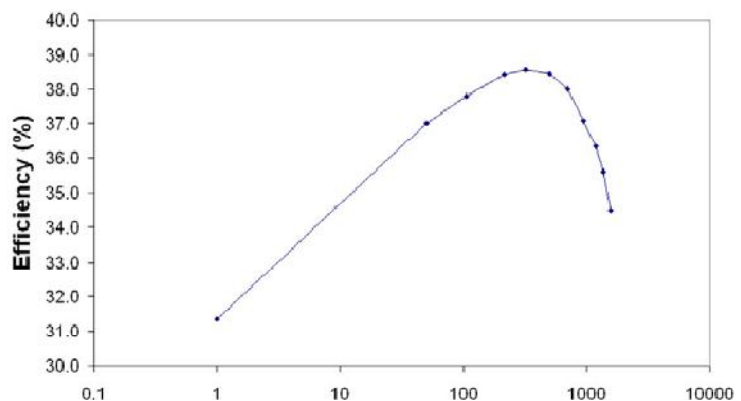


Figura 0-2 efficienza celle in funzione della concentrazione

2.2 La scheda del prototipo studiato

Nel prototipo studiato in una prima fase del progetto, si è scelto di realizzare delle schede con 6 celle fotovoltaiche. Tali schede sono un sandwich di vari materiali.

2.2.1 Basetta

Nel prototipo oggetto di test le celle sono state fissate su una basetta opportunamente disegnata. La basetta è stata concepita per favorire la dissipazione del calore. Diversamente da una scheda per

2.3 Fissaggio della cella

La cella della Emcore è costruita in modo tale da avere un contatto nella parte posteriore e il secondo contatto costituito da alette laterali. Per il fissaggio della cella alla base abbiamo valutato diverse soluzioni. Si è provato con alcune colle conduttive che hanno però evidenziato problemi di resistività eccessiva e di resistenza meccanica scarsa a temperature maggiori di 70°C. La resistività è probabilmente un problema intrinseco delle colle conduttive a nostra disposizione, almeno a temperatura ambiente. Tali sostanze, infatti, sono generalmente un composto di metallo conduttore (argento) e colla, presumibilmente con conducibilità scarsa o nulla. Il contatto metallico è sicuramente più vantaggioso. Il motivo per cui è stata valutata questa opzione è che le celle vanno posizionate con molta precisione e le vibrazioni dovute ad una tradizionale saldatura in forno avrebbero potuto compromettere il posizionamento. L'altra opzione è stata quella di saldare a stagno la base della cella, con particolari accorgimenti per portare in fusione lo stagno. Generalmente, infatti, le basette di fissaggio dei componenti sono di vetronite. La vetronite è un materiale con bassa conducibilità termica. La procedura standard è quella di riscaldare la base in vetronite ad una temperatura moderatamente alta e di utilizzare un getto d'aria localizzato a 300°C per riscaldare il componente. Questa procedura è inefficace nel caso specifico perché la base ha una componente in alluminio predominante. L'alluminio è un buon conduttore di calore ed ha una bassa capacità termica. La saldatura ha richiesto, quindi, la creazione di un profilo termico ad hoc, per portare lo stagno in fusione e per evitare che i diversi coefficienti di dilatazione degli strati portassero ad una curvatura o ad un danneggiamento della scheda.

Il fissaggio laterale si è dimostrato più semplice. Abbiamo utilizzato la tecnica del bonding.

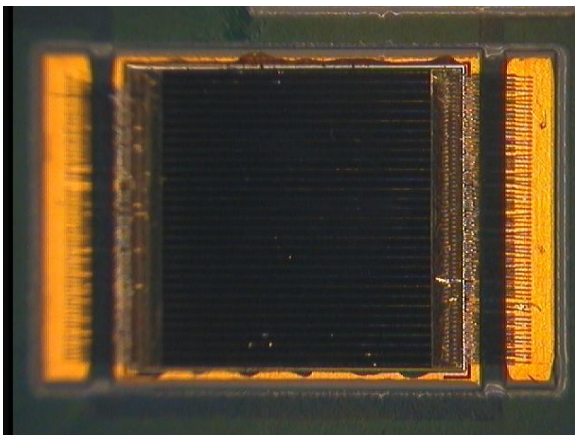


Figura 2.3-1 cella con bonding

Con una macchina apposita vengono fissati dei contatti fra le alette della cella e la piazzola ramata sulla scheda. I contatti sono in alluminio e hanno una sezione di 25 μ m. La lunghezza di ciascun contatto è tra 1,1mm e 2mm. Dato che questo tipo di filo viene tipicamente utilizzato in applicazioni di microelettronica, quindi per correnti generalmente basse, si è reso necessario utilizzare diversi contatti per avere la garanzia che le correnti prodotte dalle celle non fossero dannose. Tutte le celle sono state fissate con questa metodologia. I diodi di bypass, invece, sono stati semplicemente saldati con le

tradizionali tecniche per il fissaggio dei componenti su una bassetta.

2.3.1 Connettori laterali (bonding)

Il bonding è una tecnica utilizzata normalmente per l'interconnessione di componenti elettronici. A seconda degli utilizzi può essere praticato con vari diametri di filo. (andiamo dalle decine di μ m

fino al millimetro nel caso di “ribbon bonding”, per componenti di potenza) La macchina che abbiamo a disposizione è il modello KS8090 della K&S. Questa apparecchiatura consente di utilizzare filo da $25\mu\text{m}$. Viste le dimensioni ridotte del filo sono state fatte alcune prove sperimentali per valutare l’idoneità dello stesso per l’applicazione (paragrafo 2.3.1.1). L’operazione di bondaggio viene effettuata in “camera pulita”. Si tratta di un locale dove l’aria è filtrata per evitare la presenza di polveri, la temperatura e l’umidità sono controllate.

Dato che le correnti in gioco sono dell’ordine della decina di ampere, si è cercato di massimizzare il numero di connessioni tra cella e basetta. La spaziatura tra le varie connessioni è di $90\mu\text{m}$, la larghezza utile è di 5mm. Questa scelta della spaziatura ci consente di creare 3 fasci di connessioni su ogni lato. Sono stati connessi solamente 2 fasci per ogni lato, lasciando la possibilità di creare un terzo fascio in caso di danneggiamento del bondaggio.

Il fatto che la cella non fosse un componente standard ha richiesto una piccola taratura dei parametri di fissaggio. La macchina funziona ad ultrasuoni, i parametri che si possono regolare per effettuare la saldatura del filo sono: la corrente, il tempo, la forza che la macchina deve imprimere.

La doratura dei contatti della cella è risultata più morbida e ha richiesto i seguenti parametri: corrente 80mA, tempo 50ms, forza 0,028N.

La pad sulla basetta è risultata più rigida e i parametri utilizzati sono corrente 70mA, tempo 60ms, forza 31 grammi.

La lunghezza dei connettori è di $1100\mu\text{m}$ e $1577\mu\text{m}$.

Una volta eseguite le connessioni, per verificare la bontà delle stesse, si pratica il Pull Test (resistenza a trazione). Da un esame al microscopio si vede che la parte più stressata del bondaggio è quella di partenza, perché il filo viene fissato e poi tirato. Dal Pull Test si ricavano due informazioni: il carico necessario per rompere una singola connessione che è di 9 grammi e il punto di rottura che è, correttamente, quello più stressato. La scelta dei parametri di saldatura, quindi, è risultata corretta.

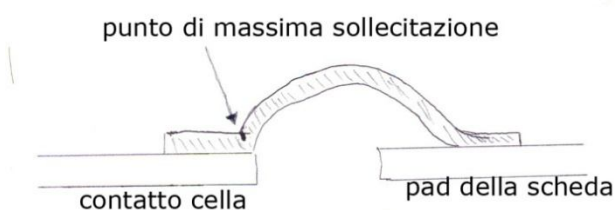


Figura 2.3-2 una singola connessione vista in sezione

In Figura 2.3-2 è stata messa una sezione di una singola connessione per illustrare meglio la situazione. Il filo viene dapprima premuto sul contatto della cella. Viene poi piegato e tirato. Successivamente viene premuto sul pad che è il punto di arrivo. Questo spiega perché il punto di rottura normale è quello di massima sollecitazione, indicato dalla freccia.

2.3.1.1 Verifica della massima corrente applicabile a un singolo cavetto.

Un ultimo test è stato effettuato per valutare la corrente massima che può sopportare una connessione di questo tipo. Abbiamo preso due connettori metallici a distanza di 2mm (lunghezza massima del bonding sulla cella). Con un alimentatore da banco abbiamo regolato la corrente che fluiva sul conduttore, arrivando a misurare 800mA, senza apparenti danni allo stesso. Trascorso un tempo di circa 30 minuti, non abbiamo misurato variazioni apprezzabili sulle caratteristiche del bonding. Verificando quale fosse la corrente massima accettabile, abbiamo visto che ad 1A, il cavo iniziava a surriscaldarsi e probabilmente si è ossidato. Benché al microscopio risultasse meccanicamente integro, l'ossidazione lo aveva reso pressoché inutilizzabile come conduttore elettrico.

2.4 Test della prima cella

Per verificare se la procedura di saldatura e connessione della cella fosse corretta, prima di saldare l'intera serie, abbiamo effettuato dei test sulla singola cella. L'apparato usato per il test è costituito da una lampada allo Xenon della Oriel. Si tratta di una lampada ad arco ozone free, cioè in cui vengono tagliate le frequenze più energetiche degli ultravioletti, che altrimenti produrrebbero ozono che è dannoso per la salute dell'operatore. Per focalizzare la luce abbiamo utilizzato una lente di Fresnel in acrilico ottico (PMMA).

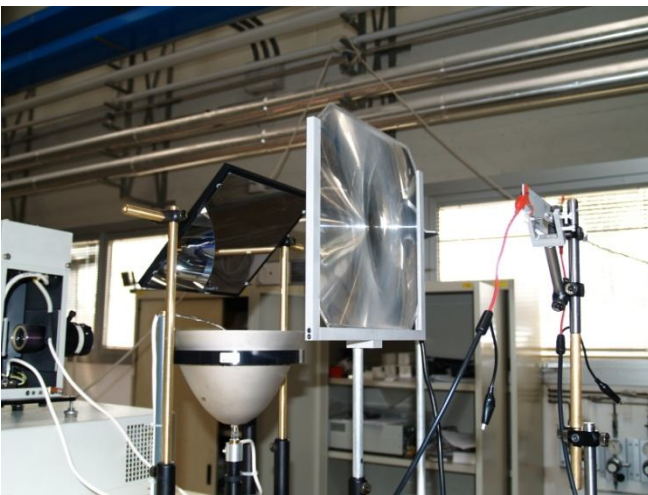


Figura 2.4-1 apparato utilizzato per i test sulla prima cella

Come si vede in Figura 2.4-1 apparato utilizzato per i test sulla prima cella l'arco della lampada allo xenon è posto sul fuoco di uno specchio parabolico, in modo da ottenere un fascio di luce parallela. Uno specchio a 45° provvede ad deviare il fascio sulla lente di Fresnel. La scheda è stata fissata su un apposito supporto e connessa elettricamente alla strumentazione. Gli strumenti di misura utilizzati sono un tester per misurare la tensione di lavoro e un carico variabile della Uniwatt modello EL 100.

Quest'ultimo apparecchio è in grado di dissipare fino a 100Watt, più che sufficiente per questa applicazione. Il carico variabile è dotato di un display digitale che permette di leggere la corrente in ingresso con una risoluzione di 10mA. Si è quindi proceduto a costruire la curva V-I della cella.

Nel Grafico 2-1 vediamo la curva V-I caratteristica della cella. I grafici Grafico 2-2 e Grafico 2-3 mostrano la potenza in funzione di tensione e corrente. Nella prima misura effettuata abbiamo ottenuto una potenza di circa 500mW. Lo scopo in una prima analisi era quello di testare il

comportamento corretto della cella. Vediamo che la cella ha un comportamento corretto, la tensione V_{oc} è compatibile con le specifiche fornite dal costruttore.

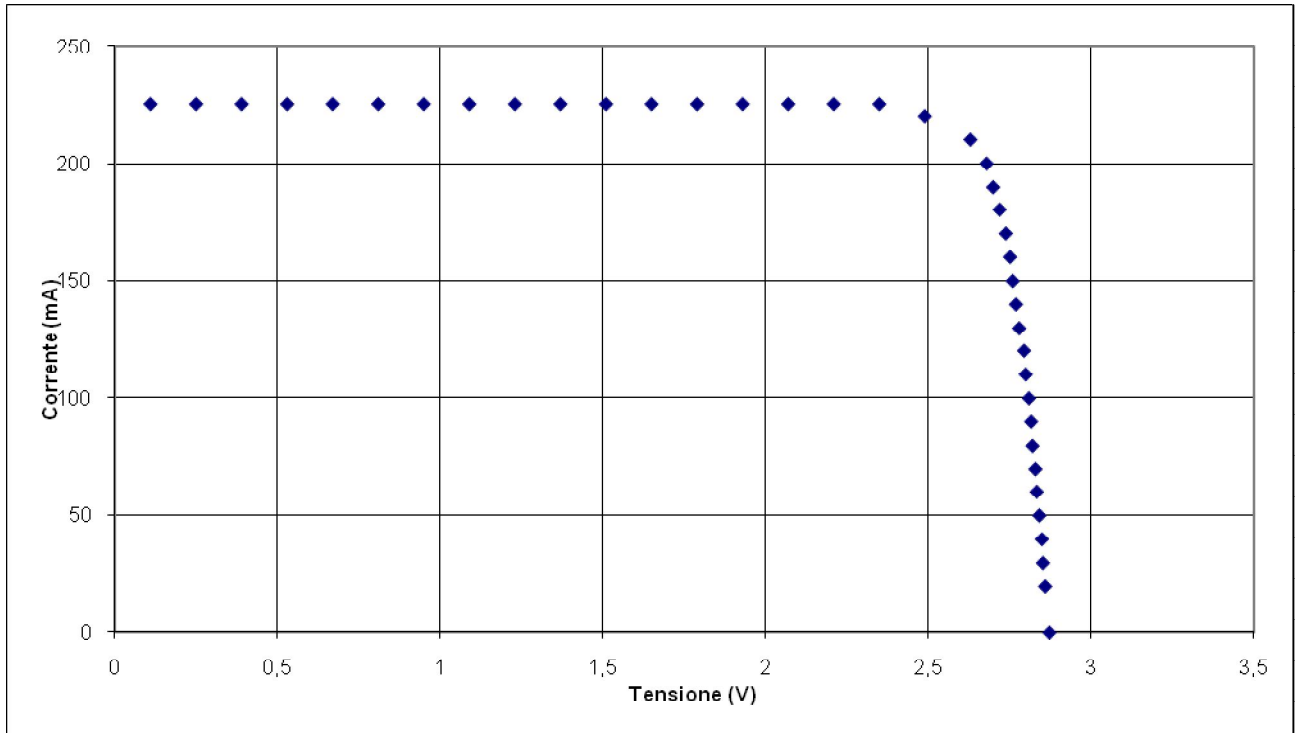


Grafico 2-1

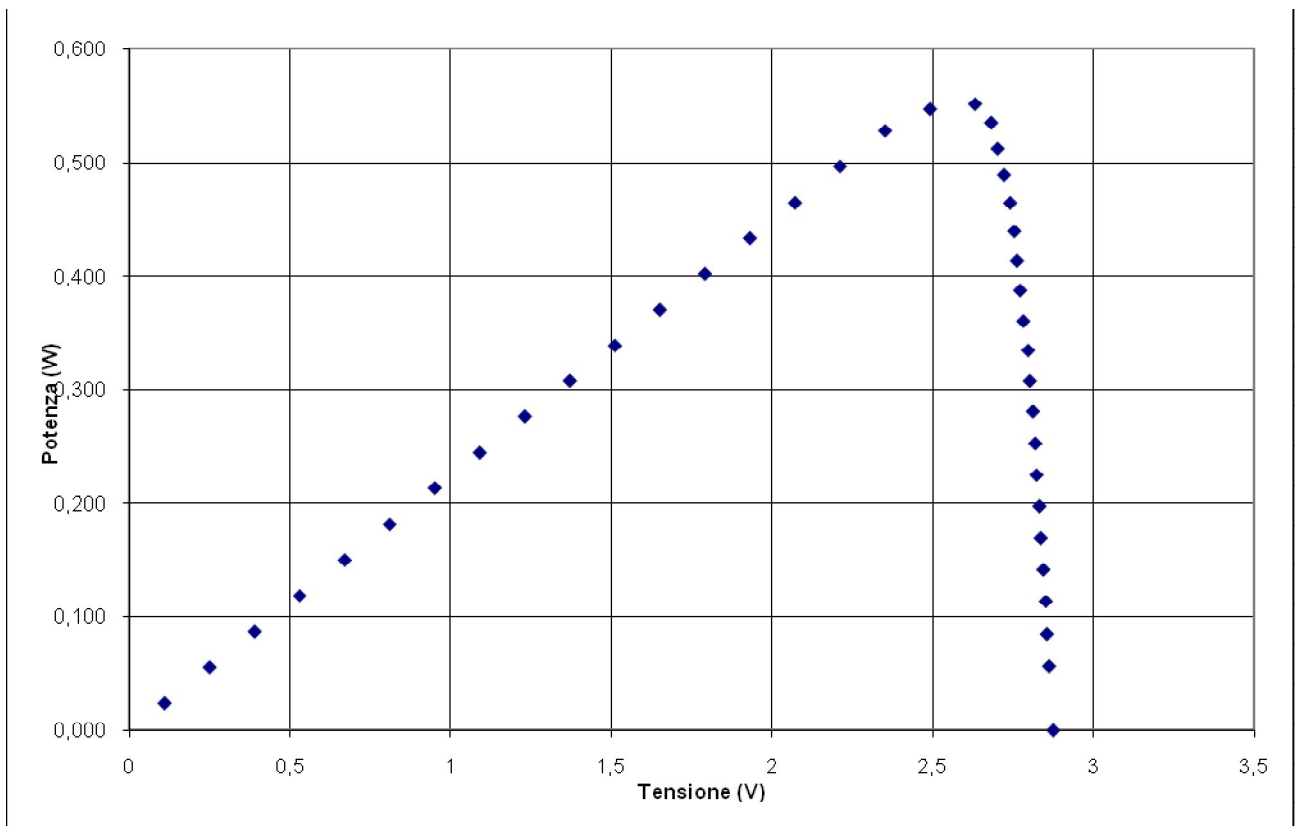


Grafico 2-2

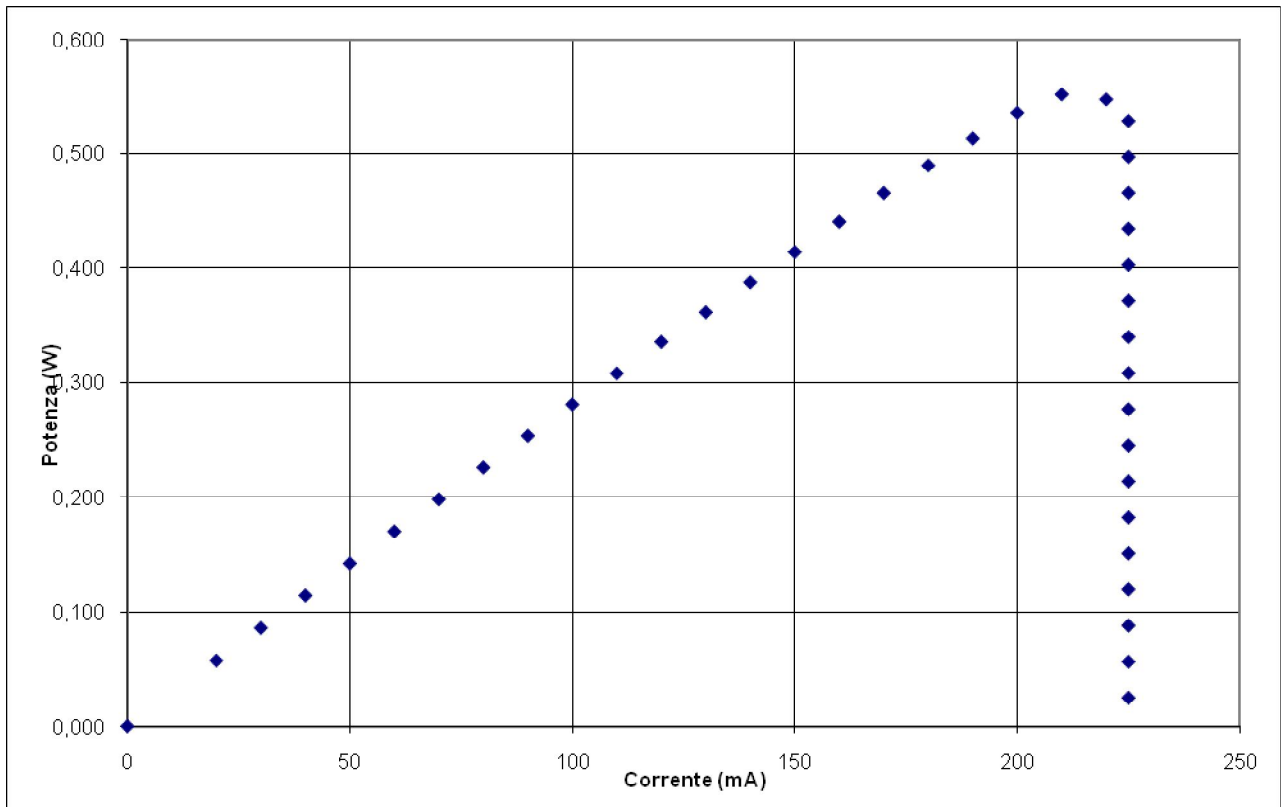


Grafico 2-3

Abbiamo condotto una seconda serie di misure dopo aver ottimizzato l'apparato. La potenza della lampada è stata portata a 150W elettrici, che era il massimo raggiungibile dall'alimentatore in dotazione. La potenza ottica misurata in ingresso alla cella con il bolometro è di 9,21W.

Grafico VI

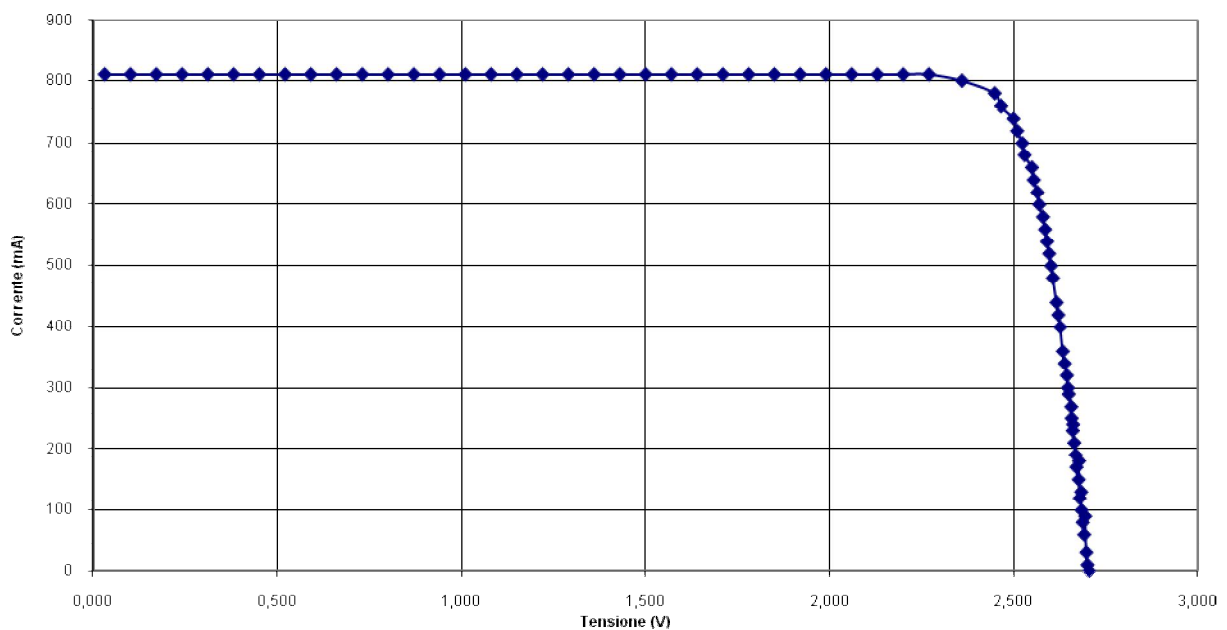


Grafico VP

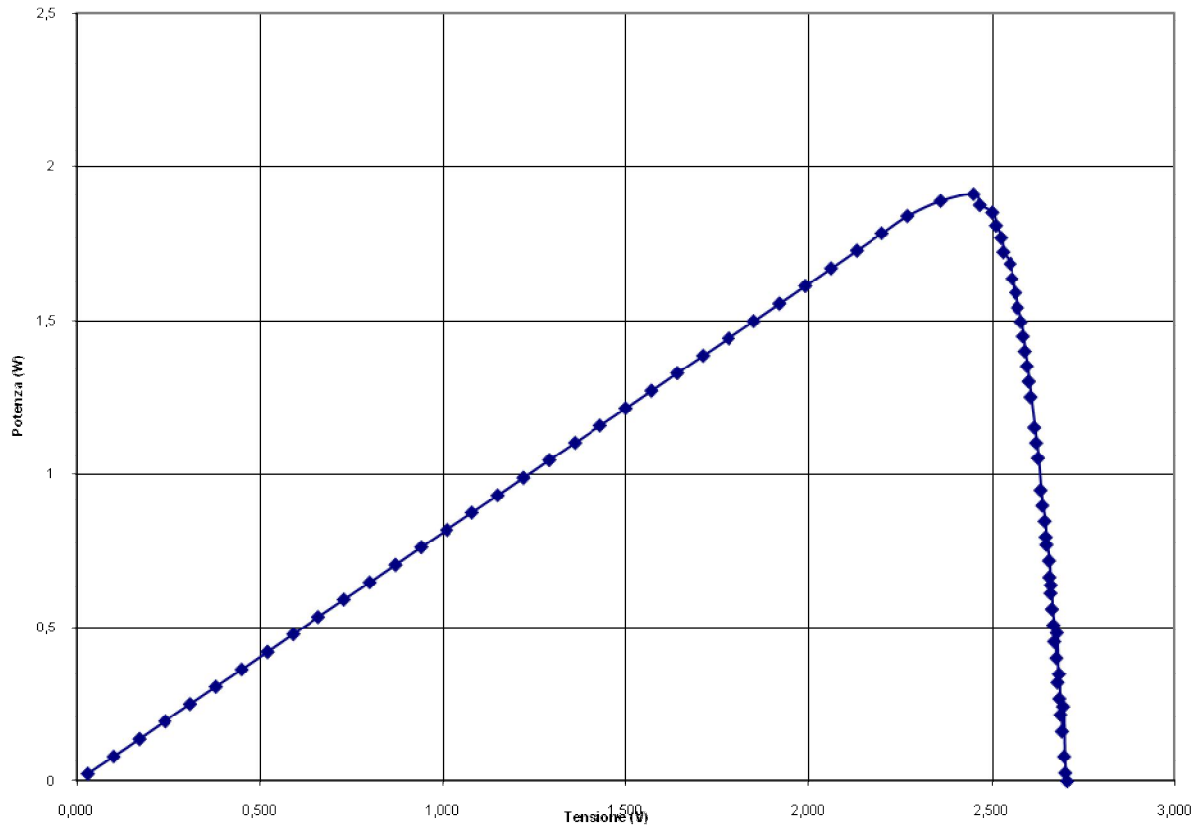
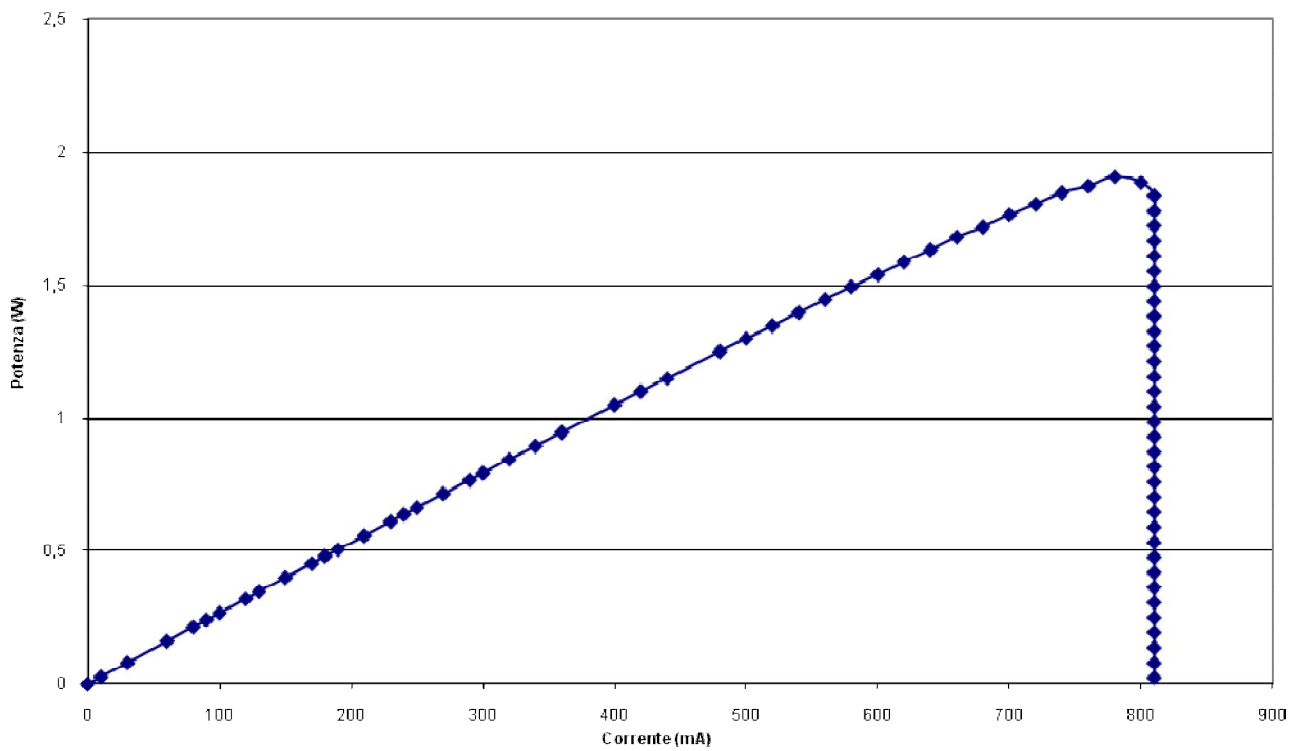


Grafico IP



La potenza massima ottenuta è 1,91W. Se consideriamo solo la potenza misurata in ingresso, vediamo un rendimento del 20,7%, abbastanza insoddisfacente. L'analisi puntuale dell'apparato, però, ha portato ad alcune considerazioni che ci consentono di giustificare il risultato.

Il bolometro misura lo spettro completo della lampada allo Xenon. Come vediamo in Figura 2.4-2 lo spettro di tale lampada si estende ben oltre la regione di sensibilità della nostra cella fotovoltaica. La cella, inoltre, è costruita da strati di spessore opportuno per lo spettro AM1.5d, quindi ha un coefficiente di assorbimento tarato su tale spettro.

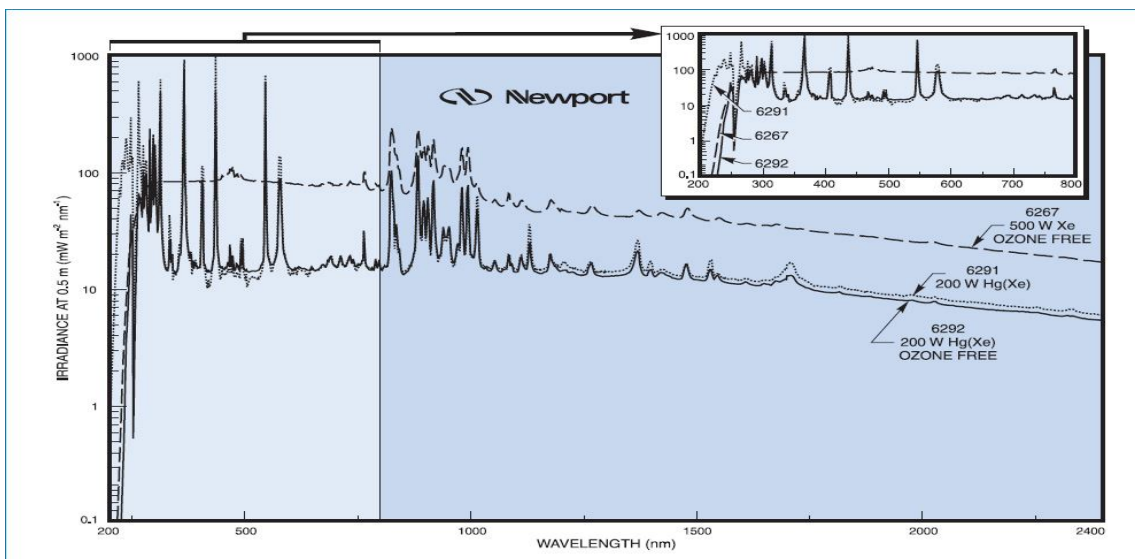


Figura 2.4-2 spettro della lampada allo Xenon usata

Come si vede dalle specifiche tecniche in Figura 2.4-3 fornite dalla Emcore, produttore delle celle in esame, la regione di sensibilità è tra i 300nm e i 1600nm.

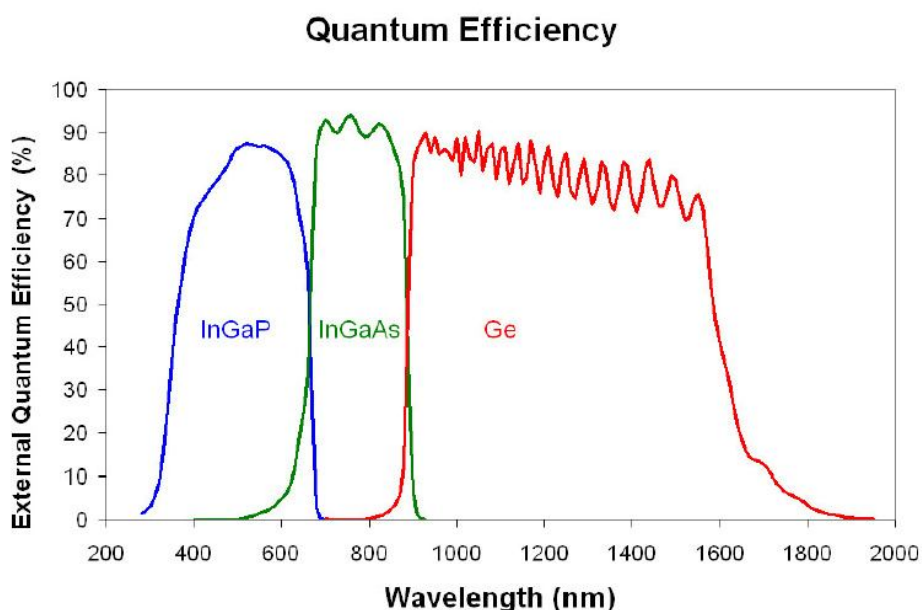


Figura 2.4-3 efficienza quantica della cella, spettro utile 300-1600nm

2.5 Inseguitore

Completati i test di laboratorio sulla scheda, si è passati al montaggio della stessa sulla meccanica di inseguimento. Abbiamo quindi effettuato una serie di misure in condizioni reali, con la necessità di inseguire il sole.

Come già detto in precedenza, un impianto a concentrazione reale deve essere dotato di:

- 1) Celle.
- 2) Ottica.
- 3) Meccanica di inseguimento.
- 4) Elettronica di controllo.



Figura 2.6-1 meccanica dell' inseguitore

2.6 Meccanica

La meccanica di inseguimento utilizzata era già esistente. Si tratta di un movimentatore usato per un telescopio. L' apparato utilizzato è visibile in Figura 2.6-1. Il sistema è dotato di due motori passo passo che danno al sistema due gradi di libertà e consentono quindi di inseguire il moto apparente del sole. I

motori in questione consentono di controllare la rotazione in modo preciso perché grazie ad un elettronica opportuna è possibile impostare la frequenza di rotazione degli stessi.

2.7 Ottica

Per quanto riguarda l'ottica, è stata scelta una soluzione di facile realizzazione. Il sistema è costituito da una lamiera di alluminio 160x120 piegata in modo da formare uno specchio parabolico, che focalizza su una linea. Questa lamiera costituisce l'ottica principale. (Figura 2.7-1) La luce viene raccolta da un' ottica secondaria costituita da blocchetti di alluminio opportunamente lucidati e sagomati. Questi specchietti sono un insieme di parabole più piccole con asse parallelo a quello dell' ottica principale, ma direzione ortogonale. In questo modo si ottiene una seconda focalizzazione che produce delle immagini quadrate della dimensione della cella. Per compensare la non perfetta focalizzazione che è intrinseca nel sistema, un terzo sistema di blocchetti serve a convogliare sulle celle una porzione di luce che altrimenti andrebbe persa.



Figura 2.7-1 specchio montato sulla meccanica

2.8 Raffreddamento

Le celle che operano sotto luce concentrata ricevono una elevata densità di energia. Dato che l'efficienza di conversione in condizioni ottimali si aggira intorno al 30%, l'energia restante che è sotto forma di calore dovrà essere dissipata. Per verificare quanto il riscaldamento incida sul rendimento effettivo del sistema, abbiamo dotato le nostre schede di un dissipatore attivo. Tale dissipatore è costituito da una scatola di alluminio (Figura 2.8-1) di cui la scheda costituisce il coperchio.

All'interno della scatola può scorrere acqua. L'acqua utilizzata attraversa a circuito aperto, non viene quindi riciclata. Possiamo quindi considerare che le schede all'equilibrio siano a contatto con una sorgente termostata a 25°C. Come visto nel paragrafo 1.5.2, la temperatura influisce sulla V_{oc} e quindi sulla potenza erogata dalle celle.



Figura 2.8-1 sistema di raffreddamento attivo



Figura 2.8-2 celle fotovoltaiche

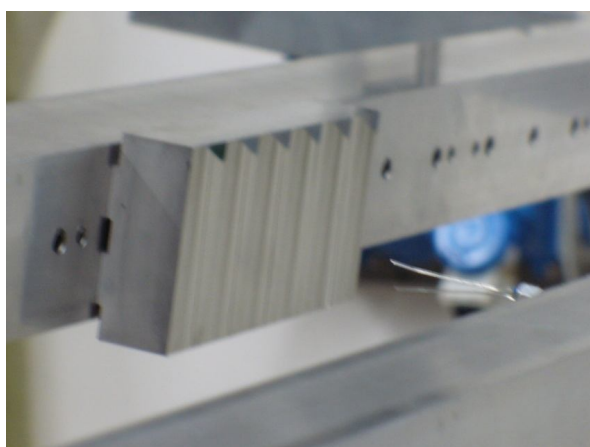


Figura 2.8-3 Ottica secondaria, blocchetto di alluminio lucidato

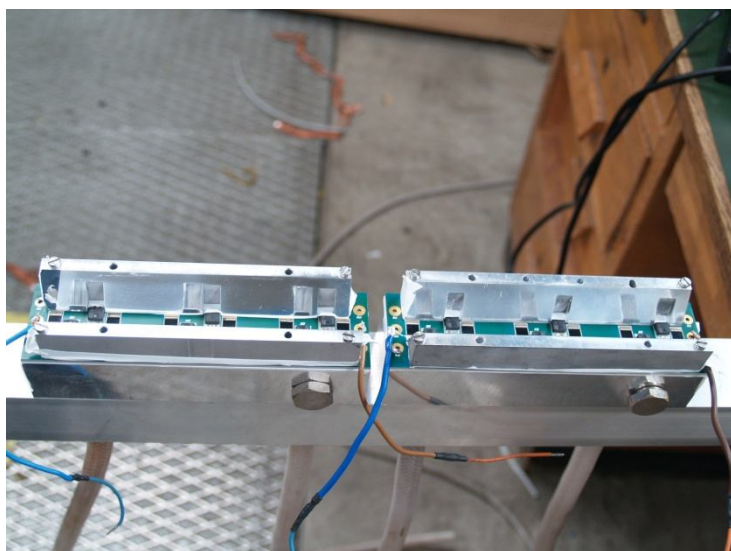
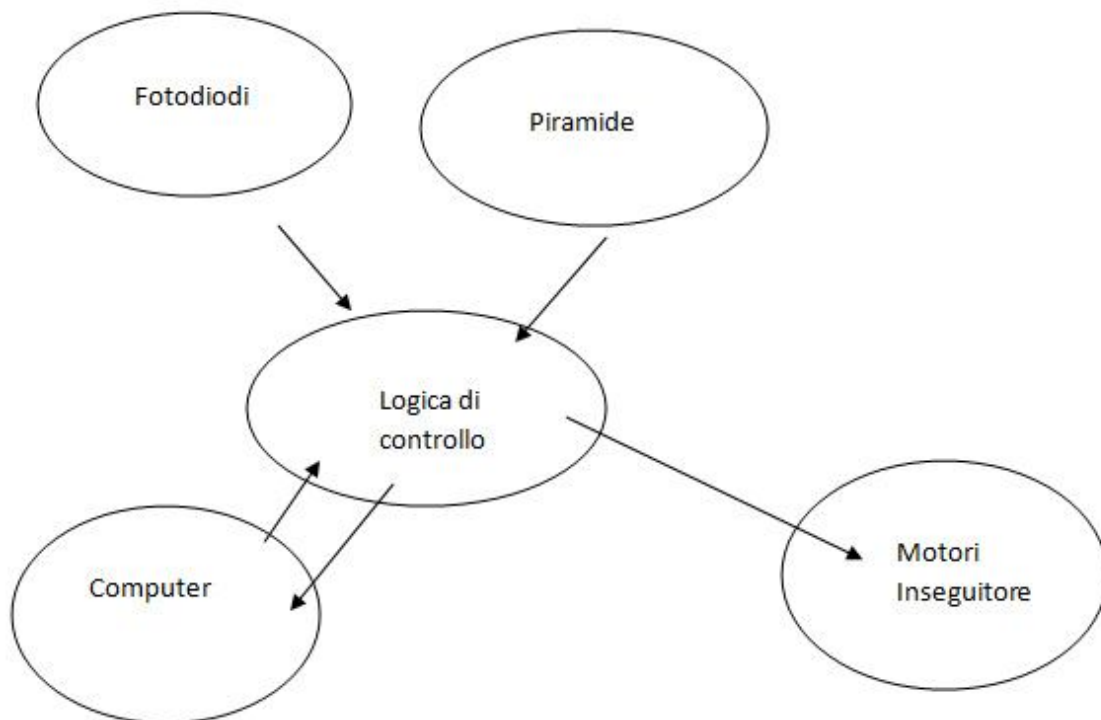


Figura 2.8-4 ottiche sulle celle, servono a raccogliere la luce

2.9 Elettronica di controllo

La meccanica di un sistema a concentrazione deve inseguire il movimento apparente del sole in cielo. L'asse ottico deve essere sempre in direzione del sole. In caso contrario la focalizzazione non avviene in modo corretto. Per fare questo esistono varie strategie. Abbiamo scelto di realizzare un sistema di controllo con feedback. Tale sistema si avvale di una serie di sensori che quantificano il disallineamento dell'asse ottico con il sole. L'informazione acquisita è quindi proporzionale e consente al sistema di agire più o meno rapidamente. Una volta trovato un posizionamento relativamente buono, ad esempio, possiamo apportare piccole correzioni per mantenerlo. In caso di forte disallineamento le correzioni dovranno essere più consistenti. Di seguito viene riportato un diagramma che schematizza il funzionamento del controllo. Abbiamo 2 tipi di sensori (fotodiodi e fotoresistenze), essi comunicano con una logica di controllo. La logica di controllo elabora i segnali



e restituisce un'opportuna informazione da inviare ai motori. Abbiamo anche introdotto un computer che comunica in modo bidirezionale con la logica, cioè agisce sia da sistema di monitoraggio per quanto riguarda lo stato del sistema, sia da elemento di controllo, dato che può inviare segnali alla logica. Nelle pagine che seguono verrà esaminato in dettaglio ciascun elemento di questo diagramma.

2.9.1 Fotodiodi

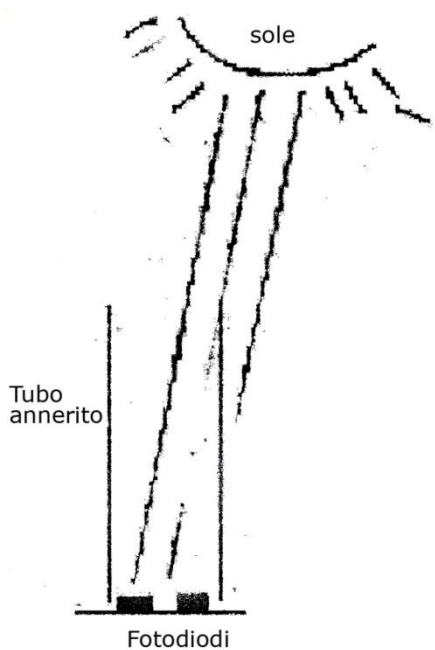


Figura 2.9-1 principio di funzionamento fotodiodi

Come si è visto nel paragrafo 2.6 la meccanica usata nel nostro prototipo è dotata di motori passo-passo che consentono il movimento su due assi. Il funzionamento di questi motori è il seguente: la tensione di rete fornisce la potenza, un segnale TTL indica la frequenza, cioè il numero di step che il motore deve fare. Un secondo segnale TTL indica il verso di rotazione del motore. I motori in uso possono compiere 1.8° per ogni step. Sono però collegati alla parte meccanica attraverso un ingranaggio riduttore, quindi la precisione nel posizionamento globale è molto maggiore. Il primo passo è stato quello di definire un sensore che fornisca un segnale opportuno per effetto del movimento apparente del sole in cielo. Questo sensore è costituito da 4 fotodiodi. Il fotodiodo utilizzato è sensibile allo spettro visibile e all'infrarosso. Secondo le specifiche fornite dal costruttore, il fotodiodo è un componente in grado di erogare una corrente massima di 10mA.

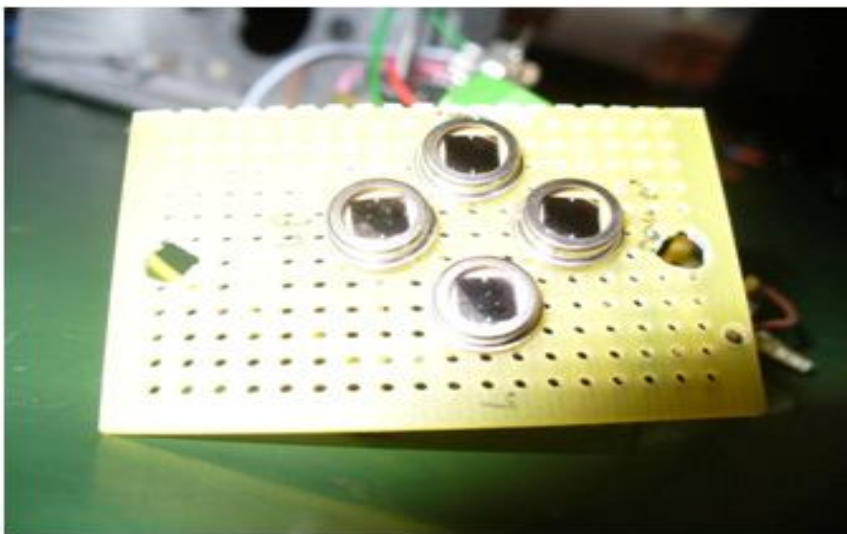
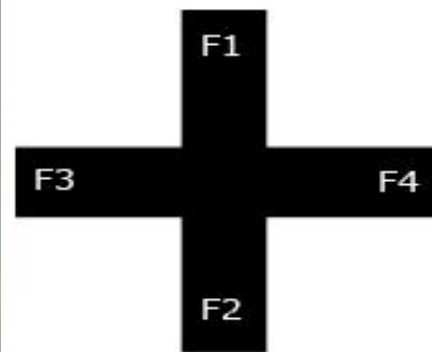


Figura 2.9-2 basetta con i fotodiodi; disposizione connessione dei fotodiodi



I fotodiodi sono stati inseriti in un tubo, come in Figura 2.9-1. Se il tubo non è allineato con il sole, i raggi illuminano in modo diverso i fotodiodi. Questo sbilanciamento viene trasformato in una tensione misurabile. Il tubo è stato verniciato con uno smalto nero opaco e reso non riflettente con ulteriori accorgimenti. Eventuali riflessioni interne potrebbero creare falsi segnali e rendere inefficace il sistema di rivelazione.

Come si vede in Figura 2.9-2 i fotodiodi sono disposti a croce. Questa disposizione è stata scelta in modo tale che i fotodiodi F1 – F2 controllino un asse, mentre F3 – F4 controllano il movimento sul altro asse. Possiamo pensare le coppie come due sensori indipendenti che non interagiscono fra loro. Secondo questa filosofia è stato anche realizzato il circuito elettronico a valle di questo

senso per produrre i segnali di controllo che vanno ai motori. L'analisi dell'elettronica che verrà fatta di seguito, quindi, riguarderà un solo asse.

2.9.1.1 Analisi del circuito di controllo fotodiodi

Conversione corrente - tensione

Possiamo pensare al fotodiodo come ad un generatore di corrente. Il primo stadio del circuito si occupa di convertire l'informazione in corrente in una informazione in tensione. E' più facile, infatti, effettuare operazioni con un segnale in tensione.

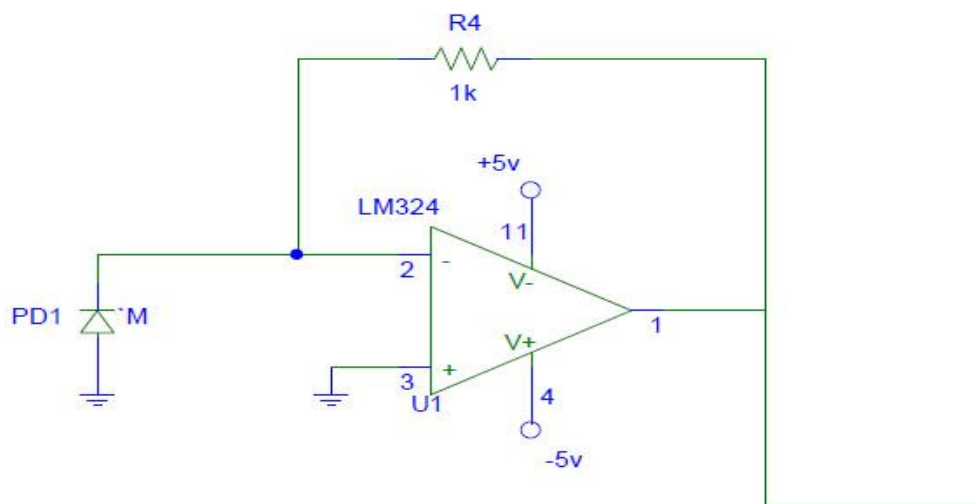


Figura 2.9-3 primo stadio, conversione corrente - tensione

L'analisi di questo primo stadio è molto semplice, si tratta di usare le proprietà dell'amplificatore operazionale e la legge di Ohm.

Un amplificatore operazionale, dal punto di vista elettrico, è un oggetto con impedenza di ingresso infinita e con i due ingressi indicati con + e - alla stessa tensione. Se colleghiamo a massa il piedino "+", costringiamo anche il piedino "-" a portarsi alla stessa tensione. La corrente del fotodiodo, non potendo entrare nell'operazionale, fluirà sulla resistenza di feedback (controreazione) R4. Il sistema raggiungerà quindi un equilibrio e il punto 1 si porterà ad una tensione $V = -R \cdot I$ dove I è la corrente del fotodiodo. Il segno negativo è dovuto semplicemente al verso della corrente.

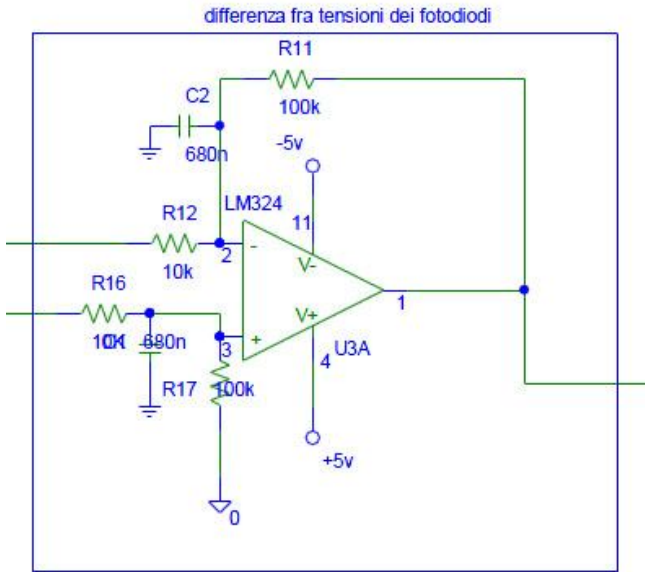


Figura 2.9-4 differenza di tensione fra i diodi

Segnale di differenza (misura del disallineamento)

Lo stadio in Figura 2.9-4 si occupa di fare la differenza fra i due segnali in tensione. I condensatori sono stati introdotti perché il segnale dei fotodiodi è molto rumoroso. La differenza porta con sé due informazioni che ci servono per la gestione del sistema. Il valore assoluto quantifica il disallineamento. Il segno determina la direzione da seguire. La tensione in uscita da questo stadio si determina facilmente e vale

$$V_{out} = \frac{R_{11}}{R_{12}} * (V_2 - V_1)$$

La formula è valida perché si è scelto di porre $R_{16}=R_{12}$ e $R_{17}=R_{11}$. Con i valori scelti si introduce anche un fattore di amplificazione che ci consente di rilevare piccole differenze e di far saturare rapidamente l'operazionale in caso di forte disallineamento.

Il segnale di differenza che otteniamo può assumere valori positivi e negativi. Per il controllo del nostro apparato siamo interessati ad entrambe le informazioni. Il segnale segue quindi due strade.

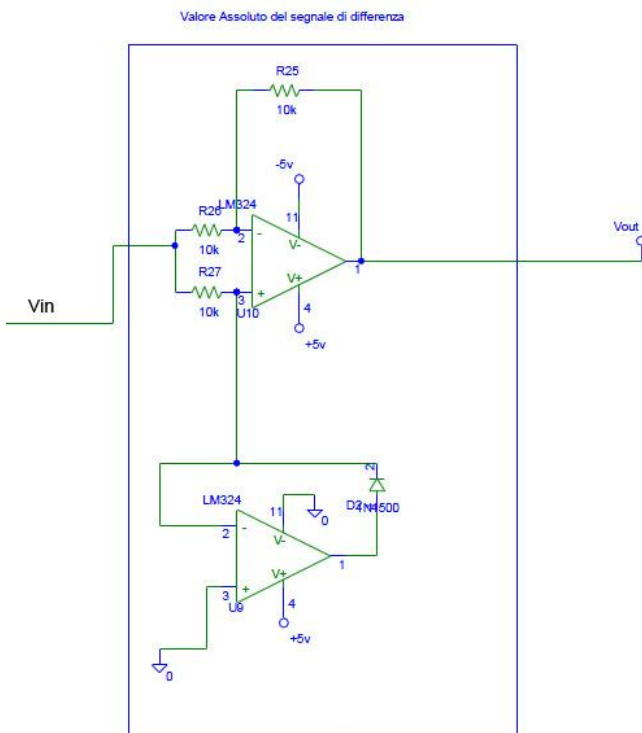


Figura 2.9-5

La prima è costituita dal circuito in Figura 2.9-5 . Si tratta di un circuito che restituisce il valore assoluto di un segnale in ingresso. Il funzionamento è il seguente:

Segnale negativo

In presenza di un segnale V_{in} negativo il diodo posto come feedback all'operazionale in basso, conduce. L'operazionale più in alto in figura vede quindi l'ingresso non invertente (+) a massa. L'amplificatore in alto quindi si comporta in questo caso come un amplificatore con guadagno -1. Il guadagno è determinato dal rapporto tra R_{25} e R_{26} .

Segnale positivo

Se il segnale V_{in} è positivo, il diodo non conduce. Sul ramo collegato all'ingresso non invertente di A1 quindi non circola corrente. Il nodo in corrispondenza di tale ingresso si trova quindi ad una tensione $V=V_{in}$. Il piedino invertente (-) si porta sempre alla stessa tensione di (+) quindi anche su quel ramo non circola corrente, essendo la differenza di potenziale ai capi della resistenza R_{26} nulla. Non vi è quindi neanche corrente sul feedback di A1 e quindi il tutto funziona come un inseguitore di tensione.

L'effetto che si ottiene globalmente è di avere un amplificatore a guadagno unitario che restituisce il valore assoluto del segnale in ingresso.

Successivamente abbiamo uno stadio VCO che fornisce un segnale TTL con frequenza proporzionale alla tensione. Abbiamo così ottenuto i due segnali che ci servono per pilotare un motore passo-passo.

Questo sistema a fotodiodi ha un limite: lavora solo su angoli piccoli. Se il sistema è fortemente disallineato non serve a nulla, perché i fotodiodi troveranno un punto di equilibrio che non è corretto. Immaginiamo che il tubo punti verso una qualunque direzione nel cielo, è naturale che l'intensità luminosa rivelata sarà uniforme e non vi sarà alcuno sbilanciamento.

Il circuito completo di controllo di un asse è riportato di seguito in Figura 2.9-6

In un primo tempo l'apparato è stato dotato di un controllo manuale che veniva escluso automaticamente quando l'intensità luminosa sui fotodiodi era sufficiente.

Il passo successivo è stato dotare l'apparato di un ulteriore controllo automatico che si occupasse del posizionamento "grossolano".

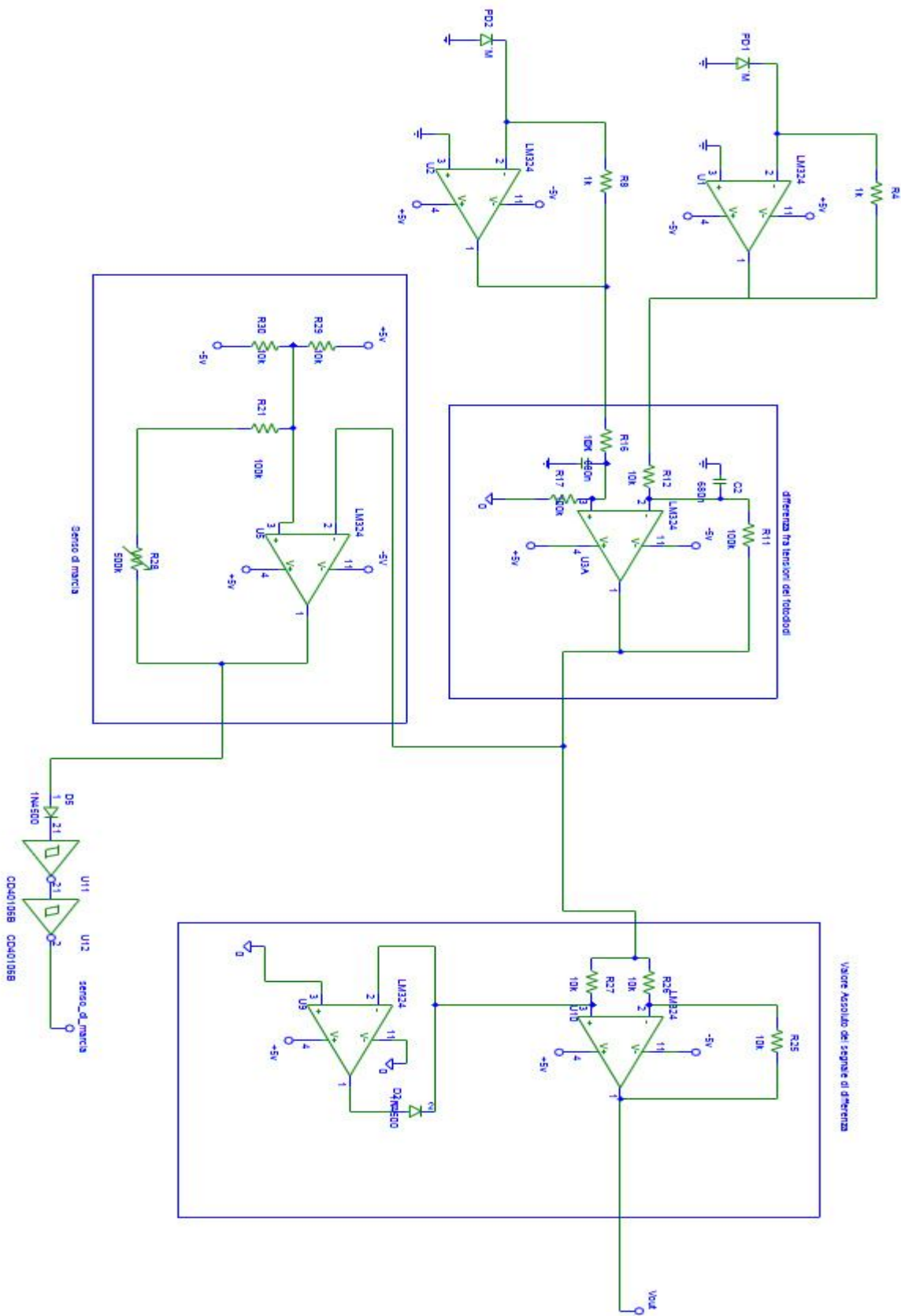


Figura 2.9-6 circuito controllo motore attraverso fotodiodi

2.9.2 La piramide (fotoresistenze)

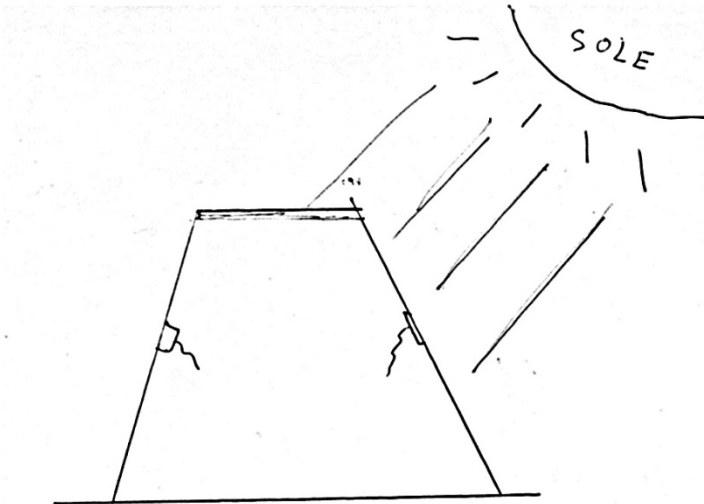


Figura 2.9-7 principio di funzionamento della piramide

Al momento dell'accensione il nostro apparato necessita di un dispositivo che consenta di stabilire dove si trova il sole. La procedura di posizionamento è stata suddivisa in due stadi. Un primo stadio con una definizione più grossolana e un secondo stadio che effettua una regolazione fine. Per il primo stadio si è scelto di realizzare una piramide a facce trasparenti. Ogni faccia è dotata di una fotoresistenza. La fotoresistenza è un componente la cui resistività dipende fortemente dall'illuminazione. Come possiamo vedere in Figura 2.9-7, se consideriamo due facce opposte della piramide, vi sarà una diversa illuminazione delle stesse se l'asse non è parallelo ai raggi luminosi. Con un'elettronica opportuna che verrà esaminata in seguito, è possibile misurare questa differenza e generare dei segnali di comando per orientare la meccanica. L'elettronica è stata concepita in modo tale da creare una sinergia tra i vari sensori. Ogni sistema lavora infatti all'interno di un determinato range di precisione. Una volta raggiunto un allineamento accettabile, il controllo passa automaticamente ai fotodiodi.

Circuito di gestione delle fotoresistenze

Il funzionamento del circuito di controllo è abbastanza semplice. Le fotoresistenze corrispondenti ad una coppia di lati opposti sono collegate in serie. In condizioni di perfetto equilibrio le

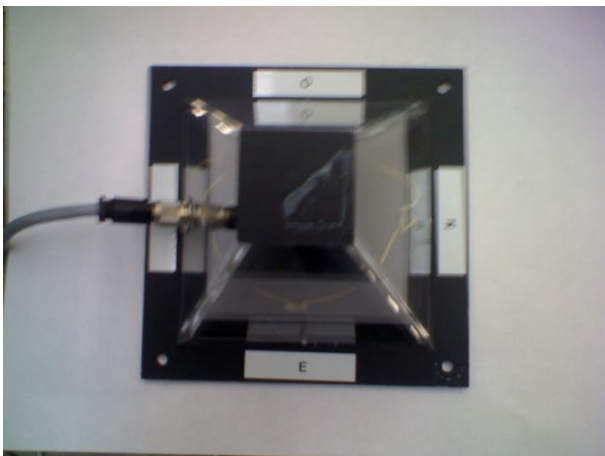


Figura 2.9-8 piramide di controllo

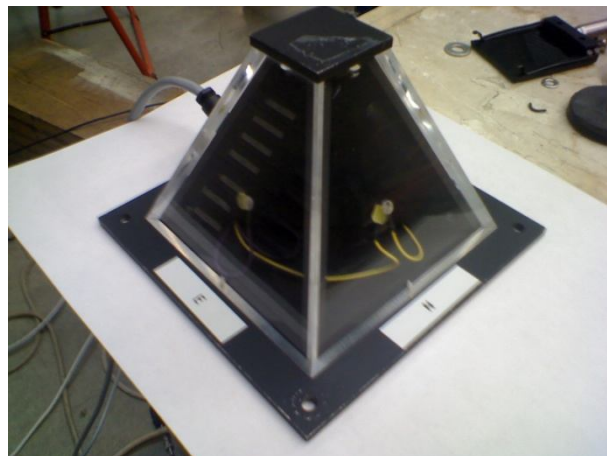


Figura 2.9-9 ogni faccia è provvista di fotoresistenza

fotoresistenze dovrebbero essere uguali, quindi la tensione nel nodo centrale del partitore resistivo

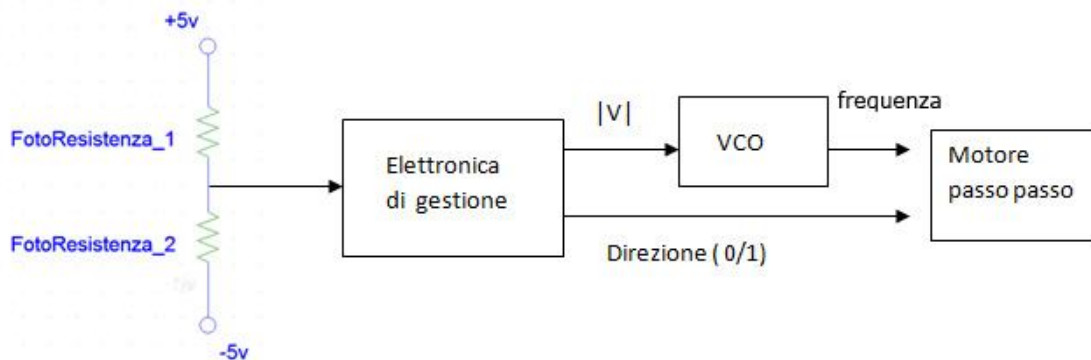


Figura 2.9-10 schema a blocchi del sistema di controllo con fotoresistenze

dovrebbe essere nulla. In caso di illuminazione differente dei due lati, si può misurare una tensione non nulla. Il circuito elettronico, quindi, è un oggetto ad impedenza di ingresso molto alta che misura il modulo della tensione e il segno. Con queste due informazioni siamo in grado di pilotare adeguatamente i motori dell'inseguitore.

In figura 2.9-11 è riportato lo schema blocchi del sistema di controllo relativo ad un asse di rotazione. Il circuito VCO converte la tensione in una frequenza TTL opportuna da fornire al motore passo passo presente sulla meccanica dell'inseguitore.

In Figura 2.9-14 si vede il circuito completo di gestione che misura la diversa illuminazione tra due facce opposte della piramide.

Il funzionamento è abbastanza semplice. Possiamo scomporre il circuito in due blocchi fondamentali. In Figura 2.9-12 vediamo il blocco circuitale che consente di stabilire il segno della tensione in ingresso V_{in} . Se la tensione è positiva, infatti, il diodo D1 entra in conduzione, il transistor si polarizza normalmente e il LED si accende. Se il segnale fosse invece negativo, si presenterebbe una impedenza molto alta, idealmente infinita. Il V_{out} quindi sarebbe esattamente uguale al segnale V_{in} perché il rimanente circuito risulterebbe spento. Un analogo circuito con i diodi e il transistor invertiti si occupa di monitorare la parte positiva del segnale.

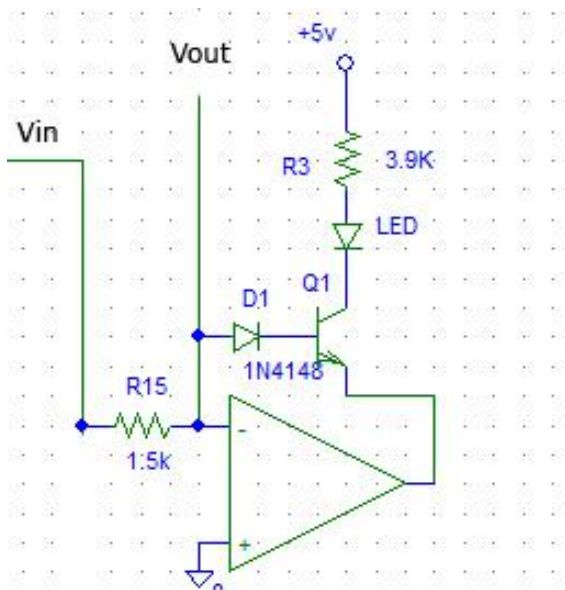
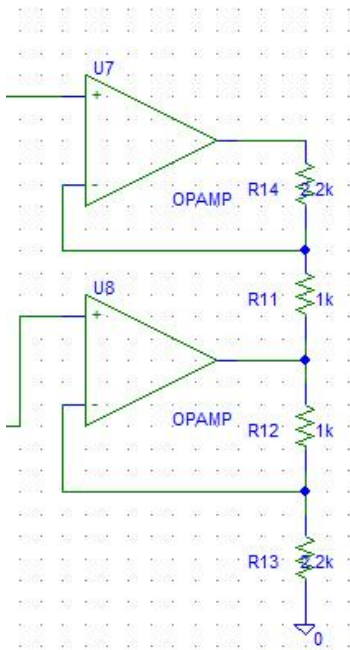


Figura 2.9-12 determinazione segno del segnale

Un secondo blocco funzionale è costituito da quello in figura 2.9-13. Questo circuito, dati due segnali V_1 e V_2 in ingresso, restituisce un segnale pari a

$$V_{out} = (R_a + 1) (V_1 - V_2) \quad \text{Eq 2.9.1}$$



Il circuito viene utilizzato in due modi diversi: nel primo stadio questo circuito serve a misurare la tensione del partitore formato dalle fotoresistenze. Nel secondo stadio il circuito viene utilizzato per restituire il valore assoluto del segnale in ingresso. Grazie al circuito esaminato in precedenza, infatti, riusciamo ad avere la parte positiva e la parte negativa del segnale separatamente. Se poniamo:

V_2 = parte negativa del segnale,

V_1 = parte positiva,

le due tensioni non saranno mai entrambe diverse da 0. In caso di segnale negativo, infatti, $V_1 = 0$, mentre se il segnale è positivo $V_2 = 0$. Utilizzando la semplice equazione 2.9.1 vediamo che si ottiene il valore assoluto.

Figura 2.9-13

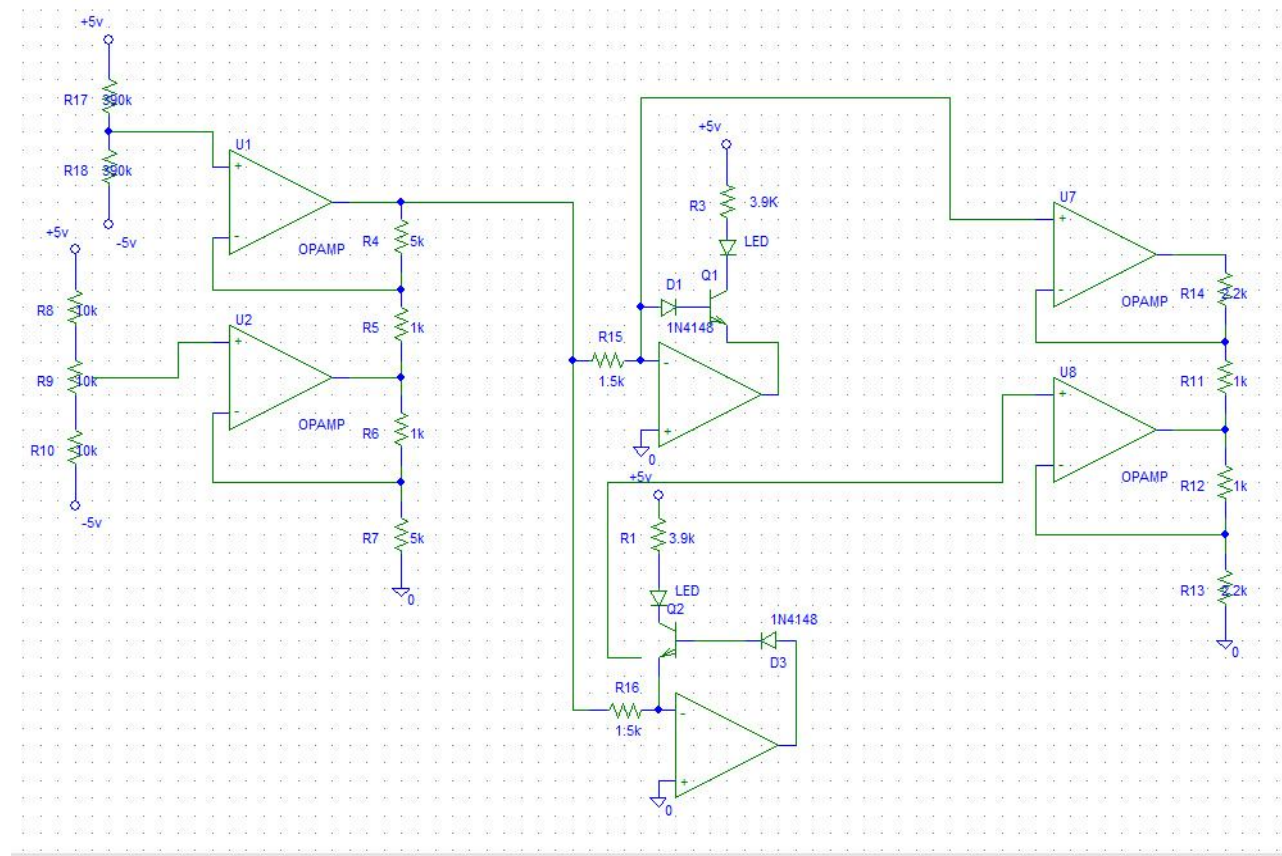


Figura 2.9-14 circuito gestione piramide

Labview

Il software Labview della National Instruments è un particolare programma che consente di interfacciare rapidamente componenti hardware con un PC. Esso può essere utilizzato sia per creare strumenti di misura virtuali, tramite appositi hardware forniti dalla casa produttrice, sia per creare pannelli di controllo per automazione di sistemi. Avendo a disposizione un computer multi core e grazie al fatto che Labview supporta l'elaborazione in parallelo in modo nativo, abbiamo potuto sfruttare questa duplice possibilità. Abbiamo creato uno strumento di controllo per la movimentazione dell'apparato, ma anche uno strumento di misura per l'acquisizione rapida dei dati. La particolarità di questo software è che utilizza un linguaggio grafico (linguaggio G) che rende la stesura del programma molto simile alla tracciatura di un diagramma di flusso. Questo consente di creare applicazioni rapidamente e semplifica l'eventuale ricerca di errori o anomalie. L'applicazione realizzata è una interfaccia grafica molto intuitiva dotata di controlli ed indicatori che consentono di simulare su un monitor display grafici e pulsanti di un pannello reale. Un esempio è riportato in Figura 2.10-1. L'uso che è stato fatto verrà trattato in dettaglio nelle pagine successive.

2.9.3 Logica di controllo

Dato che il sistema è dotato di varie sorgenti di segnale indipendenti (piramide, fotodiodi, Labview, controllo manuale), si è pensato di inserire una logica di controllo che consenta di coordinare le varie fonti e di assegnare la giusta priorità agli eventi. Per fare questo nel modo più semplice possibile si è usato un microcontrollore. Questa scelta tiene conto di diversi parametri:

- Semplicità di utilizzo
- Flessibilità, cioè possibilità di rielaborare la struttura logica in caso di cambiamenti.
- Espandibilità.

Trattandosi di un prototipo, infatti, il circuito di controllo è in continua evoluzione.

La scelta è caduta su un circuito PICAXE. Si tratta di un PIC della ditta Microchip nel quale è stato installato un piccolo sistema operativo che consente la programmazione in un BASIC semplificato. Il numero di comandi è limitato e anche le possibilità rispetto ad un PIC tradizionale. Il vantaggio è che i comandi e la sintassi si possono apprendere in poche ore. Il programmatore inoltre si può costruire in pochi minuti. Esso infatti è costituito da poche resistenze e da un connettore jack. L'intelligenza e la complessità del programmatore è stata trasferita dal costruttore in un piccolo integrato contenuto in un connettore USB che fa da tramite tra il PC e il PICAXE.

Un software fornito dal costruttore consente di scrivere il programma sia in BASIC, sia disegnando i diagrammi di flusso del programma. E' possibile, inoltre, testare il software su un chip virtuale prima di implementarlo.

La serie scelta dispone di otto ingressi digitali e otto uscite digitali. Alcune di questi ingressi possono essere configurati come ADC. Cioè possono leggere e digitalizzare segnali analogici. La risoluzione è di 8 bit. Questa opzione è stata usata per leggere il segnale analogico prodotto dai fotodiodi.

L'integrato può essere dotato di un quarzo esterno per fissare la frequenza di clock, oppure può essere usato in modo autonomo con un clock interno. Il clock interno è meno preciso, ma per l'applicazione in esame è più che sufficiente.

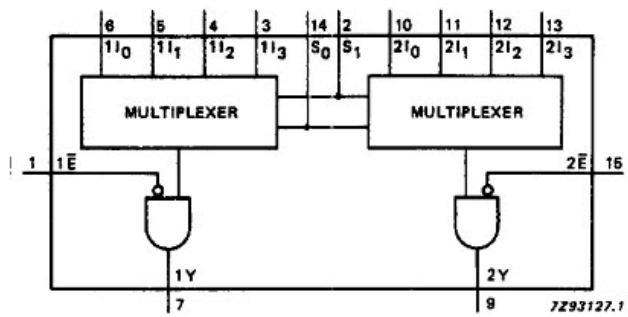


Figura 2.9-15 schema funzionale del multiplexer

Il multiplexer è un circuito che agisce da deviatore fra le varie linee di ingresso, presentando in uscita il valore della linea selezionata. Le varie sorgenti sono identificate da un numero binario. Impostando tale numero sui pin di selezione, si va determinare quale linea di ingresso verrà proposta in uscita. Il particolare circuito utilizzato consente di codificare con un unico numero binario la scelta di due linee. In questo modo possiamo scegliere contemporaneamente direzione e frequenza della stessa sorgente di segnale. I segnali di abilitazione sono stati collegati in modo tale da essere controllabili via software. Questo per poter bloccare l'apparato.

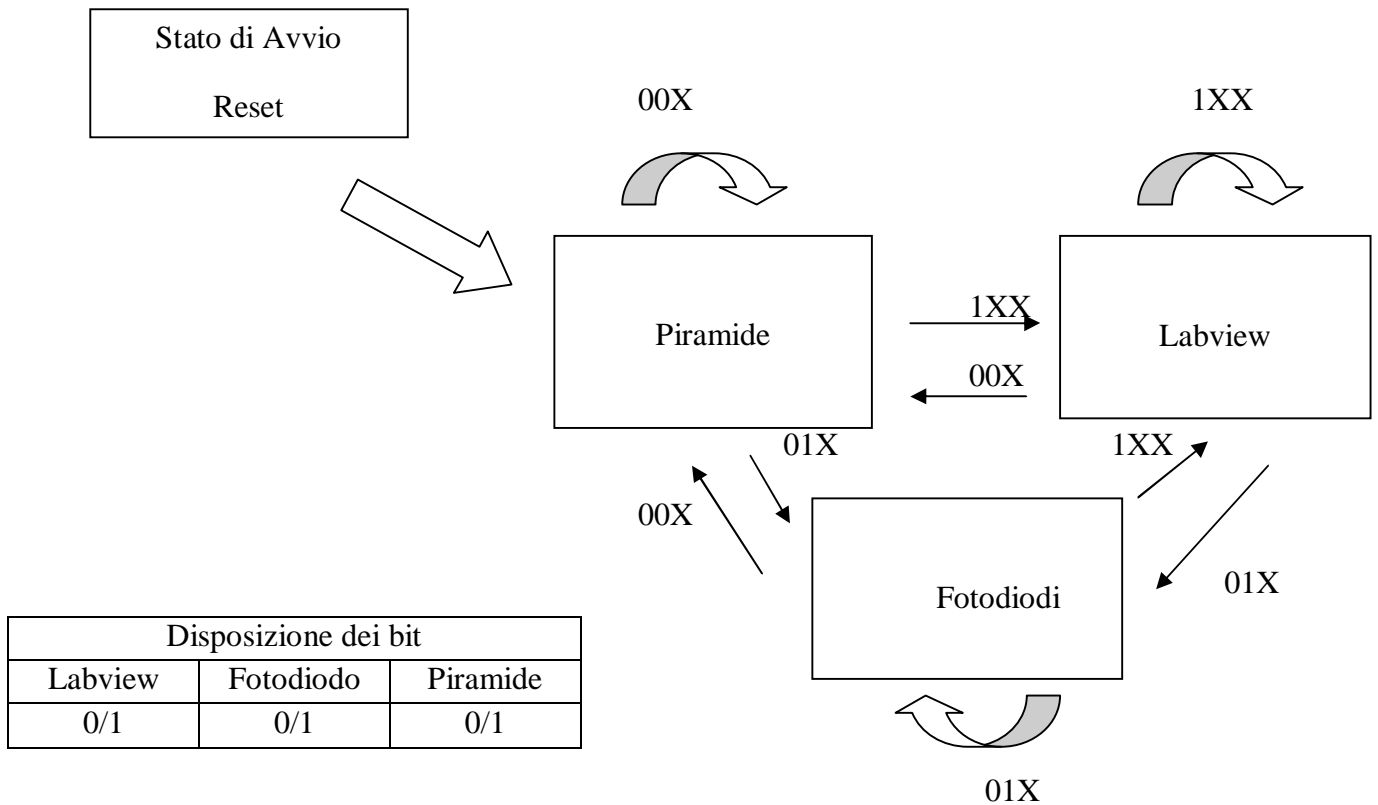
S0	S1	E	
0	0	0	Manuale
1	0	0	Piramide
0	1	0	Fotodiodi
1	1	0	Labview

Tabella 2.9-1 segnali in ingresso del multiplexer

L'integrato è stato usato per pilotare un multiplexer.

Il multiplexer è un circuito che agisce da deviatore fra le varie linee di ingresso, presentando in uscita il valore della linea selezionata. Le varie sorgenti sono identificate da un numero binario. Impostando tale numero sui pin di

2.9.3.1 Schema logico software del microcontrollore.



Il software di controllo è molto semplice. All'accensione c'è una rapida fase di inizializzazione del sistema, costituita essenzialmente dalla fase di reset dei componenti e dal settaggio dei pin in modo tale che il controllo sia svolto dalla piramide.

Successivamente viene avviata una routine di controllo che è uguale per ogni stato logico in cui si trova il sistema. Tale routine determina quali siano le opzioni di controllo attive e la loro priorità.

Facciamo un esempio. Supponiamo che sia presente un segnale dalla piramide e dai fotodiodi. Questi ultimi hanno una priorità maggiore e quindi comanderanno il sistema. Se compare un segnale dal Labview esso avrà priorità superiore agli altri.

Nello schema sopra riportato la X indica che il bit può assumere il valore 0/1 indifferentemente.

2.9.4 Interconnessione fra le schede

Le schede di controllo della piramide e dei fotodiodi sono separate ed interconnesse da un cablaggio il cui schema è riportato nelle tabelle che seguono.

Cavo Fotodiodi	Asse N-S	Marrone	Direzione
		Rosa	Frequenza
	Asse E-O	Giallo	Direzione
		Grigio	Frequenza
	Asse E-O	Verde	Segnale analogico fotodiodi
		Bianco	
Coppia Verde Bianco	Asse N-S		Segnale analogico fotodiodi

Cavo manuale		Marrone	direzione N-S
		Grigio	direzione E-O
		Verde	Abilita N-S
		Bianco	Abilita E-O

Le connessioni fra l'elettronica di controllo e l'interfaccia Labview sono riportate di seguito.

Cavo Per Labview		
PIN	Colore	
16	Blu	Controllo Labview E-O
17	Rosa	Direzione E-O
18	Bianco	Direzione N-S
19	Verde	Controllo Labview N-S
20	Marrone	MUX S1
21	Giallo	MUX S0
22	Rosa -Grigio	Enable
23	Viola	Direzione fotodiodo E-O
COM	Nero	GND
24	Rosso -Blu	Direzione piramide E-O
25	Verde - Marrone	MUX S1 N-S
26	Rosso	
27	Bianco - Giallo	MUX S0 N-S
28	Bianco - Verde	Enable N-S
29	Grigio	Direzione fotodiodo N-S
30	Giallo - Marrone	Direzione piramide N-S
		-

Lo schema di collegamento del micro controllore è riportato in Tabella 2.9-2

1	5V	20	GND
2		19	
3		18	Reset
4		17	
5	Labview	16	
6	Piramide	15	Axis enable
7	ADC Fotodiode	14	MUX S0
8	ADC Fotodiode	13	MUX S1
9	Manuale	12	
10	Finecorsa	11	

Tabella 2.9-2 collegamento pin del microcontrollore

2.10 Controllo Labview

Grazie al software Labview 8.6 della National Instruments è stata sviluppata una interfaccia di controllo e un sistema grafico per visualizzare lo stato dell' elettronica.

La caratteristica principale del Labview è quella di ridurre al minimo l'elettronica, limitandola a poche schede di acquisizione e di interfaccia. L'intelligenza del sistema viene trasferita al microprocessore di un normale PC programmato con il Linguaggio G.

Il linguaggio G è quasi esclusivamente grafico e consente di creare un software disegnando qualche cosa che assomiglia molto ad un diagramma di flusso. Questo permette allo sperimentatore di concentrarsi sulle idee, più che sulla sintassi di complicati linguaggi di programmazione.

Le schede di acquisizione che abbiamo deciso di utilizzare sono la

NI9215

Questa scheda è dotata di 4 input analogici con connettore BNC. Può leggere segnali in ingresso di ampiezza +/-10V utilizza una conversione analogico-digitale a 16bit. L'impedenza di ingresso è pari a 1Gohm. I tempi di conversione dipendono dal numero di canali coinvolti dato che il sistema lavora su un bus seriale. Si parte dai 4.4us per un singolo canale per andare a 6us, 8us, 10us incrementando il numero di canali da 1 a 4.

NI9403

E' una scheda dotata di 32 pin che possono leggere o inviare segnali TTL. Ciascun pin può essere configurato in maniera indipendente come input o come output. Il modulo nella sua completezza può fornire una corrente massima di 64mA.

NI9263

E' una scheda in grado di generare dei segnali di output analogici con ampiezza variabile tra -10V e +10V. L'output viene generato da un DAC a 16bit. L'impedenza d'uscita del sistema è di 0.1mA e può fornire una corrente di 1mA per canale. La scheda quindi non può pilotare dei carichi ma solamente fornire segnali di controllo a qualche dispositivo ad alta impedenza.

Il carico variabile UNIWATT EL-100 a nostra disposizione è dotato di un ingresso BNC che consente il pilotaggio tramite una tensione in ingresso fra 0 e 10 V. La tensione fornita determina la corrente massima accettata dal carico. La scala di corrente può essere regolata tra 0-20A. Per fare un esempio, se impostiamo una tensione di ingresso di 1V, la corrente massima accettata sarà 2A. Il punto di lavoro si sposterà quindi sulle coordinate (V_x, I_x) dove V_x è la tensione di lavoro della cella per la corrente corrispondente. Con questa tecnica è possibile tracciare la curva V-I caratteristica, variando I_{max} tra 0 e I_{sc} tramite la scheda NI9263 e leggendo la tensione e la corrente.

Un apposito circuito dotato di sensore ad effetto Hall misura la corrente in ingresso al carico variabile e la traduce in una tensione tra 0-10V. Lo stesso circuito potrebbe leggere la tensione sul carico, ma non è stato usato per la singola cella, dato che il suo errore è dell'ordine dei 2V, quindi confrontabile con il V_{oc} della cella. Il convertitore, infatti, è stato dimensionato per una tensione massima di 200V dato che si prevede di utilizzare più celle in serie.

La misura in tensione è stata accompagnata da una misura di temperatura effettuata con un sensore di temperatura di tipo Pt1000.

La misura è stata eseguita con il circuito in figura. Il partitore resistivo tra la Pt1000 e la resistenza è stato collegato a +5V dell'alimentatore. La tensione di alimentazione è stata realizzata con un modulo 7805 quindi sufficientemente stabile. Considerando pressoché indipendente dalla temperatura la resistenza nota, da essa è stato determinato il cambiamento di resistenza della Pt1000. La scheda di acquisizione della tensione ha un'impedenza di ingresso di 1Gohm, quindi possiamo supporre che la tensione del partitore non venga perturbata in modo sensibile dalla presenza della scheda di acquisizione.

Nonostante gli accorgimenti utilizzati per raggiungere una certa accuratezza della misura, i dati registrati non sono stati molto significativi per la nostra esperienza. Le temperature misurate sono state abbastanza basse. La scelta del punto di misura era dettata dalla struttura della scheda e quindi pressoché obbligata, ma questo ha fatto sì che la temperatura misurata fosse molto più bassa di quella effettiva della cella. Una schedina migliorata in questo senso è stata progettata ma non era ancora pronta al momento della redazione di questa tesi.

La scheda per generazione e acquisizione di segnali TTL ha consentito di creare una piccola interfaccia grafica con l'elettronica del sistema. Tale interfaccia permette di vedere in tempo reale il comportamento dell'elettronica, ma anche di inviare segnali di controllo.

I parametri che si possono vedere sono essenzialmente:

- Lo stato della piramide, con la visualizzazione immediata della coppia di lati maggiormente illuminata.
- Lo stato dei fotodiodi con la visualizzazione dei fotodiodi più illuminati.
- Lo stato complessivo del sistema.

Anche l'interfaccia grafica si sviluppa consentendo il monitoraggio e controllo dei due assi in modo indipendente. E' possibile quindi prendere il controllo tramite software di un solo asse o di entrambi. Queste opzioni sono di utilità pratica per la natura sperimentale del prototipo. E' frequente, infatti, in fase di misura, dover riposizionare o tarare l'apparato.

Il supporto nativo della tecnologia multicore, normalmente presente sui processori di ultima generazione, da parte del software Labview consente di effettuare diverse operazioni in parallelo e quindi di usare il software di controllo e il software di misura come un'unica routine.

Il pannello di controllo Labview ha assunto alla fine l'aspetto che si vede in Figura 2.10-1. Un quadro dove è possibile visualizzare in tempo reale i parametri caratteristici della cella, si possono visualizzare le curve V-I, il grafico della potenza in funzione del tempo. Sulla destra invece una serie di controlli e di indicatori che consentono di pilotare l'inseguitore e di monitorare lo stato. Una piccola visione in pianta della piramide consente di vedere quali siano i lati maggiormente illuminati, alcuni indicatori ci danno lo stato dei fotodiodi.

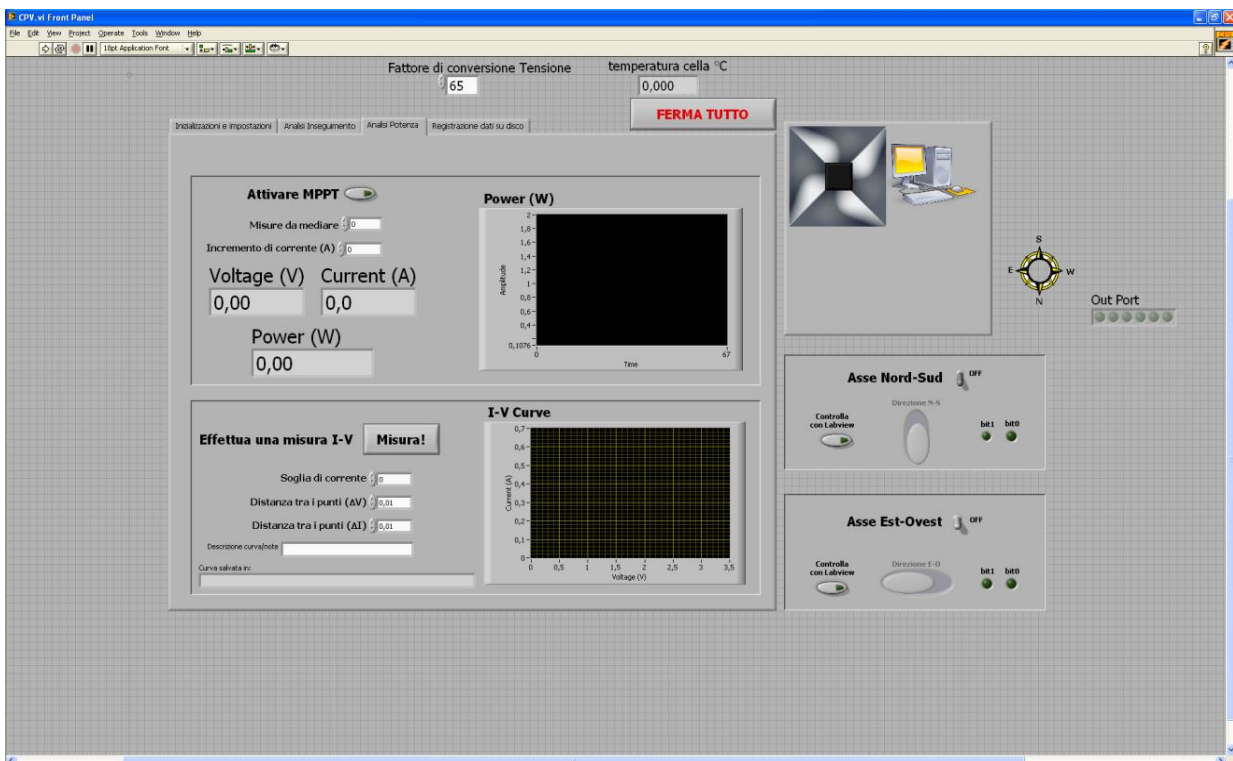


Figura 2.10-1 pannello di controllo realizzato con Labview

3 Misure

Le prime misure sono state effettuate su una stringa di 12 celle, tali celle erano raggruppate in due schede connesse in serie. In Figura 2.10-1 vediamo la stringa completa in fase di montaggio. A destra munita di ottiche per recuperare la porzione di luce non correttamente focalizzata.

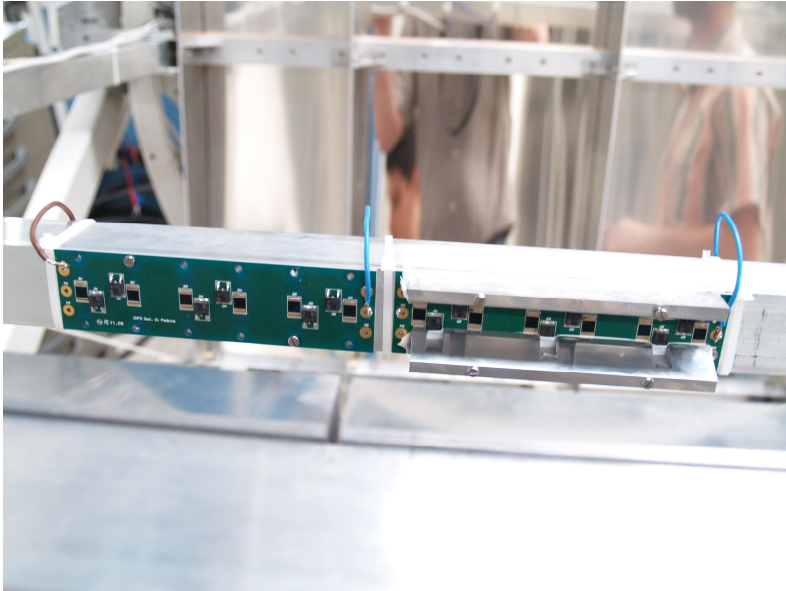


Figura 2.10-1 stringa di celle

3.1.1 Risultati attesi

Lo specchio concentratore ha una dimensione di 1600mm x 25mm ci si aspetta idealmente una concentrazione di 900X, questo dato va corretto fin da subito per la

presenza di altri fattori. La concentrazione effettiva che ci aspettiamo è data da:

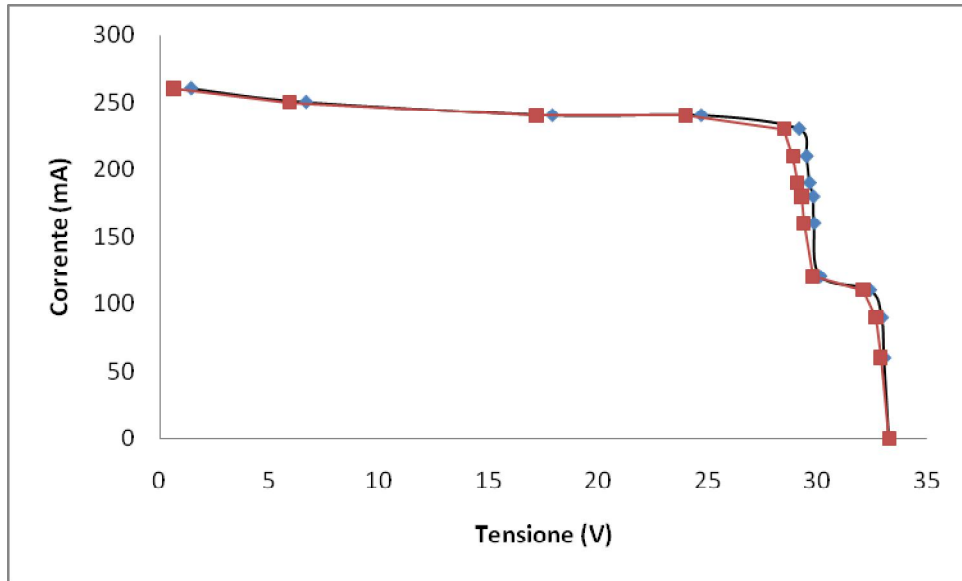
$$C = \frac{S_0 * \rho_1 * \rho_2 * \delta}{S_c}$$

S_0 indica la superficie dello specchio principale. S_c indica la superficie della cella; ρ_n sono le riflettività degli specchi; δ è una correzione dovuta al fatto che la luce effettiva è quella diretta.

S_0 (cm ²)	ρ_1	ρ_2	S_c (cm ²)	δ	Concentrazione Effettiva	η	Potenza attesa (W/cella)
300	0,8	0,8	0,3	0,85	490x	30%	4,9

Su un a serie di 12 celle correttamente funzionante ci si aspetta di avere circa 58,8W

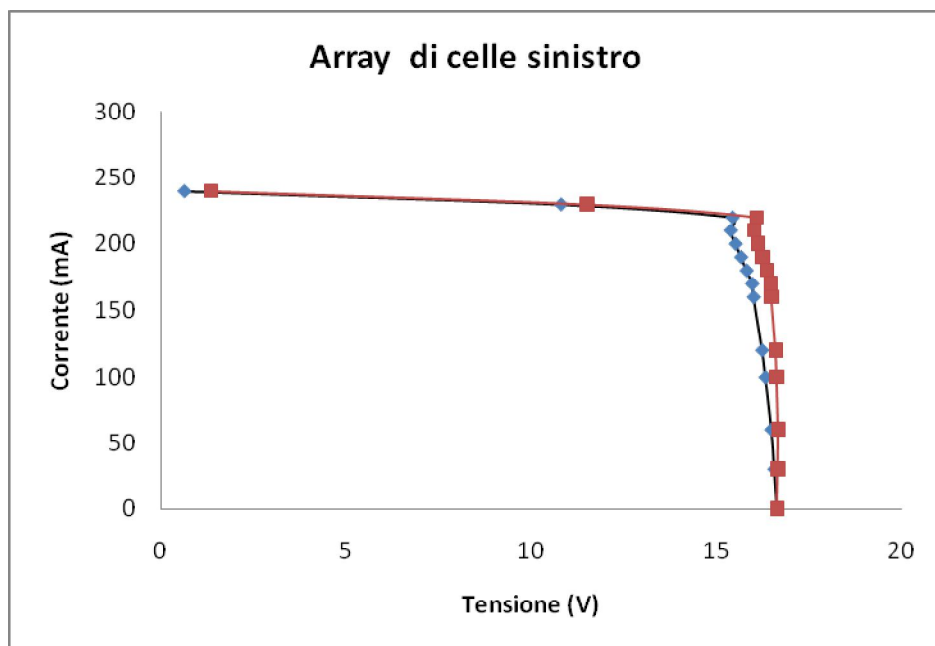
Provando ad oscurare metà dello specchio, abbiamo riscontrato che la variazione di potenza misurata era pressoché nulla. La parte più esterna dello specchio non focalizza correttamente, come è stato poi verificato sperimentalmente osservando che la potenza fornita dalla cella non variava coprendo questa parte più esterna. Per tale motivo abbiamo introdotto un ulteriore fattore nella potenza attesa. Ci si aspetta quindi di avere 29,4W complessivi.

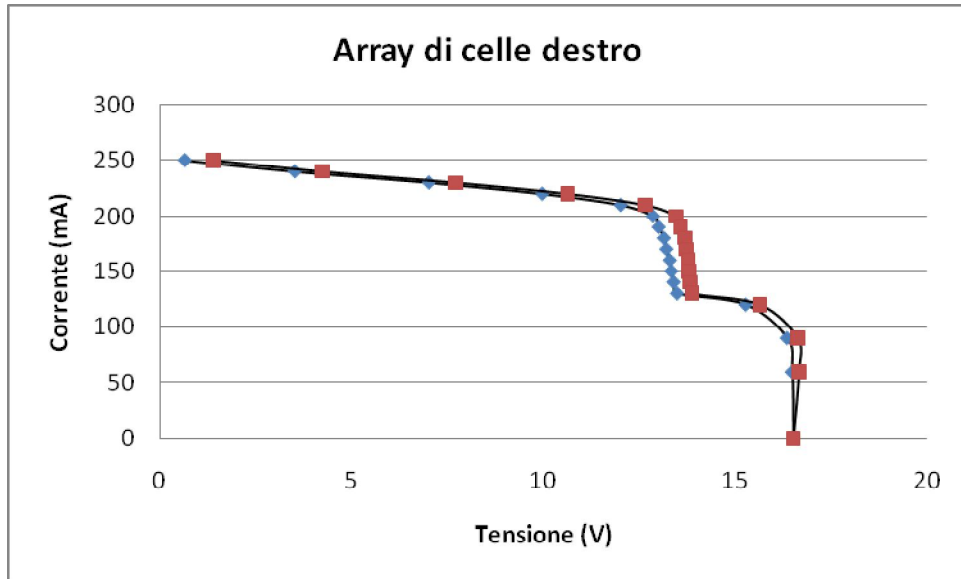


La potenza raggiunta complessivamente con la serie di 12 celle è di 6,55 W. Abbastanza insoddisfacente. L'andamento a gradino però indica che una cella non funzionava completamente, per qualche motivo. Consideriamo quindi che il massimo può essere stato raggiunto da 11 celle. Ci aspetteremmo comunque 26,95W.

Il grafico riporta due curve, quella in azzurro include anche una piccola correzione che considera la resistenza dei cavi usati per la misura stimata in 3Ω . Si vede che comunque è irrilevante ai fini della determinazione della potenza.

Con tale correzione la potenza è 6,77W cioè circa il 3% in più. Siamo sempre a circa $\frac{1}{4}$ della potenza attesa.





Abbiamo effettuato le misure della curva V-I sulle due serie di celle separatamente per verificare

- 1) L' andamento a gradino era dovuto probabilmente al parziale funzionamento di una cella
- 2) Come correttamente ci si aspetta, il parziale funzionamento di una cella non influisce in modo rilevante sulla corrente di cortocircuito, dal momento che essa transita sul diodo di bypass. Influisce invece sulla tensione globale che determina appunto il profilo a gradino.

I grafici riportano sia la curva misurata che la curva corretta considerando la resistenza dei cavi.

Anche se sono stati introdotti tutti i fattori di correzione possibili, abbiamo ugualmente ottenuto una potenza del tutto insoddisfacente.

Abbiamo quindi separato il problema in due tipi di valutazioni.

- 1) Valutazione della bontà dello specchio
- 2) Valutazione delle celle.

Per il primo problema abbiamo effettuato delle misure di riflettività con un laser, per il secondo problema abbiamo creato un apparato con uno specchio per telescopi di qualità e una singola cella preassemblata dalla Emcore.

3.1.2 Misura di temperatura

Per determinare la temperatura di lavoro della cella abbiamo utilizzato un sensore di temperatura resistivo di tipo Pt1000. La misura di resistenza viene fatta in modo indiretto creando un partitore con un resistore noto e stabile in temperatura. Il partitore di tensione viene alimentato a 5V. L'alimentazione è fornita tramite un LM7805. Il sistema è stato tarato con una temperatura nota. Il resistore noto è stato scelto in modo che il ΔV sul partitore fosse massimo nel range teorico di

temperature Questa è una misura grossolana, misure di temperatura più precise da tali sensori si ottengono col metodo dei quattro terminali.

3.2 Misure di riflettività

Abbiamo effettuato delle misure per determinare la riflettività degli specchi in uso. Per fare questo abbiamo utilizzato un laser con lunghezza d'onda di 417 nm.

Abbiamo considerato 3 specchi campione. Il primo è uno specchio ad alta qualità normalmente utilizzato per applicazioni laser. E' stato considerato come riferimento. Abbiamo testato insieme un campione di lamiera del nostro specchio (Alanod MIRO SUN 4270 KKSP) e un campione di lamiera alternativo (Almecco sp 295) .

La potenza erogata dal laser è stata quantificata in 9,920W

Abbiamo posto il bolometro alla distanza di 160cm dal campione. Dato che le lamiere mostravano uno spot diffuso abbiamo utilizzato un diaframma per limitare l'area su cui effettuare le misura. L'apertura del diaframma era di 5,58 mm

Specchio Thorlabs	Lamiera Alanoid	Lamiera Almecco
8,27 ± 0,04 W	2,6 ± 0,3 W	5,9 ± 0,3 W
Riflettività		
83%	26%	60%

La riflettività delle lamiere considerate sono abbastanza basse, nonostante queste siano state dichiarate dai costruttori superiori all'80% (si tratta di lamiere specifiche per applicazioni solari). Una misura più precisa ha evidenziato come il problema sia più che altro la rugosità della lamiera, cioè la riflettività è alta, ma solo a brevi distanze dagli specchi, a causa della alta diffusione provocata dalla rugosità. Lo spot del laser, viene infatti diffuso in un raggio esteso.

Una misura con un pezzo di lamiera della Alanod più estesa ha riportato il seguente risultato:

3,4±0,3 W pari ad una potenza riflessa del 34%

Questi risultati sembrano una spiegazione attendibile della mancanza di potenza sulle nostre celle di prova.

3.3 Test su una singola cella

La cella è stata incollata con una colla termo-conduttiva su un supporto in alluminio che si adattava correttamente al dissipatore attivo già usato con la serie di celle. La cella è assemblata dalla Emcore su un supporto ceramico che massimizza la dissipazione di calore e contemporaneamente garantisce l'isolamento elettrico fra cella e base di appoggio. Le dimensioni di tale cella sono 10 mm x 10 mm. La piastrina è dotata di diodi di bypass. Le prime prove con uno specchio parabolico hanno reso necessario dotare la scheda di una protezione in alluminio. Tale protezione è costituita da una lamiera sulla quale è stata ricavata una finestra da 1cm². La Figura 3.3-1. Illustra questa soluzione sia nella sua versione progettuale che nella sua realizzazione reale. Durante il posizionamento, infatti, la concentrazione di luce su componenti diversi dalla cella, avrebbe potuto provocare il danneggiamento degli stessi. Per esempio il package dei diodi o l'isolante dei connettori.

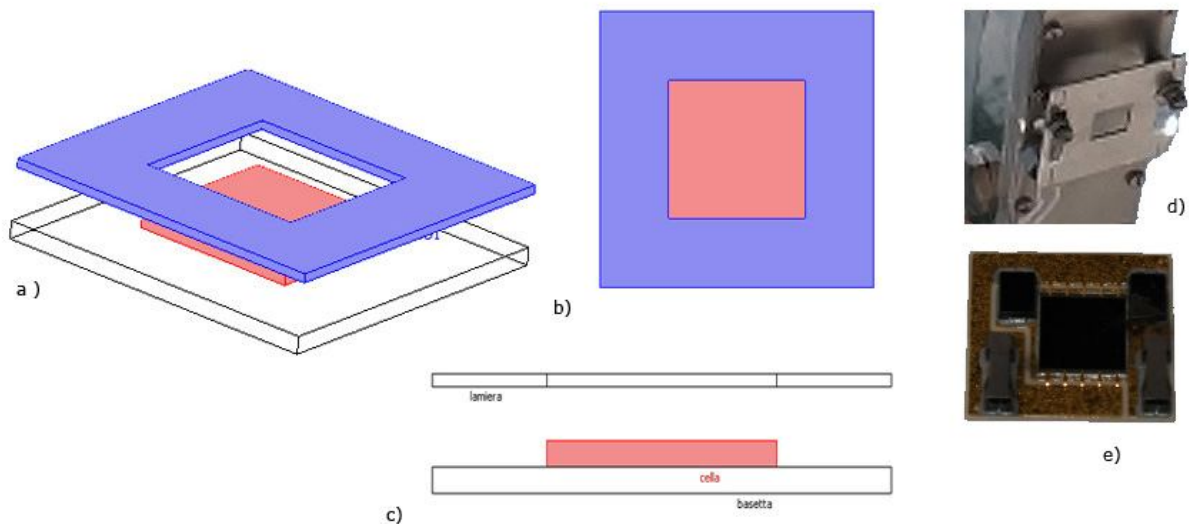


Figura 3.3-1 cella con protezione in lamiera a) prospettiva b) vista dall'alto c) vista laterale d) protezione in lamiera con dissipatore e) cella utilizzata

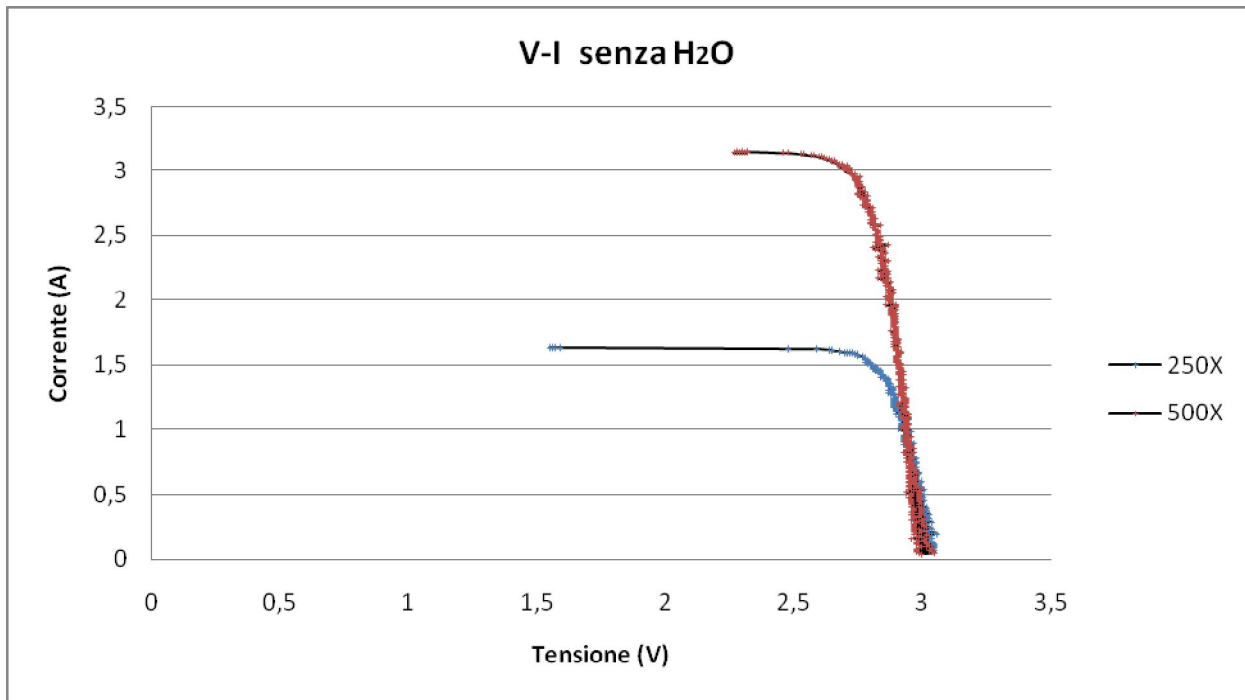
Abbiamo inoltre posizionato una termo-resistenza sulla base di fissaggio. La misura della temperatura è stata fatta con il seguente circuito semplice. La resistenza R2 è stata scelta in modo tale da massimizzare il ΔV nel range considerato.

La struttura dell' apparato, comunque, ha reso impossibile la misura in temperatura in punti molto vicini alla cella.

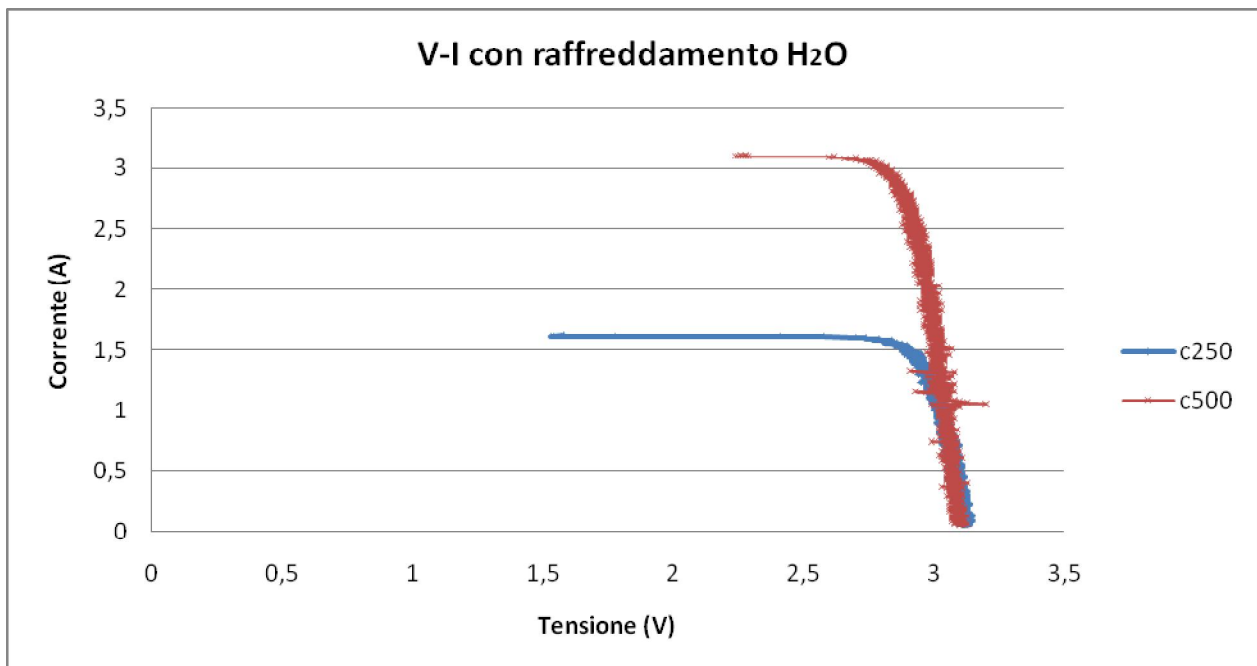
Le misure sono state effettuate con un sistema di acquisizione della National Instruments. Il circuito di misurazione segue lo schema riportato in figura.

La cella è stata testata con due concentrazioni 250X e 500X².

² Questa concentrazione è calcolata come il rapporto fra area dello specchio e area della cella. La potenza effettiva viene calcolata in tabella.



Il grafico riporta la curva V-I caratteristica della cella in assenza di raffreddamento.



In questo grafico vediamo le curve caratteristiche dopo l'azionamento del raffreddamento attivo ad acqua.

Le differenze sono minime e riguardano la tensione a circuito aperto come ci si aspetta. La corrente foto generata non subisce variazioni rilevabili.

Nella tabella che segue sono riportati i risultati delle misure.

L'intensità della luce diretta è stata valutata in 690W/m^2 . Tale misura è stata effettuata con un bolometro dotato di adeguata protezione che consentisse di misurare solo la luce diretta.

La temperatura ambiente era di 37°C . L'acqua aveva una temperatura di 25°C .

Sistema senza raffreddamento					
Concentrazione	V_{oc}	I_{sc}	V_{max}	I_{max}	P_{max}
250X	3,06 V	1,63 A	2,75 A	1,58 V	4,35 W
500X	3,05 V	3,15 A	2,71 A	3,04 A	8,24 W

Tabella 3.3-1

Sistema con raffreddamento					
Concentrazione	V_{oc}	I_{sc}	V_{max}	I_{max}	P_{max}
250X	3,15 V	1,62 A	2,84 A	1,58 V	4,48 W
500X	3,2 V	3,11 A	2,82 A	3,02 A	8,51 W

Tabella 3.3-2

Parametri del sistema

	Fill Factor	Rendimento ³
250X	0,87	30%
500X	0,86	28%
250X + raff	0,88	31%
500X + raff	0,86	29%

Tabella 3.3-3

Intensità luce W/m^2	Sistema	Riflettività	Potenza ottica effettiva (W)	Potenza elettrica (W)	Rendimento celle	Rendimento PSE ⁴
690	250X	0,85	14,7	4,35	30%	20,3%
690	500X	0,85	29,3	8,24	28%	20,3%
690	250X + H ₂ O	0,85	14,7	4,48	31%	22%
690	500X + H ₂ O	0,85	29,3	8,51	29%	21%

Tabella 3.3-4

Le tabelle riportano i risultati ottenuti. Vediamo innanzitutto che il raffreddamento porta ad un incremento di circa il 3% della potenza. Questo incremento è dovuto essenzialmente alle variazioni della tensione.

In Tabella 3.3-4 sono riportati i parametri che abbiamo usato per calcolare l'efficienza effettiva. La luminosità considera solamente la componente diretta. E' stata introdotta la riflettività utile dello specchio stimata in 85%. E' stato inoltre riportato il rendimento delle celle che è attorno al 30%.

A titolo indicativo è stato riportato anche un rendimento che dovrebbe avere un pannello in silicio per fornire un risultato equivalente. Nella stima si è considerato che un pannello piano vedrebbe anche un 15% di luce diffusa.

³ Il rendimento è della cella è calcolato considerando i parametri in Tabella 3.3-4

⁴ Pannello al Silicio Equivalente

3.4 Misure in laboratorio sulle celle

3.4.1 Il simulatore solare



Figura 3.4-1 simulatore solare

solare.

Per le misure di laboratorio abbiamo utilizzato un simulatore solare visibile in Figura 3.4-1. Il simulatore è costituito da un alimentatore elettronico da 500W, una lampada ad arco allo Xenon, uno specchio parabolico per ottenere un fascio di luce parallelo. L'arco della lampada è posto sul fuoco dello specchio parabolico. E' stato inserito anche uno specchio piano per deviare il fascio di 90° e renderlo parallelo al piano di lavoro. Il fascio di luce viene focalizzato da una lente di Fresnel di dimensioni 26,7mm x 26,7mm in acrilico ottico. Abbiamo introdotto, inoltre, un filtro AM1 per ottenere uno spettro simile a quello

3.4.2 Variazioni di V_{oc} e di I_{sc} in funzione della temperatura

Abbiamo testato una cella per stabilire quali fossero le variazioni di tensione a circuito aperto (V_{oc})

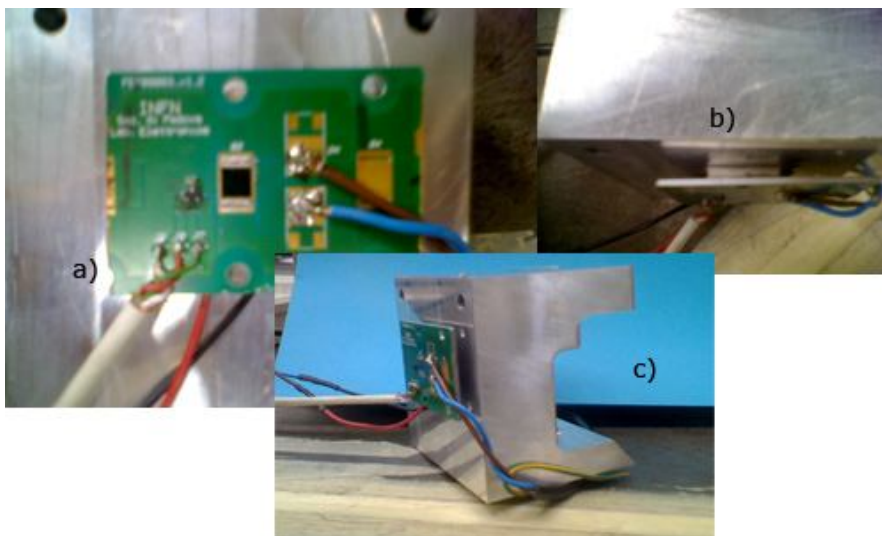
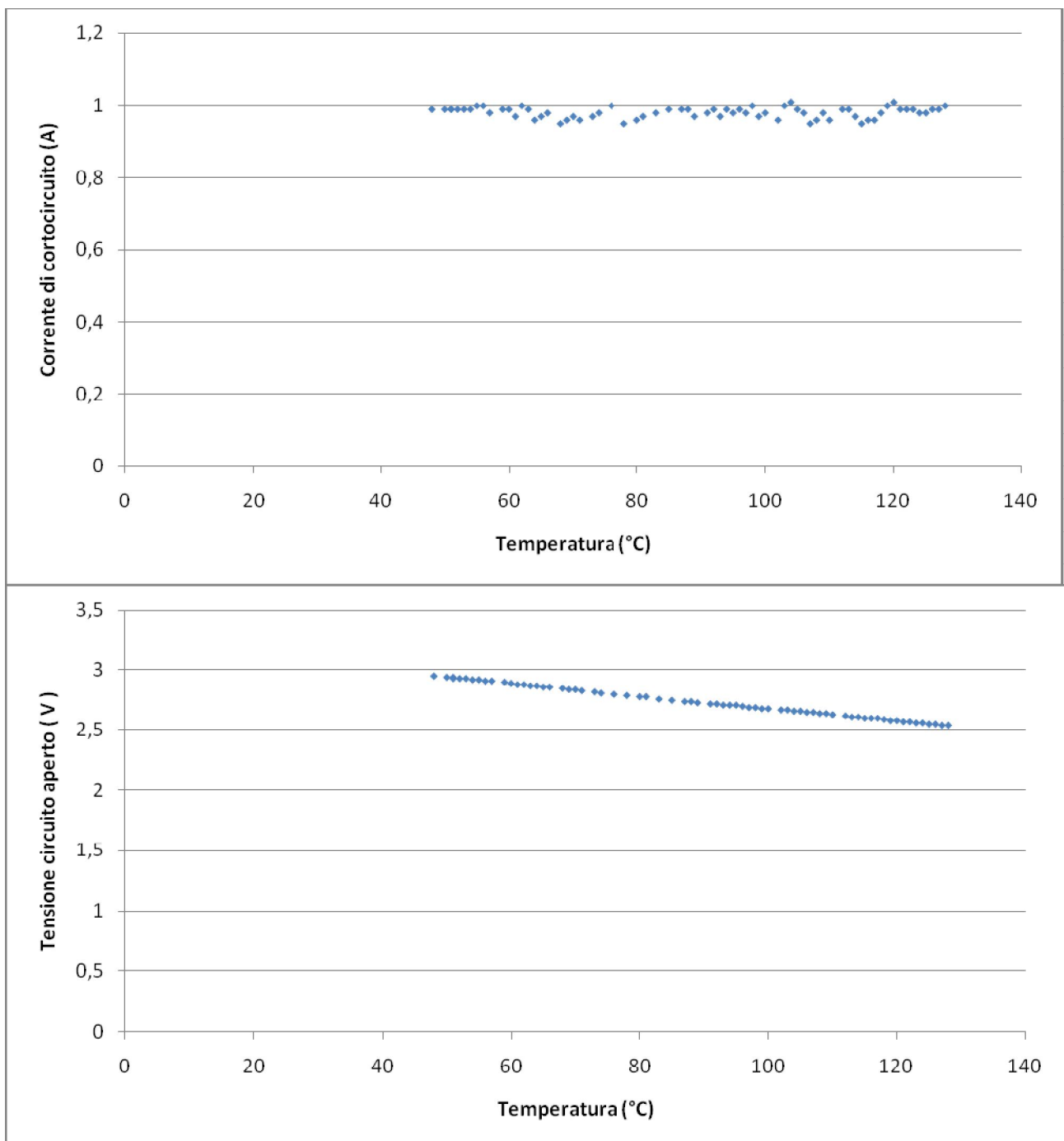


Figura 3.4-2 allestimento sperimentale per le misure in temperatura. a) cella con connessioni per sensore b) visione dall'alto c) visione globale con dissipatore

e le variazioni di corrente di cortocircuito (I_{sc}). In questo modo possiamo comprendere meglio quali sono le condizioni di lavoro migliori per il nostro apparato. La basetta su cui è fissata la cella è uguale a quella utilizzata per le prime misure, è stato aggiunto, però, un sensore di temperatura elettronico. Si tratta del TC1047. Questo sensore fornisce una tensione proporzionale alla temperatura. La variazione

di tensione è pari a $10\text{mV}/^\circ\text{C}$. Questo componente è lineare in un intervallo compreso tra -40°C e 125°C . L'allestimento sperimentale relativo a queste misure è visibile in Figura 3.4-2. La scheda con la cella (a) è dotata di un sensore e di opportune connessioni per leggere la tensione, la corrente, e la temperatura. Sul retro della scheda è stata messa una cella di Peltier (b) per poter controllare la dissipazione e quindi la temperatura. L'allestimento globale (c) quindi è costituito dalla scheda, da una cella di peltier e da un dissipatore di alluminio di dimensioni adeguate. Le misure effettuate riguardano dapprima la tensione a circuito aperto in funzione della temperatura. In seguito la corrente in funzione della temperatura. Come ci si aspetta la corrente è abbastanza costante, mentre la tensione a circuito aperto diminuisce linearmente con la temperatura. Le misure riportate di seguito sono state fatte ad una concentrazione di 300 soli. L'intensità luminosa è stata misurata con un bolometro.

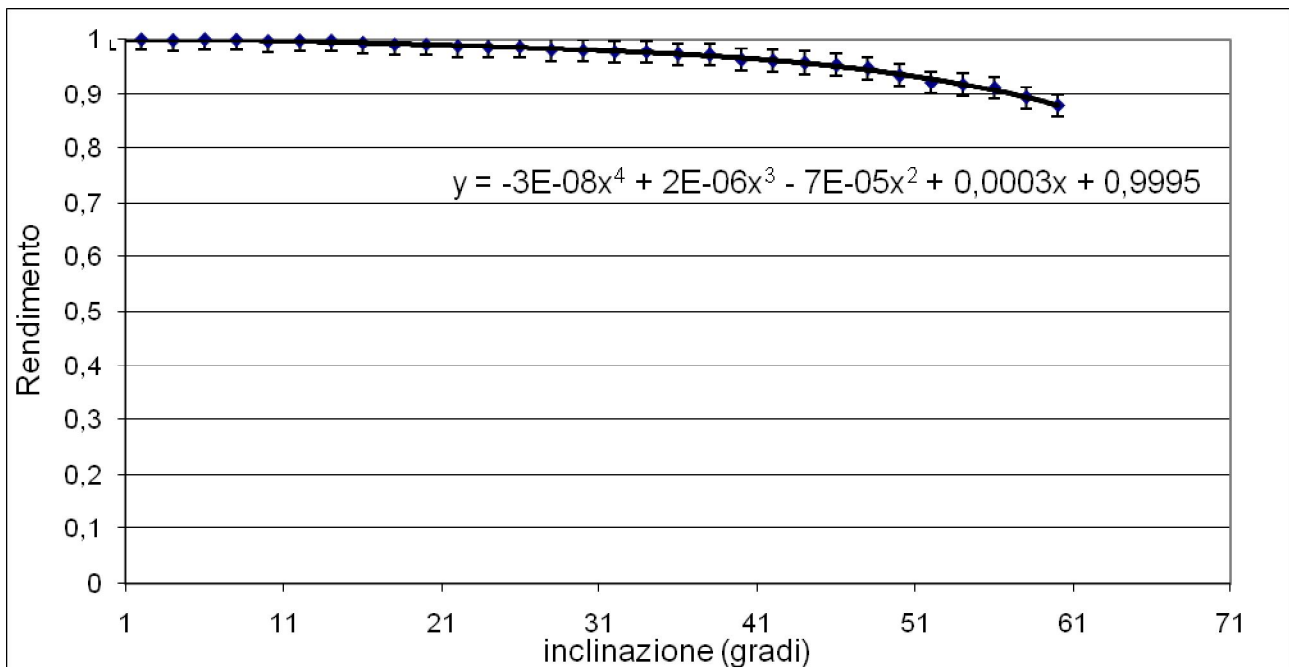


L'analisi dei due grafici precedenti mostra come la tensione abbia una dipendenza lineare dalla temperatura, almeno nel range di misura del sensore. Per quanto riguarda la corrente, essa è pressoché costante. Come del resto ci si aspetta dal modello fisico della cella fotovoltaica esaminato in precedenza. La dipendenza di V_{oc} dalla temperatura è di circa $5\text{mV}/^\circ\text{C}$, valore compatibile con quello fornito dal costruttore.

Efficienza in funzione dell' angolo di incidenza

Ci siamo chiesti se l'efficienza della cella fosse indipendente dall'angolo di incidenza dei raggi luminosi. Lavorando con dei sistemi ottici, infatti, la luce proveniente da ciascuna porzione di specchio incide con angoli differenti sulla cella. La cella, inoltre può essere collocata in diverse posizioni. E' quindi interessante capire se questo fatto possa influenzare il rendimento complessivo. L'allestimento sperimentale per questa misura è quello di Figura 3.4-2, e il simulatore solare.

Dal grafico possiamo notare come l'andamento sia quasi costante fino circa a 45° . La perdita di rendimento inizia a diventare significativa oltre questo angolo. Vediamo che a 60° il rendimento è sceso all' 87%. Nel disegnare uno specchio ottimale e nel posizionamento dello stesso, quindi, si dovrà considerare anche questo parametro.



3.5 Test su varie tipologie di specchio.



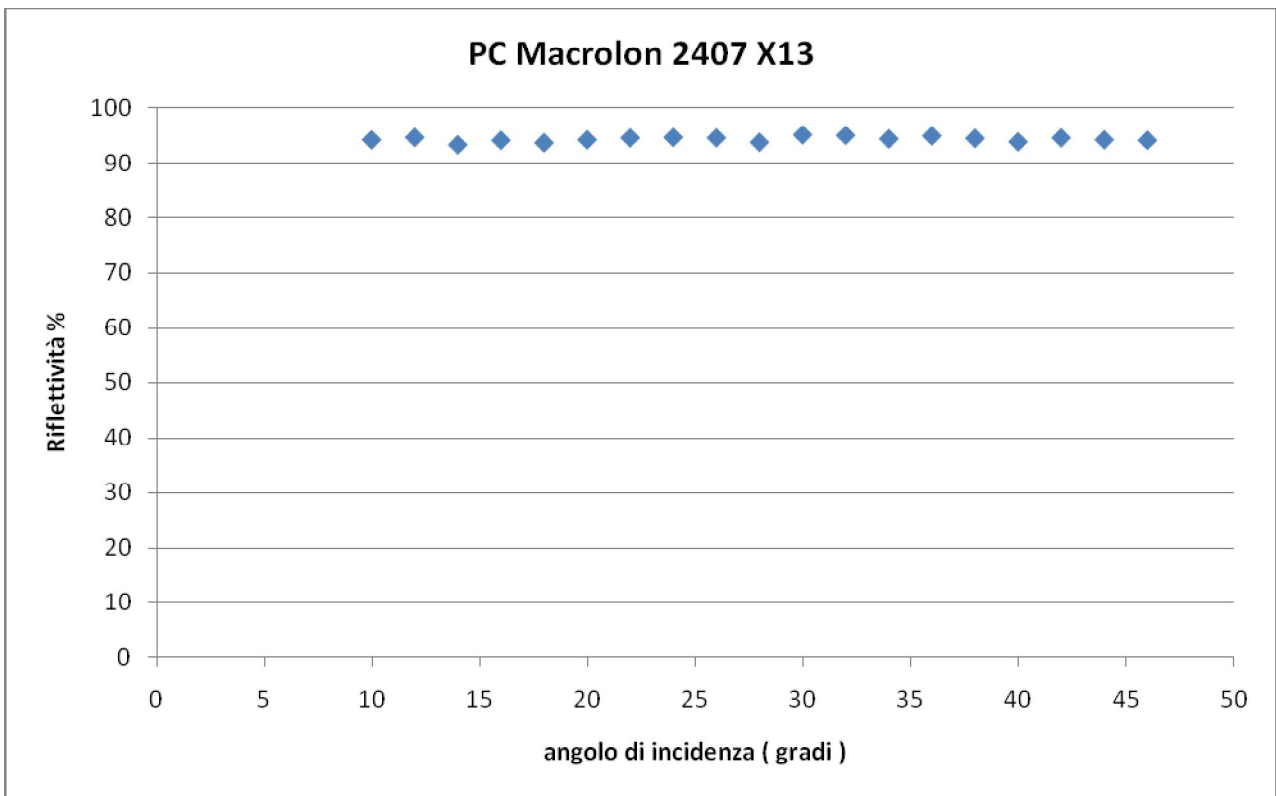
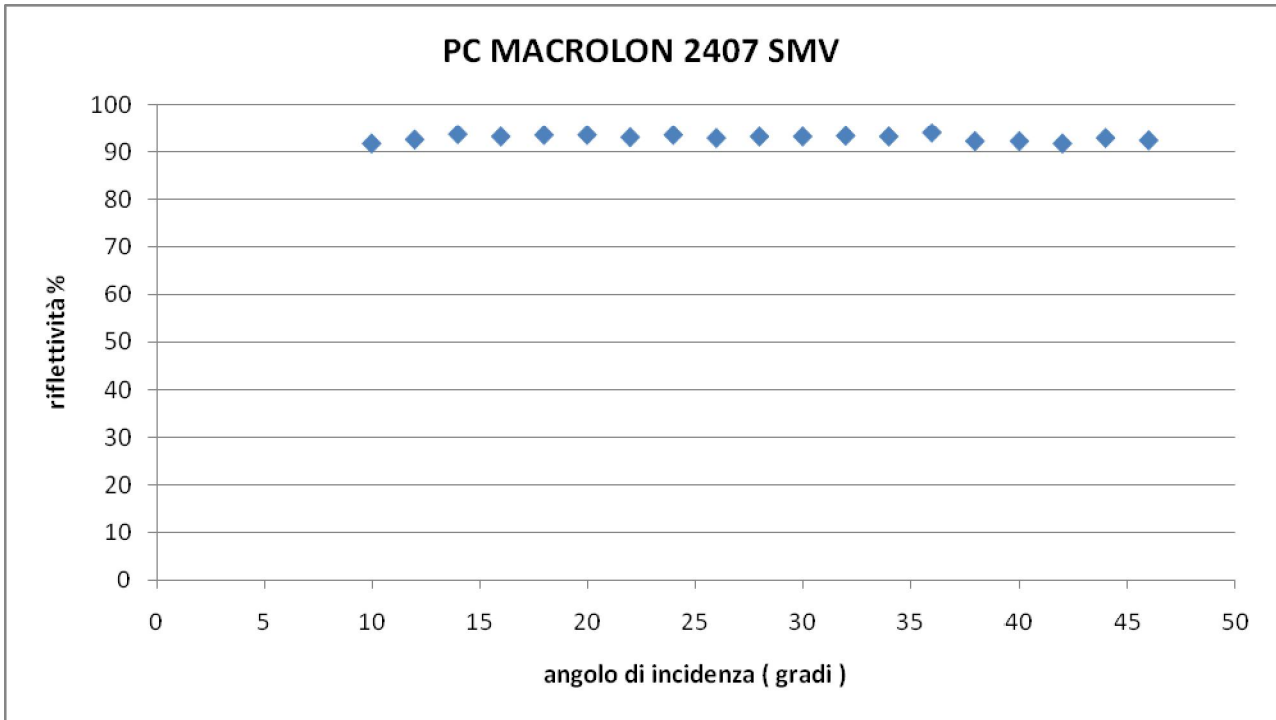
L'idea centrale di questo tipo di apparati è di realizzare gli specchi in materiale leggero ed economico. Si è pensato di utilizzare delle materie plastiche e di alluminarle per deposizione. In Figura 0-1 possiamo vedere un esempio di materiale prima e dopo l'alluminatura. Inizialmente abbiamo considerato porzioni di specchio appartenente a fari di automobili attualmente in produzione. L'analisi su tali materiali ha dato risultati scarsi, si è quindi proceduto ad analizzare in modo sistematico l'alluminatura su varie materie plastiche disponibili sul mercato. Per tali materie plastiche abbiamo effettuato misure di riflettività utilizzando il simulatore solare visto nel paragrafo 3.4.1. Di seguito riportiamo i dati dei campioni esaminati. Si può vedere la riflettività in funzione dell'angolo di incidenza della luce.

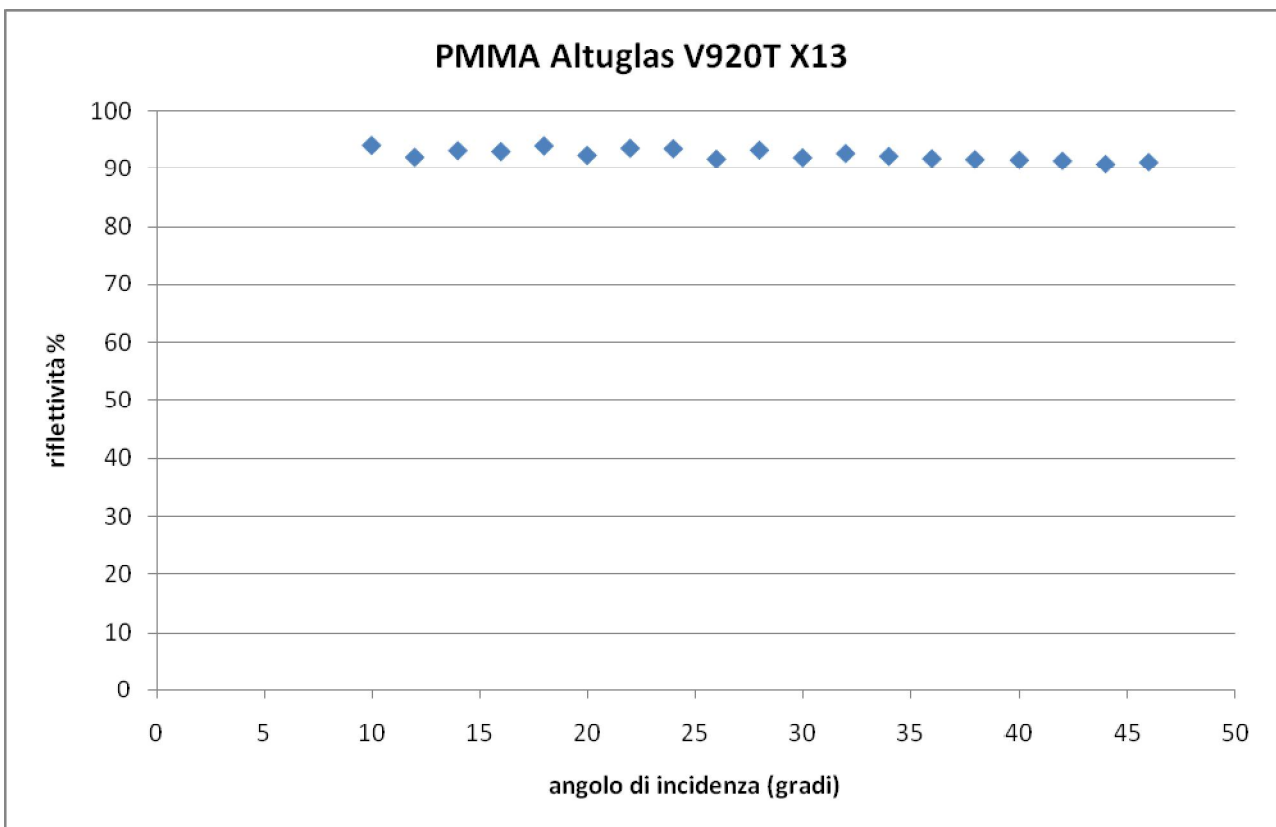
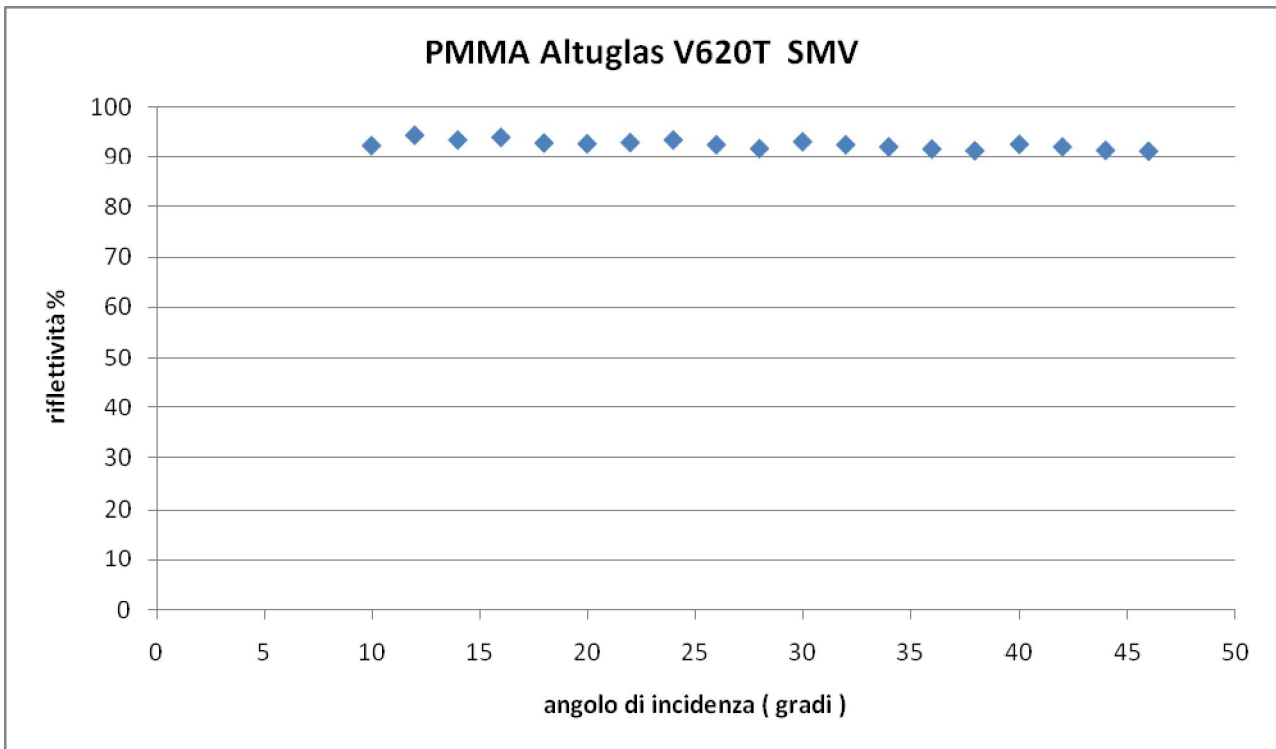
Figura 0-1 esempio di specchio usato per le misure

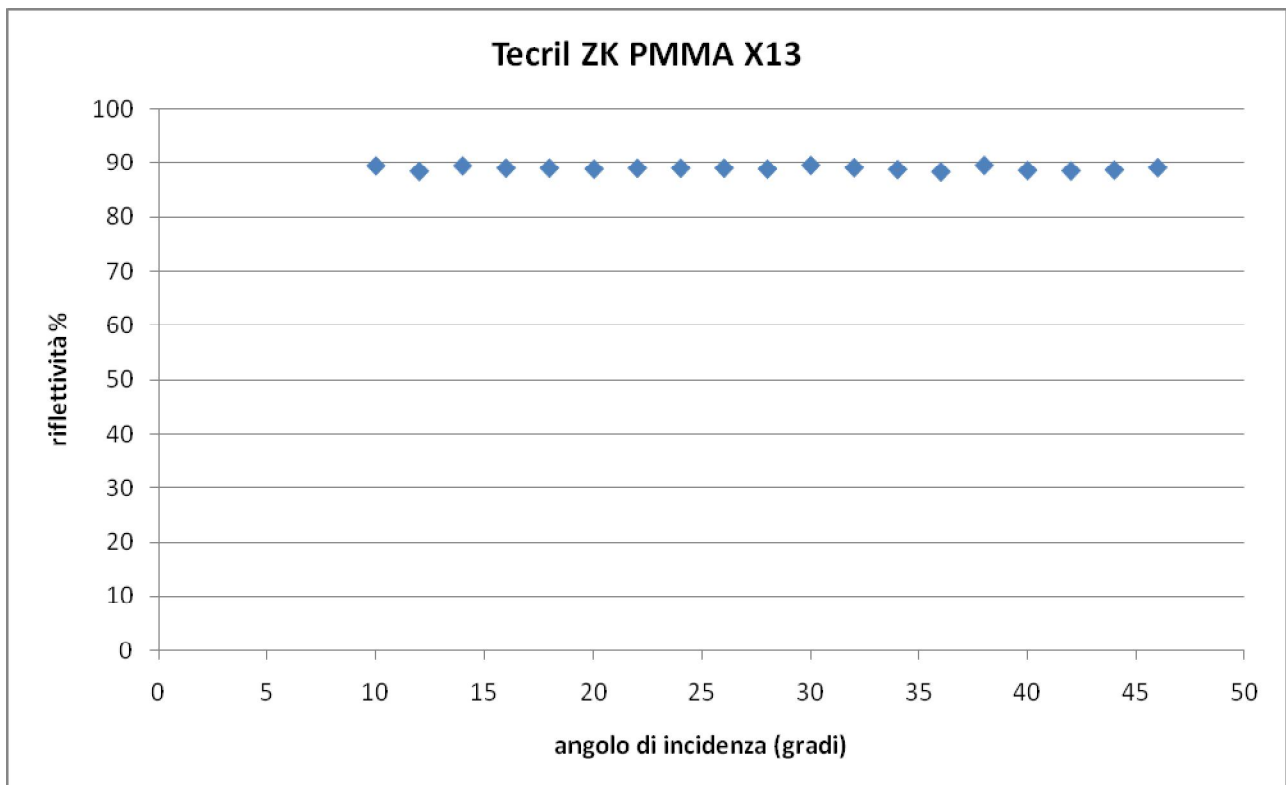
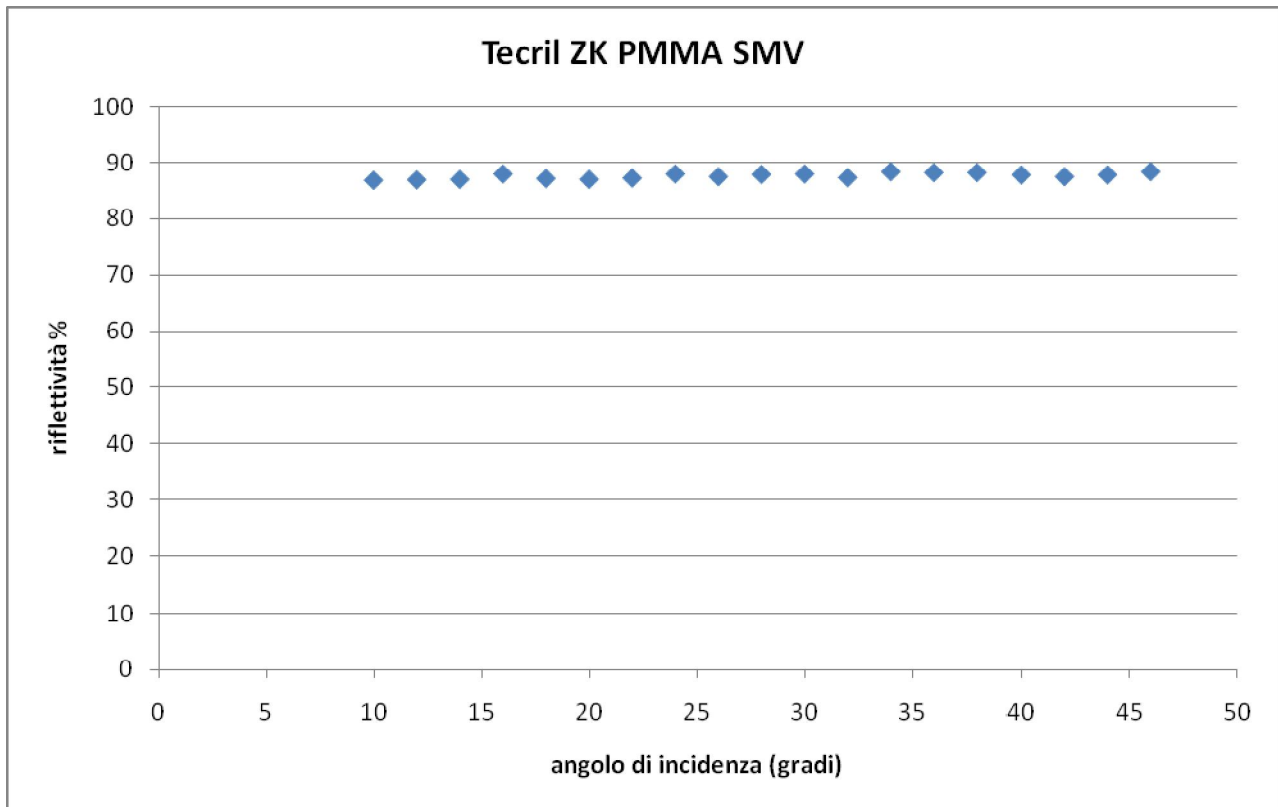
Tabella 0-1 misure di riflettività

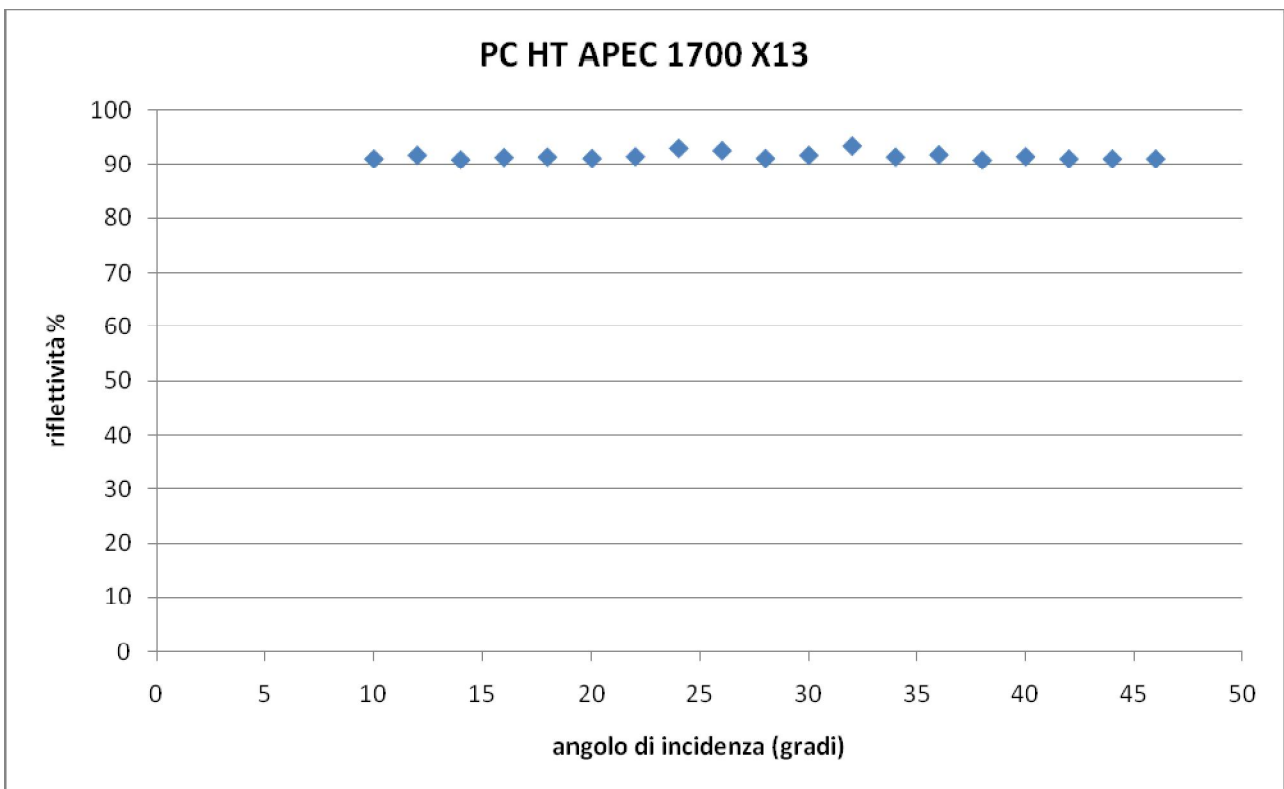
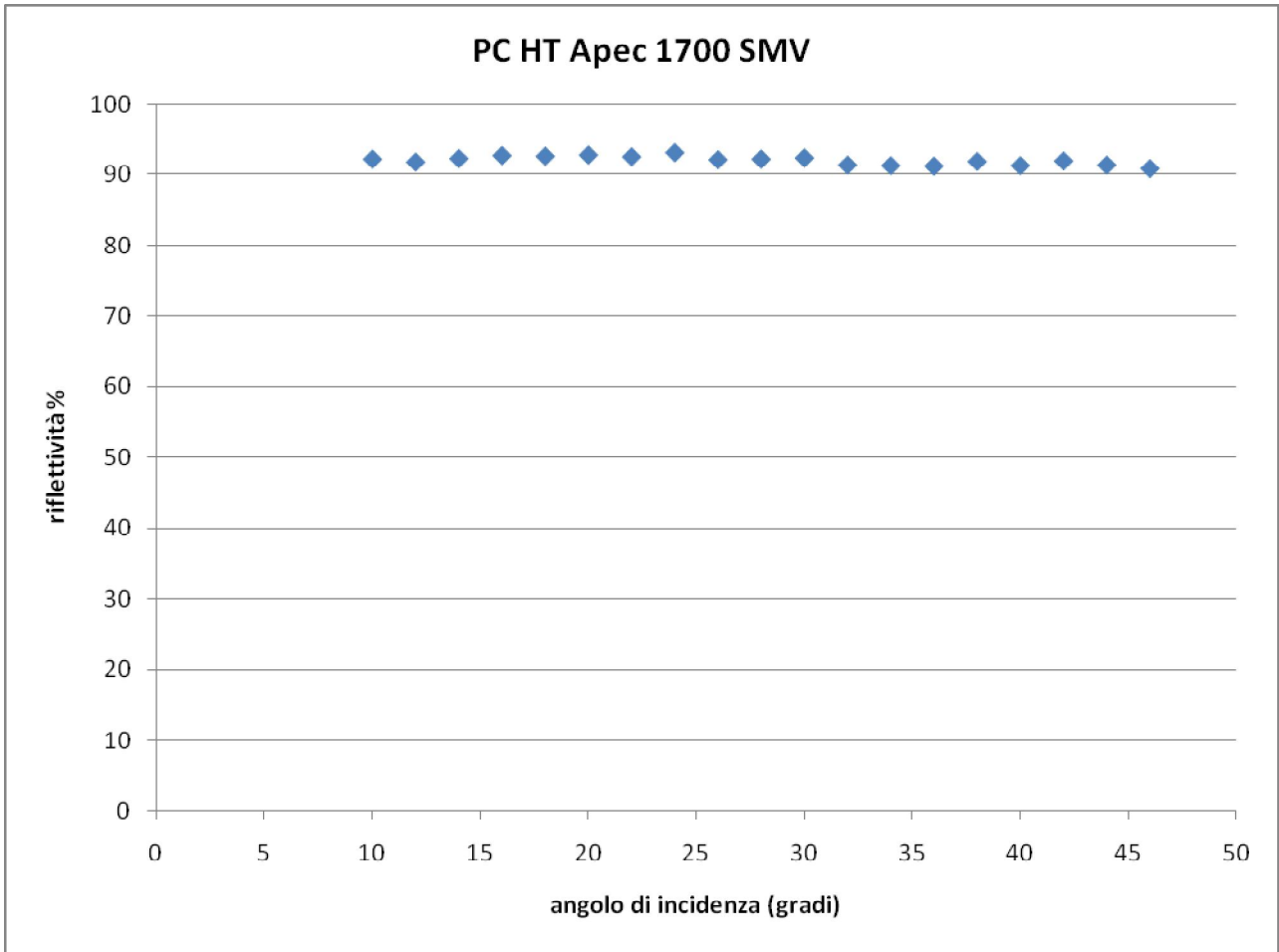
	LATO	R
PC MACROLON 2407	SMV	92,50
	X13	93,35
PMMA ALTUGLAS V920T	SMV	92,42
	X13	92,36
TECRIL ZK PMMA	SMV	87,58
	X13	88,93
PC HT APEC 1700	SMV	91,52
	X13	91,51

La Tabella 0-1 sintetizza i risultati ottenuti per le materie plastiche utilizzate. Ogni plastica è stata stampata utilizzando due tipologie di acciaio (SMV e X13) diverse per la matrice e per il punzone. In questo modo si è potuto misurare sullo stesso pezzo queste due variabili (materiale plastico, materiale stampo). Di seguito vengono riportati i grafici della riflettività in funzione dell'angolo di incidenza della luce.









Per tre fra i campioni utilizzati la riflettività è risultata superiore al 90% . Il risultato è molto buono e qualitativamente superiore ai materiali usati nei primi esperimenti.

Degli stessi specchi abbiamo anche effettuato misure di rugosità ottenendo i risultati riportati nella tabella che segue.

	Valor Medio (nm)	Dev Standard		numero misure
Con Al	44,93	14,25		44
Senza Al	19,89	7,59		9

I dati riportano una media delle rugosità ottenute da varie misure sul supporto migliore con e senza alluminatura.

4 Conclusioni

Questo lavoro ha toccato un po' tutti gli aspetti della realizzazione sistema fotovoltaico a concentrazione. Anche se mi sono concentrato principalmente sulle misure di efficienza delle celle e sull'elettronica dell'inseguitore. La parte di ottica e meccanica è stata considerata in modo marginale. La meccanica dell'inseguitore era già esistente e comunque uno studio su di essa esula dallo scopo di questo lavoro. L'ottica invece è stata considerata per quelle che sono le misure di efficienza su campioni di materiali.

Il progetto, per quanto mi riguarda, si è fermato ad una fase di apprendimento. E' stato realizzato un a prototipo che costituisce un buon punto di partenza per comprendere quali sono i punti chiave su cui lavorare maggiormente per aumentare l'efficienza. C'è stata, inoltre, la possibilità di valutare in tutti i suoi aspetti la fisica di un sistema di questo tipo.

4.1 Celle

Le misure che abbiamo effettuato sono affette da importanti errori sistematici, dovuti alle differenze fra lo spettro solare e lo spettro della lampada del nostro simulatore. Attualmente è in fase di allestimento un apparato sperimentale che consenta di determinare lo spettro effettivo e capire quanta radiazione interagisca effettivamente con le celle.

La prima versione della schedina di supporto e del fissaggio si è dimostrata adeguata dal punto di vista elettrico. Si è pensato di migliorarne le prestazioni dal punto di vista termico. Per aumentare la dissipazione di calore è attualmente in fase di studio una versione in materiale ceramico. Come si è visto dalle misure, infatti, il rendimento della cella dipende anche dalla temperatura operativa. Il primo stadio di dissipazione, costituito dal materiale in contatto diretto con la cella, è quindi fondamentale. Per questo si stanno provando varie soluzioni al fine di ottimizzare la scelta.

4.1.1 Raffreddamento

Il raffreddamento è un altro degli elementi che contribuiscono al miglioramento delle prestazioni e all'affidabilità globale del sistema. Per le nostre misure abbiamo utilizzato un dissipatore attivo costruito ad hoc. Il raffreddamento avveniva grazie alla circolazione forzata di acqua. Nelle misure non si è tenuto conto dell'energia necessaria a mettere in movimento il fluido refrigerante. In questa prima fase, infatti, lo scopo era semplicemente quello di valutare gli effetti del raffreddamento sull'efficienza globale.

La soluzione in fase di studio riguarda la realizzazione di un sistema di raffreddamento passivo che sfrutti il naturale moto convettivo dell'aria per dissipare il calore. Per quanto riguarda l'affidabilità dell'apparato, infatti, un sistema passivo è certamente più adatto. La luce concentrata porta ad

avere un forte riscaldamento localizzato che potrebbe diventare dannoso in caso di malfunzionamento di un sistema attivo o troppo complesso.

La necessità di avere un corretto raffreddamento non riguarda molto l'efficienza del sistema. Le celle, infatti, risentono in modo poco marcato

Dal punto di vista dell'affidabilità e del bilancio energetico la soluzione ideale è rappresentata da un sistema di raffreddamento passivo. Le misure di laboratorio hanno evidenziato una scarsa dipendenza del rendimento dalla temperatura, ma il raffreddamento svolge un ruolo essenziale per evitare il surriscaldamento dell'intero sistema. In questi sistemi l'uso di ottiche comporta una concentrazione di energia su aree ristrette e a conseguenti innalzamenti di temperatura locali molto marcati. Alcuni test che abbiamo effettuato evidenziano come sia facile raggiungere condizioni critiche in cui si innesca un processo di combustione della componentistica, dei cablaggi e di tutte le materie plastiche costituenti il sistema.

4.2 Elettronica

L'elettronica ha seguito dei criteri di economicità e di facilità nella realizzazione. Questa parte del sistema si è dimostrata adeguata alle nostre esigenze. Con pochi componenti commerciali abbiamo ottenuto un controllo con feedback abbastanza preciso in grado di sfruttare pienamente le potenzialità dell'apparato meccanico in dotazione. Rimangono da integrare soluzioni per migliorare le prestazioni del sistema in caso di eventi atmosferici che potrebbero comprometterne la stabilità. Questo esula comunque dallo scopo principale di questo lavoro. Il progetto è stato concepito comunque per essere aperto a modifiche e ad aggiunte. Si è cercato, infatti, di trasferire su un microprocessore programmabile parte dell'elettronica di controllo. In questo modo è sufficiente cambiare un software per espandere il sistema.

4.3 Ottica

Anche la scelta dell'ottica è in continua evoluzione. Le variabili in gioco sono numerose anche in questa parte. Oltre alla ricerca di un design performante, abbiamo visto che la scelta dei materiali e dei metodi di lavorazione sono variabili critiche.

I primi test che abbiamo condotto con lamiera di alluminio hanno evidenziato come la rugosità sia un parametro essenziale per determinare le prestazioni dello specchio. Materiali che possono funzionare bene per applicazioni di solare termodinamico hanno dimostrato una scarsa efficienza. Nella nostra applicazione, infatti, non basta avere una riflettività molto alta, ma è richiesto anche che la luce venga focalizzata con molta precisione.

Un strada più promettente si è rivelata quella dell'alluminatura per deposizione. Questo processo consente di ottenere rugosità basse. Più adatte alle applicazioni. Anche questa parte comunque ha richiesto diversi test per la scelta corretta del substrato da alluminare.

La realizzazione di un prototipo funzionante comporta una sinergia tra i vari elementi che lo compongono. La ricerca quindi prosegue in più direzioni per migliorare le prestazioni dei vari elementi ed ottenere una efficienza globale superiore.

Bibliografía

1. R.M Swanson: *The promise of concentrators*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 8, 93-111 (2000)
2. A. Royne, Ch. J. Dey, D.R. Mills: *Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review*. Solar Energy Materials and Solar Cells 86, 451-483 (2005)
3. Rolf Allan Lurdes Morales: *Performance of advanced triple-junction (ATJ) solar cells*. Pontificia Universidad Catolica de Chile. Escuela de Ingenieria (2005)
4. John A.Duffie: *Solar Engineering of Thermal processes*. Jhon Wiley & Sons 3rd Edition
5. Antonio L.Luque – Viacheslav M.Andrew: *Concentrator Photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2007)
6. Antonio L.Luque – Steven Hegedus: *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons (2003)
7. www.eere.energy.gov, U.S Department of Energy, Energy efficiency and renewable
8. energy (EERE)
9. www.emcore.com
10. www.newport.com
11. www.keithley.com *Photovoltaic Measurements: Testing the Electrical Properties of Today's Solar Cells* (2009)
12. www.red-ev.co.uk/picaxe/
13. Rick Bitter – Taqi Mohiuddin – Matt Nawrocki: *Labview Advanced Programming Techniques*. CRC Press(2007)
14. Paul Horowitz – Winfield Hill: *The art of Electronics 2nd Edition*. Cambridge University Press
15. Sadao Adachi: *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-V Semiconductors*. Jhon Wiley & Sons (2009)