



Università degli Studi di Padova

---

FACOLTÀ DI SCIENZE MM.FF.NN.  
Corso di Laurea Specialistica in Fisica

# FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE

CONTROLLO PUNTAMENTO

Candidato:

**Andrea Menegolo**

Matricola 565742-SF

Relatore:

**Ch.mo Prof. Sandro Centro**

Correlatore:

**Dott. Piergiorgio Antonini**



# INDICE

1	INTRODUZIONE	1	
1.1	Fabbisogno energetico ed energia solare	1	1
1.2	Effetto fotovoltaico e celle solari	4	
1.3	Fotovoltaico convenzionale (FPV)	13	
1.4	Fotovoltaico a concentrazione (CPV)	14	
1.5	Concentratori	18	
2	APPARATO PER MISURE DI EFFICIENZA	23	
2.1	Celle a multigiunzione	23	
2.2	Sistema di misura	29	
3	APPARATO PER MISURE DI PUNTAMENTO	37	
3.1	Simulazione dei circuiti elettronici	37	
3.2	Componenti elettronici	38	
3.3	Montatura e motori passo-passo	41	
3.4	Orientamento veloce	43	
3.5	Inseguimento fine	48	
3.6	Posizionamento software e manuale	54	
3.7	Il PIC e il multiplexer	56	
3.8	Apparato di misura degli angoli	57	
4	MISURE	61	
4.1	Misure di efficienza	61	
4.2	Misure di puntamento	66	
5	CONCLUSIONI	73	
5.1	Efficienza delle celle	73	
5.2	Sistema di puntamento	74	
5.3	Futuro per il fotovoltaico a concentrazione	76	
A	PROGRAMMA DEL PIC	77	
B	UNA CORREZIONE A POSTERIORI	79	
	BIBLIOGRAFIA	81	





# 1 | INTRODUZIONE

## INDICE

---

1.1	Fabbisogno energetico ed energia solare	1
1.1.1	Il fabbisogno energetico mondiale	1
1.1.2	L'energia solare	3
1.2	Effetto fotovoltaico e celle solari	4
1.2.1	L'effetto fotovoltaico	4
1.2.2	Curva I-V e punto di potenza massima	6
1.2.3	Celle in silicio	8
1.2.4	Celle a tripla giunzione	9
1.3	Fotovoltaico convenzionale (FPV)	13
1.4	Fotovoltaico a concentrazione (CPV)	14
1.4.1	Vantaggi e svantaggi del CPV	16
1.5	Concentratori	18
1.5.1	Non imaging optics	18
1.5.2	Lenti	18
1.5.3	Specchi	20

---

## 1.1 FABBISOGNO ENERGETICO ED ENERGIA SOLARE

### 1.1.1 Il fabbisogno energetico mondiale

La dipendenza dell'umanità da varie forme di energia è andata aumentando nel corso della storia. In particolare dal XVIII secolo in poi la sostituzione della manodopera con macchinari, sia in agricoltura che nell'industria e successivamente in ambito civile e commerciale, ha portato ad una crescita di tipo esponenziale del fabbisogno energetico mondiale.

La determinazione esatta del consumo globale di energia è impossibile visto che non tutti i Paesi forniscono dati affidabili e che non tutti i consumi sono rilevabili. Inoltre l'energia per unità di massa ottenibile dai combustibili fossili non è costante introducendo un'ulteriore fattore di incertezza. Le informazioni fornite da organismi internazionali o le statistiche redatte da compagnie petrolifere forniscono dati leggermente discordanti. Qui ci si è affidati alle statistiche pubblicate dall'U.S. Energy information administration.

Nel grafico in figura 1.1 nella pagina seguente è riportato il consumo globale di energia dal 1980 al 2007 che include il consumo di carburante per i trasporti, combustibili per il riscaldamento oltre che all'energia elettrica. Si può vedere che il fabbisogno è aumentato del 70% circa in questo lasso di tempo con una crescita media annua di  $0.19 \text{ GTEP/y} \simeq 2.2 \text{ PWh/y}$  (si veda la tabella 1.1 per la conversione tra tonnellate equivalenti di petrolio e altre unità di misura di energia).

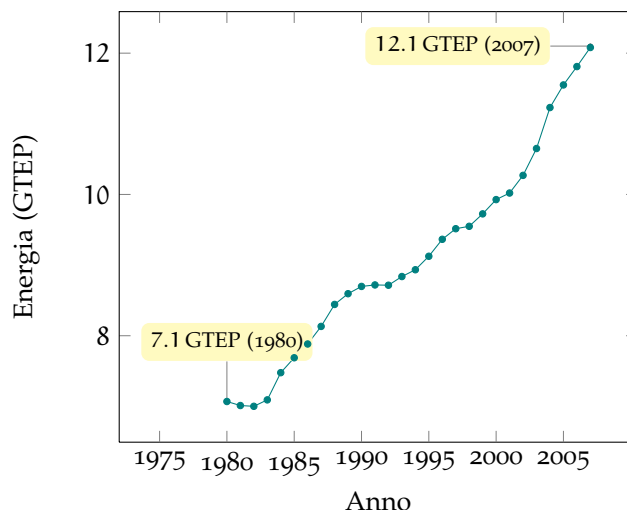


Figura 1.1: Consumo mondiale di energia dal 1980 al 2007 espresso in miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio (1 GTEP  $\approx 4.2 \times 10^{19}$  J) [20].

TEP	Wh	J
1	$1.16 \cdot 10^7$	$4.19 \cdot 10^{10}$
$8.6 \cdot 10^{-8}$	1	3600
$2.39 \cdot 10^{-11}$	$2.78 \cdot 10^{-4}$	1

Tabella 1.1: Conversione tra diverse unità di misura di energia: tonnellata equivalente di petrolio (adeguata per i consumi su scala mondiale), wattora e joule.

Il consumo nel 2007 è stato di 12.1 GTEP a cui corrisponde una potenza media di 16 TW.

Le fonti di energia di gran lunga più importanti sia nel 1980 che oggi sono quelle fossili: petrolio, carbone e gas naturale che nel 2007 contribuiscono per il 36.2%, 27.6% e 23.2% rispettivamente alla produzione di energia e complessivamente per l'87%. Seguono l'idroelettrico con il 6.2%, che è l'unica fonte rinnovabile a dare un contributo significativo al bilancio complessivo, ed il nucleare con il 5.7%. Le altre fonti rinnovabili contribuiscono in modo molto minore all'approvvigionamento energetico con l'1.11% derivante da combustione dei rifiuti (0.51%), eolico (0.34%), geotermico (0.25%) e solare sommato all'energia derivante dallo sfruttamento del moto ondoso e delle maree (0.01%).

*Energia e progresso*

Il progresso tecnologico dello scorso secolo, che per ora si vede proseguire nel secolo attuale, è indubbiamente dovuto in parte alla disponibilità energetica pro capite, ad un costo relativamente basso, assicurata dai combustibili fossili. Si pensi che con la produzione attuale ogni essere umano ha a disposizione in media l'energia equivalente al lavoro di 40 persone (nella realtà gli squilibri tra diverse aree del globo è forte e una media non rende giustizia di questo).

*Fonti fossili e inquinamento*

La concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera è aumentata da 280 ppm del 1750 a 380 ppm del 2006; studi con carotaggi dei ghiacci

Grandezza	Simbolo	Valore
Raggio solare	$R_{\odot}$	$6.95 \times 10^8$ m
Luminosità solare	$L_{\odot}$	$3.86 \times 10^{26}$ W
Temperatura alla superficie	$T_{\odot}$	5780 K
Distanza dalla terra	$r_T$	$1.5 \times 10^{11}$ m

Tabella 1.2: Principali caratteristiche del sole che influenzano l'irraggiamento sulla terra.

ci dei poli mostrano inoltre che per molti millenni nel passato non si sono mai presentate concentrazioni simili a quelle attuali. Il dibattito sulle cause della crescita esponenziale della concentrazione di  $\text{CO}_2$  è acceso. Sicuramente una parte della responsabilità è da attribuire alla combustione del petrolio e suoi derivati oltre che del carbone e del gas naturale.

Di sicuro i combustibili fossili non saranno la fonte d'energia principale nel futuro. Non solo per le problematiche ambientali, dato che gli interessi economici per ora sembrano prevalere, ma per l'esaurimento delle riserve: già oggi la scoperta di nuovi giacimenti petroliferi copre ogni anno solo un quarto del petrolio consumato.

Tra le possibili fonti alternative ci sono quelle rinnovabili che hanno appunto il vantaggio di non esaurirsi oltre a quello di ridurre sensibilmente i prodotti di scarto e le emissioni di  $\text{CO}_2$ .

*Perché le energie rinnovabili*

### 1.1.2 L'energia solare

Una delle possibili fonti alternative, nonché la più abbondante, è l'energia solare.

Il sole è una stella di medie dimensioni, gravitazionalmente in equilibrio e che si trova a metà della sua vita. Le caratteristiche che influenzano l'irraggiamento sulla superficie terrestre sono elencate in tabella 1.2. Essenzialmente il sole si comporta come un corpo nero alla temperatura di 5780 K con la presenza di alcune linee di assorbimento in corrispondenza degli elementi che compongono la corona solare.

Dalla distanza media dalla terra  $r_T$  e dalla luminosità  $L_{\odot}$  si può calcolare la potenza media che colpisce il nostro pianeta: considerando il raggio medio della terra  $R_T = 6.37 \times 10^6$  m si trova

$$P_T = L_{\odot} \frac{\pi R_T^2}{4\pi r_T^2} = \frac{L_{\odot}}{4} \left( \frac{R_T}{r_T} \right)^2 = 175 \text{ PW.}$$

che è la potenza che giunge fuori dall'atmosfera.

Prima di arrivare al suolo la luce deve attraversare uno strato d'aria più o meno spesso che solitamente viene quantificato in termini di "massa d'aria" (o AM dall'inglese *air mass*). Con AM0 si indica lo spettro al di fuori dell'atmosfera, con AM1 quello al suolo con il sole ad un'altezza di  $90^\circ$  ovvero allo zenit (quindi la luce attraversa uno spessore corrispondente ad una atmosfera). Per la caratterizzazione delle celle solari si considera solitamente una massa d'aria di 1.5 che corrisponde ad un'altezza del sole di circa  $48^\circ$ .

*La massa d'aria AM*

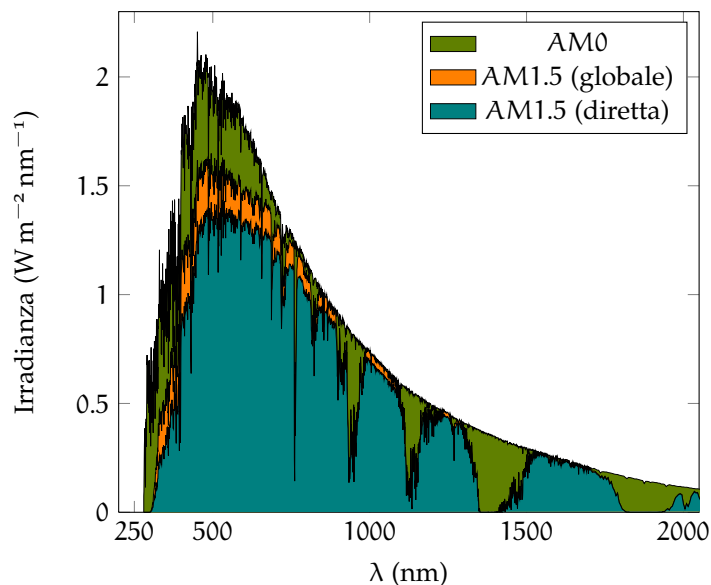


Figura 1.2: Spettro solare per coefficienti di massa d'aria AM0 (fuori dall'atmosfera), AM1.5 (al suolo con zenit del sole di 48°) sia per luce globale che per la sola luce diretta.

Gli spettri per masse d'aria AM0 e AM1.5 sono rappresentati nel grafico in figura 1.2 dove per il fattore 1.5 viene anche riportato lo spettro per la sola luce diretta: l'unica componente che può venir utilizzata in un sistema fotovoltaico a concentrazione.

*I costi attuali*

Lo sfruttamento diretto dei 175 PW che giungono sulla terra non è semplice. Con le tecnologie attuali (celle in silicio con efficienze del 15% e prezzo di 180 \$/m<sup>2</sup>) il solo costo in materiale semiconduttore per produrre una potenza media di 16 TW, cioè il fabbisogno mondiale odierno, corrisponde a circa i 2/3 del prodotto interno lordo globale di un anno. Per convertire tutte le centrali elettriche, che producono il 15% dell'energia che si consuma, questo costo si riduce a un decimo del PIL globale. Naturalmente a questi vanno aggiunti i costi degli impianti, eventuali inseguitori e strutture di supporto.

La sfida per il fotovoltaico, insieme alle altre fonti rinnovabili, è quella di diventare economicamente competitivo rispetto ai combustibili fossili in modo da sostituirli in un futuro più o meno prossimo.

## 1.2 EFFETTO FOTOVOLTAICO E CELLE SOLARI

### 1.2.1 L'effetto fotovoltaico

L'effetto fotovoltaico, schematizzato in figura 1.3, si verifica quando la giunzione  $p-n$  di un semiconduttore viene colpita da fotoni con energia  $h\nu$  sufficiente a formare una coppia elettrone-lacuna. Queste cariche in eccesso vengono accelerate dal campo elettrico  $\mathcal{E}$  della giunzione, l'elettrone verso la regione  $n$  e la lacuna verso quella  $p$ . L'allontana-

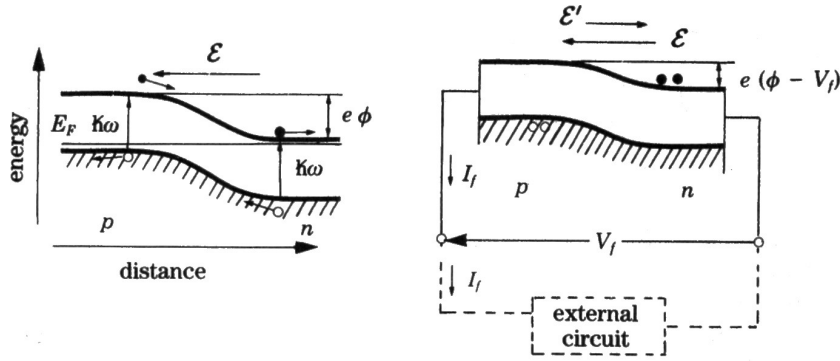


Figura 1.3: Schematizzazione del comportamento della coppia elettrone-lacuna che si forma per effetto fotovoltaico [17].

mento delle due cariche porta alla formazione del campo elettrico  $\mathcal{E}'$  che si oppone all'azione del campo  $\mathcal{E}$ .

Come risultato si ha che ai terminali del semiconduttore si riduce la differenza di potenziale di una quantità  $V_f$  e compare una corrente  $I_f = 2\eta eP$  uscente dalla regione  $p$  ed entrante in quella  $n$  con  $\eta$  efficienza quantica del semiconduttore e  $P$  flusso della radiazione incidente. Ignorando la presenza di resistenze parassite in serie e parallelo, di cui si terrà conto più avanti, si trova

$$I = I_f - I_d = I_f - I_0 \left( \exp\left(\frac{eV_f}{kT}\right) - 1 \right)$$

da cui

$$V_f = \frac{kT}{e} \log\left(\frac{I_0 + I_f - I}{I_0}\right)$$

dove la corrente  $I_0$  è quella di ricombinazione, propria delle giunzioni  $p$ - $n$ .

L'energia minima  $h\nu = hc/\lambda$  che un fotone deve avere per produrre una coppia elettrone-lacuna equivale all'energia di interbanda  $e\phi \simeq E_{bg}$ . Il limite superiore per la lunghezza d'onda è quindi dato da

$$\lambda = \frac{ch}{E_{bg}(eV)e} = \frac{1243 \text{ nm}}{E_{bg}(eV)} \quad (1.1)$$

L'efficienza è massima per energia  $h\nu \gtrsim E_{bg}$  ma diminuisce per  $h\nu \gg E_{bg}$  in quanto l'energia  $\Delta E = h\nu - E_{bg}$  viene ceduta agli elettroni come energia cinetica che viene a sua volta ceduta al reticolo cristallino eccitando stati vibrazionali dello stesso e quindi provocando il riscaldamento del semiconduttore [17].

Il circuito equivalente di una cella solare è riportato in figura 1.4 dove sono riportate le resistenze serie e parallelo. La resistenza in parallelo  $R_p$  deriva dal fatto che non tutti i portatori giungono ai contatti, ma una parte di essi viene persa causando una riduzione della corrente in uscita di una quantità  $I_p = V_f/R_p$ . La resistenza in serie  $R_s$  deriva dal fatto che i portatori di carica, prima di venire raccolti in corrispondenza delle metallizzazioni, attraversano una parte del semiconduttore con la conseguente caduta di potenziale  $V_f - V = IR_s$ .

*Circuito equivalente*

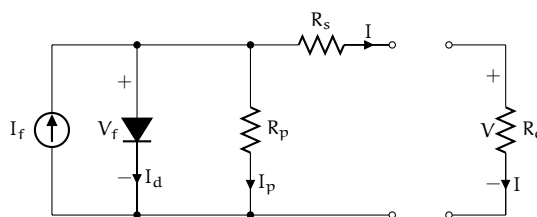


Figura 1.4: Circuito equivalente di una cella solare.

Si possono allora calcolare la tensione ai capi del carico  $R_c$  e la corrente che lo attraversa:

$$V = V_f - IR_s$$

$$I = I_f - I_d - I_p = I_f - I_0 \left( \exp \frac{eV_f}{kT} - 1 \right) - \frac{V_f}{R_p}$$

La determinazione dei parametri quali  $V_f$ ,  $I_f$  e le resistenze serie e parallelo è abbastanza laboriosa e si rimanda alla bibliografia per una trattazione completa (si veda [4]).

### Materiali

Tra i materiali impiegati per la realizzazione di celle solari vi sono: rame seleniuro ( $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ), cadmio tellurio ( $\text{CdTe}$ ), silicio, germanio, indio gallio arseniuro ( $\text{InGaAs}$ ) e indio gallio fosforo ( $\text{InGaP}$ ).

Alcuni di questi materiali vengono utilizzati per la produzione di celle a singola giunzione (come il Si), mentre altri vengono combinati ottenendo così celle a multigiunzione sensibili ad uno spettro di frequenze più ampio.

Per ora nella produzione su larga scala di moduli fotovoltaici ad uso terrestre si impiega esclusivamente il silicio per via del miglior rapporto efficienza/costo rispetto alle altre soluzioni.

Le celle a multigiunzione sono invece impiegate in quei settori dove l'incremento dei costi è giustificato dalla necessità di disporre di un prodotto ad alta efficienza: è il caso dei satelliti e di impieghi militari.

Alcuni materiali come il  $\text{CdTe}$  e il  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  sono in fase di studio per la realizzazione di celle solari a film sottile e flessibile.

Si può infine menzionare la presenza di studi per realizzare celle organiche (polimeri) e celle fotoelettrochimiche. In entrambi i casi le efficienze sono piuttosto basse e non sembra siano possibili sbocchi interessanti se non la copertura di vaste aree (muri e tetti) a basso costo [14].

#### 1.2.2 Curva I-V e punto di potenza massima

È interessa studiare l'andamento di corrente e potenza rispetto alla tensione ai capi della cella per capire quale sia la configurazione che permette di sfruttare il potenziale dei dispositivi a propria disposizione.

Nel grafico in figura 1.5 è riportata una delle misure fatte con le celle a disposizione. La dipendenza della corrente dalla tensione si indica

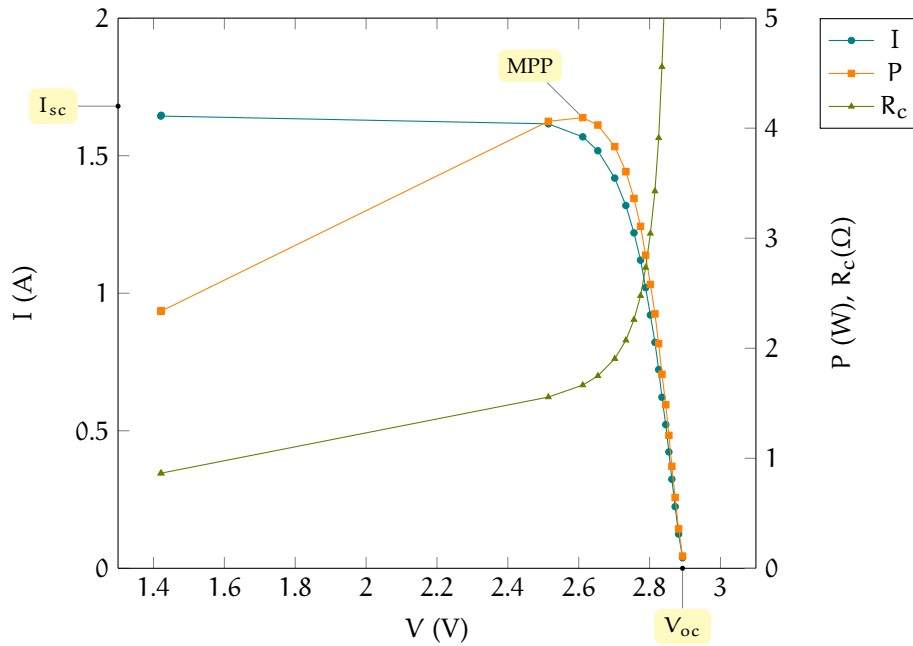


Figura 1.5: Comportamento di una cella al variare della tensione: curva I-V, potenza P e resistenza di carico  $R_c$  applicata ai terminali. Sono indicati il punto di massimo, la corrente di corto circuito e la tensione a circuito aperto.

solitamente con “curva I-V”. Si può notare che la massima potenza prodotta dalla cella si ottiene in un punto ben preciso chiamato punto di potenza massima o MPP (*maximum power point*) a cui corrisponde una potenza  $P_{\max}$ .

La caratterizzazione di una cella solare si basa su parametri quali:

**CORRENTE DI CORTO CIRCUITO** indicata con  $I_{sc}$  ed è la corrente attraversata da un carico  $R_c = 0 \Omega$ ;

**TENSIONE A CIRCUITO APERTO** ovvero la tensione che si misura ai capi della cella quando la resistenza di carico è infinita; si indicata con  $V_{oc}$ ;

**FATTORE DI FORMA** è definito come

$$F = \frac{P_{\max}}{I_{sc} V_{oc}}$$

ed è espresso solitamente in percentuale. È utile per stimare la potenza massima ottenibile da una cella partendo dai valori  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  misurabili velocemente con un tester;

**PUNTO DI MASSIMO** e in particolare la corrente  $I_{mp}$  e la tensione  $V_{mp}$  in corrispondenza del MPP.

Questi parametri variano con la temperatura o la potenza di irraggiamento e vengono solitamente espressi per  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $P = 1 \text{ kW m}^{-2}$ .

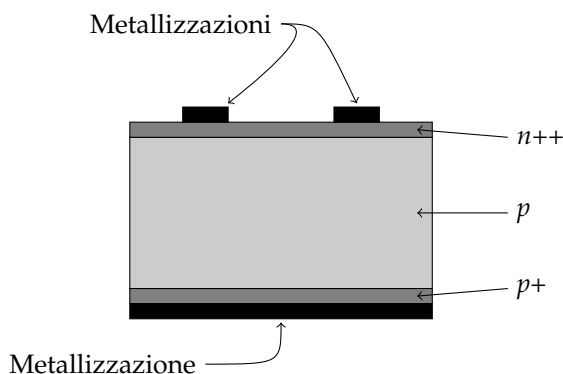


Figura 1.6: Sezione di una cella in silicio.

### 1.2.3 Celle in silicio

Quelle in silicio monocristallino sono le prime celle ad essere state usate in maniera intensiva: inizialmente nei satelliti negli anni settanta e poi per uso terrestre negli anni ottanta.

La giunzione  $p-n$  del silicio è caratterizzata da un bandgap di 1.1 eV e quindi la produzione di una coppia elettrone-lacuna richiede un fotone con lunghezza d'onda massima  $\lambda_{\text{Si}} = 1130 \text{ nm}$  che si trova nel vicino infrarosso. La luce assorbita da queste celle è nell'intervallo (350–1100) nm ma l'efficienza di conversione dell'energia solare in corrente elettrica si riduce progressivamente passando dall'infrarosso al visibile.

#### Scelta del substrato

Da circa trent'anni la realizzazione delle celle in silicio si basa su un substrato di tipo  $p$  drogato con atomi di boro. Storicamente venne adottato questo materiale per le celle con cui venivano equipaggiati i satelliti perché risulta più resistente alle radiazioni rispetto ad altre soluzioni. Il settore spaziale era all'epoca l'unico mercato per le celle solari e quindi tutte le industrie del settore adottarono il substrato di tipo  $p$  drogato con boro. Essendo l'unica tecnologia disponibile a livello industriale, questo tipo di substrato venne adottato anche per le prime soluzioni di celle terrestri.

Oltre alla resistenza alle radiazioni il substrato  $p$  drogato con boro è da preferire per una maggiore facilità nella realizzazione dei contatti metallici rispetto a substrati di tipo  $n$ . Per la metallizzazione viene largamente usato l'alluminio che permette la crescita epitassiale sul cristallo.

Uno dei problemi del substrato  $p$  di boro è dato dalla formazione di difetti metastabili che riducono l'efficienza delle celle. La riduzione della concentrazione del drogante limita la formazione di tali difetti. Più di recente si sono concentrati gli sforzi nella realizzazione di substrati di gallio e fosforo che non presentano tale problematica.

#### Oltre al silicio monocristallino

Celle più economiche di quelle in silicio monocristallino si possono ottenere impiegando processi produttivi meno costosi. Tra gli altri si possono mettere in evidenza i seguenti materiali:

**SILICIO POLICRISTALLINO** costituito da un insieme di cristalli di silicio, è meno efficiente e resistente nel tempo rispetto a quello



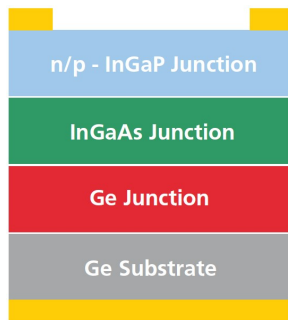


Figura 1.7: Schema della a tripla giunzione prodotta da EMCORE [6].

monocristallino;

**SILICIO AMORFO** ottenuto vaporizzando il silicio che viene così depositato sulla superficie desiderata. È caratterizzato da un'energy gap di 1.7 eV e quindi non è sensibile alla luce infrarossa, ma è più efficiente nel visibile. L'efficienza complessiva è comunque minore di quella del silicio monocristallino.

#### 1.2.4 Celle a tripla giunzione

Le celle impiegate in questo progetto sono di tipo a tripla giunzione e prodotte da Emcore, una delle aziende che realizzano celle a multigiunzione usate in ambito spaziale ed ora anche per la sperimentazione di soluzioni a concentrazione.

##### Struttura della cella

In figura 1.7 è schematizzata la cella utilizzata in questo progetto: è evidente la strutturazione in tre giunzioni ognuna delle quali presenta una diversa composizione. Le percentuali relative di indio e gallio nelle due giunzioni superiori assicurano il matching dei reticoli con il cristallo di germanio.

Ogni giunzione è caratterizzata da una diversa energia di interbanda e quindi risulta sensibile a un particolare intervallo di lunghezze d'onda della luce.

Partendo dal basso si trova la giunzione in germanio caratterizzata da un bandgap di 0.67 eV a cui corrisponde una lunghezza d'onda massima della luce  $\lambda_{Ge} = 1855$  nm, propria del lontano infrarosso [18].

La giunzione intermedia è del tipo  $Ga_{0.99}In_{0.01}As$  (i pedici indicano l'abbondanza relativa di indio e gallio) ed è caratterizzata da  $E_{bg} = 1.4$  eV da cui segue  $\lambda_{InGaAs} = 888$  nm, lunghezza d'onda nell'infrarosso, ma più vicina al visibile [13].

La terza è composta di  $Ga_{0.5}In_{0.5}P$  con un'energia di interbanda di 1.9 eV da cui si calcola  $\lambda_{InGaP} = 654$  nm che rientra nella parte visibile dello spettro [13].

La disposizione delle tre giunzioni non è casuale: quella superiore di InGaP assorbe la luce con lunghezza d'onda tra circa 300 nm e 650 nm e lascia passare la luce a cui sono sensibili le altre due giunzioni. La giunzione di InGaAs assorbe la luce con  $\lambda$  tra 600 nm e 890 nm e lascia

*Germanio*

*InGaAs*

*InGaP*

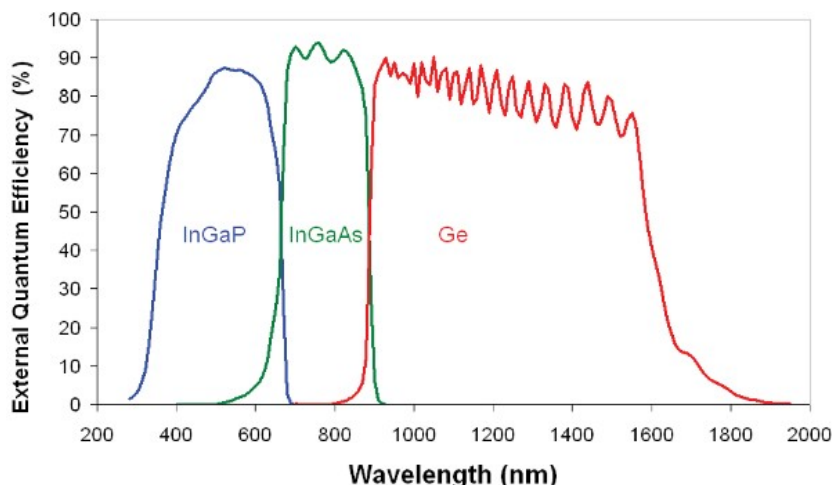


Figura 1.8: Efficienza quantica delle celle a tripla giunzione [6].

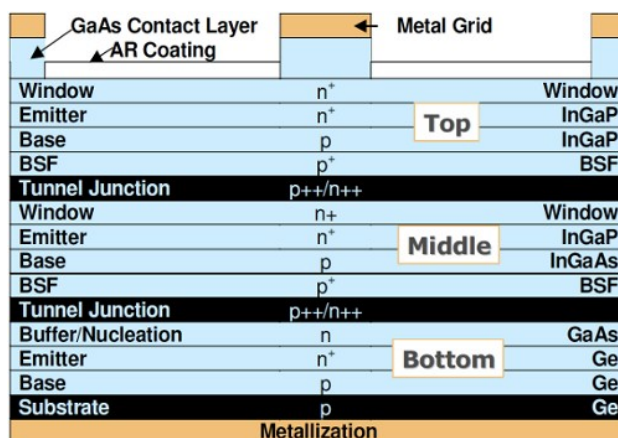


Figura 1.9: Cella a tripla giunzione metamorfica: si può vedere il buffer di raccordo tra il reticolo di germanio e quello di InGaAs [7].

passare quella con lunghezza d'onda nell'intervallo (850–1800) nm assorbita dalla giunzione in germanio. Il comportamento è simile a quello che si verifica con le onde sonore: quelle con frequenza più alta vengono assorbite entro un raggio più piccolo di quelle a bassa frequenza, tant'è che a grandi distanze si sentono esclusivamente i bassi.

In figura 1.8 è rappresentata l'efficienza quantica di ogni giunzione in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente. È evidente l'efficacia di questo tipo di celle nel coprire il più ampio spettro di frequenze possibile.

*Sviluppi futuri: celle a tripla giunzione metamorfiche*

Dagli anni novanta le celle a multigiunzione hanno permesso di ottenere efficienze al di sopra del 30% con dispositivi a due terminali.

La composizione delle due giunzioni superiori è calibrata in modo da assicurare la corrispondenza tra i reticoli delle tre sottocelle e co-

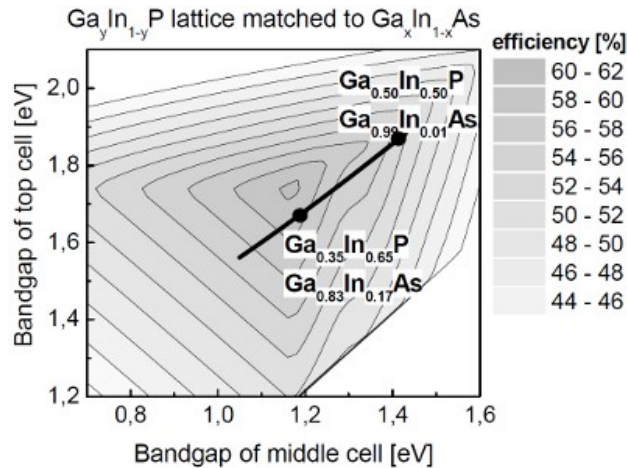


Figura 1.10: Viene rappresentata l'efficienza teorica della cella a tripla giunzione in funzione della composizione delle due giunzioni superiori [2].

me già detto si trova per la prima giunzione  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  e per quella intermedia  $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ .

In queste condizioni la combinazione dei bandgap non è ideale nel senso che non c'è una buona corrispondenza delle correnti prodotte dalle singole giunzioni. La sottocella in germanio genera circa il doppio della corrente rispetto alle altre due. Questa corrente viene persa a causa della connessione in serie delle tre giunzioni; ne consegue una perdita di efficienza della cella nel suo insieme.

Con le celle a tripla giunzione metamorfiche si cerca una soluzione a questo inconveniente. Questa tecnica di produzione consiste nel cercare la composizione delle prime due giunzioni che assicuri un bilanciamento dell'energia assorbita dalle tre sottocelle, con l'equivalenza delle correnti prodotte, a discapito del matching con il reticolo di germanio.

I reticoli vengono raccordati con quello che viene chiamato tampone (in inglese *buffer*) metamorfico che si può vedere appena sopra la giunzione di germanio in figura 1.9: uno strato di materiale che permette la transizione dal reticolo di germanio a quello di  $\text{InGaAs}$ .

Dalla figura 1.10 è chiaro che variando le composizioni delle due giunzioni superiori si riesce ad ottenere un incremento di efficienza. Le condizioni ottimali si ottengono con un bandgap della giunzione superiore di 1.67 eV e per quella intermedia di 1.18 eV. Le sottocelle devono quindi essere composte da  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}$  e  $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}$  rispettivamente.

In questa configurazione il buffer dovrà raccordare il reticolo di germanio che ha passo 5.658 Å con quello del  $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}$  di passo 5.723 Å.

Per una trattazione più approfondita si veda [2].

Una panoramica sui materiali impiegati nel fotovoltaico e i più importanti risultati in termini di efficienza è riportata in figura 1.11 nella pagina successiva dove è raccolto un sunto storico dal 1975 ad oggi.

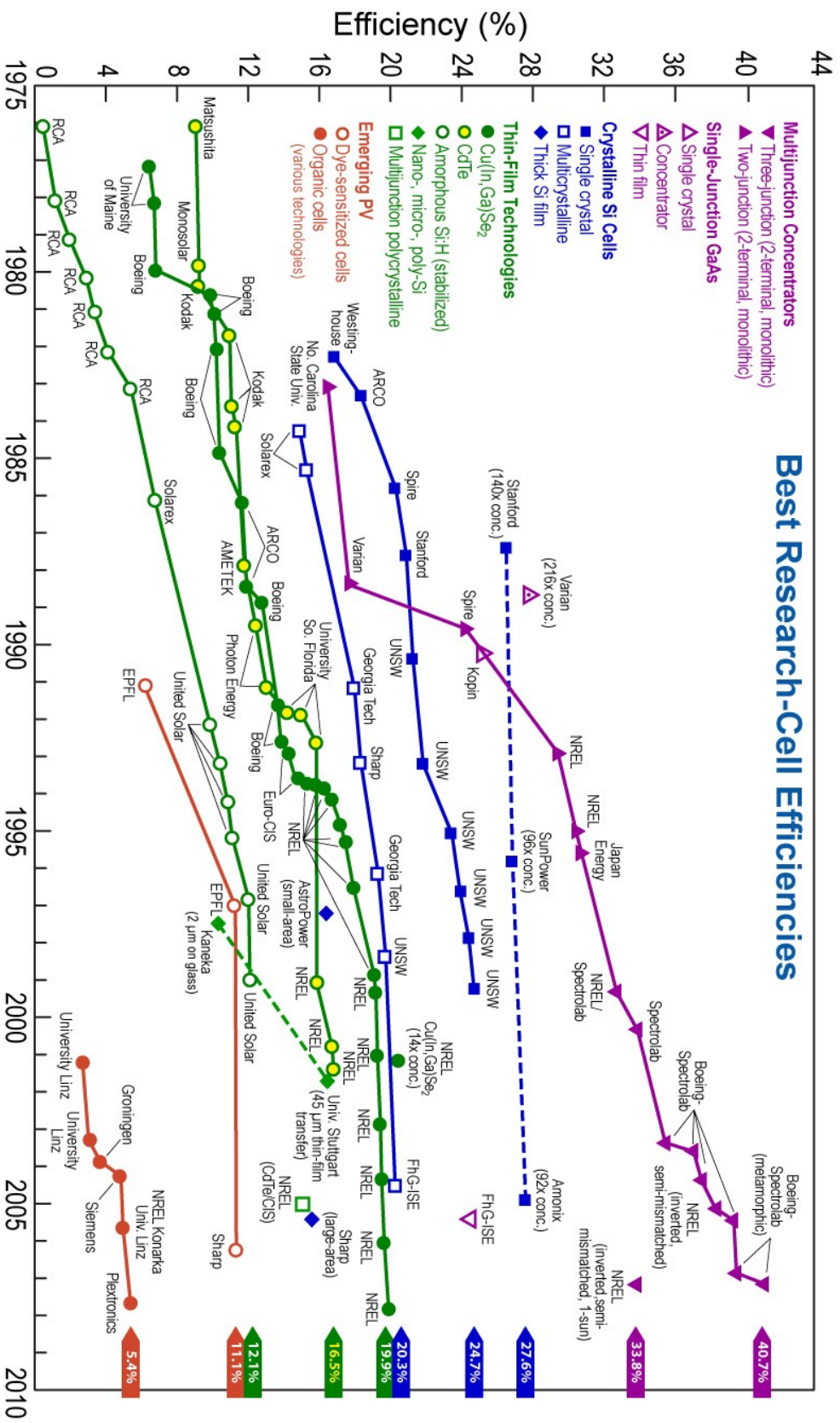


Figura 1.11: È rappresentata una cronologia dell'efficienza ottenuta con varie tecnologie fotovoltaiche. I valori più alti sono registrati per le celle a multigiunzione associate a sistemi di concentrazione [14].

Rev. 11-07-07

### 1.3 FOTVOLTAICO CONVENZIONALE (FPV)

Il fotovoltaico convenzionale (o Flat Photo Voltaic) rappresenta la prima soluzione adottata nella realizzazione di celle solari: un modulo piatto esposto direttamente alla luce solare.

I dispositivi più utilizzati si possono riassumere in:

*Materiali*

**CELLE IN SILICIO** monocristallino, policristallino, amorfo: usato per lo più in ambito commerciale terrestre;

**CELLE A MULTIGIUNZIONE** come le celle InGaP/InGaAs/Ge, ad alto rendimento: utilizzate come accennato prima in ambito spaziale e militare.

#### *Efficienza*

L'efficienza delle celle in silicio è andata via via migliorando. Basti pensare che negli anni cinquanta solo il 2% della potenza solare veniva convertita in corrente elettrica mentre gli attuali moduli commerciali (formati da più celle in serie) sono caratterizzati da efficienze del (10–15)%; alcuni produttori (si veda [19]) dichiarano valori intorno al 19%.

*Celle in silicio*

In condizioni ottimali, riproducibili con relativa semplicità solo nei laboratori con l'utilizzo di singole celle, si registrano efficienze ancora più elevate: 20.4% ottenuto al Fraunhofer Institute for Solar Energy con l'utilizzo di silicio policristallino, 25.0% misurato all'università di New South Wales (Australia) impiegando silicio monocristallino [14].

Con le celle a multigiunzione, sempre per il fotovoltaico di tipo *flat*, si ottengono i primi risultati importanti negli anni novanta con quelle a doppia giunzione in InGaP/InGaAs che raggiungono efficienze del 30.3% (campioni scelti e testati in laboratorio) [8].

*Celle a multigiunzione*

Più di recente si è spostata l'attenzione su celle a tripla giunzione come InGaP/InGaAs/Ge con le quali sono state registrate efficienze leggermente superiori rispetto al caso precedente: 32.0% in condizioni di laboratorio e sempre in assenza di concentratore [9].

#### *Importanza dell'inseguitore*

L'installazione su piccola scala di moduli fotovoltaici di tipo FPV avviene con il fissaggio del modulo su un tetto orientato verso sud. In queste condizioni i raggi solari non colpiscono il modulo in direzione normale alla sua superficie se non per pochi minuti al giorno e solo in determinati periodi dell'anno.

Per dare una stima dell'energia persa per questo fatto, si assuma che in una giornata di 12 h un modulo di area  $A$ , con la normale sempre orientata verso il sole, venga colpito da un'energia  $E$ . Si ipotizzi inoltre che per un modulo fisso, l'angolo  $\theta$  tra la normale della sua superficie e la direzione di incidenza dei raggi solari vari come  $\theta = -\pi/2 + (t/12h)\pi$  con  $t \in [0, 12h]$  ( $t = 0h$  corrisponde all'istante in cui sorge il sole). Allora l'energia che colpisce il modulo fisso è data da

$$E' = E \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta d\theta = \frac{2}{\pi} E$$

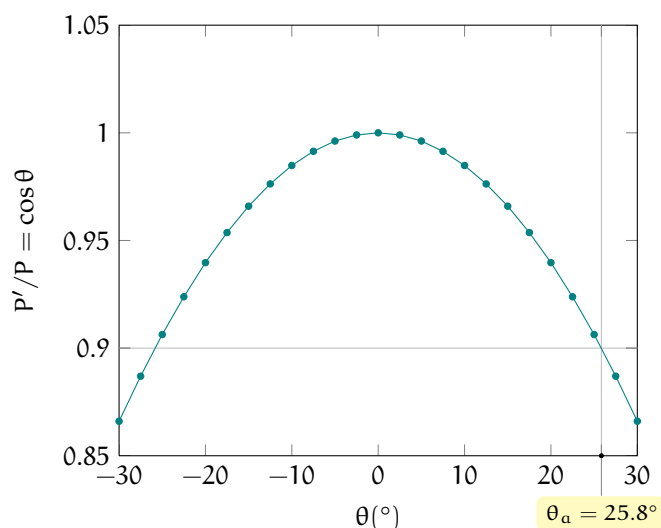


Figura 1.12: Rapporto tra le potenze luminose  $P'$  e  $P$  dove:  $P'$  è quella che colpisce una superficie con angolo  $\theta$  tra la sua normale e la direzione del sole;  $P$  è la potenza su una superficie di ugual area ma con normale in direzione dei raggi solari.

quindi inferiore rispetto a quella ottenibile con un inseguitore.

Quella appena fatta è senz'altro un'approssimazione piuttosto grossolana: non tiene conto di aspetti come il variare della traiettoria del sole durante l'anno, il differente spessore d'aria attraversata dalla luce nelle varie ore della giornata, il fatto che solitamente la durata di un giorno non è di 12 h o la distinzione tra luce diffusa e luce diretta.

È comunque evidente il motivo per il quale le installazioni di medie e grosse dimensioni sono dotate di un sistema di inseguimento: questo permette di massimizzare la potenza luminosa per unità di superficie. Misure accurate forniscono un aumento dell'energia di irraggiamento del 30% l'anno.

*Accettanza angolare*

L'accettanza angolare di un sistema fotovoltaico è definita come l'angolo  $\theta_a$ , tra direzione del sole e normale alla superficie del modulo, per il quale la radiazione incidente si riduce al 90% rispetto al valore massimo. Per un dispositivo FPV quest'angolo è abbastanza grande: dal grafico in figura 1.12 si vede che  $\theta_a = \arccos 0.9 \simeq 26^\circ$ . Quindi i vincoli in termini di precisione angolare per un sistema di puntamento per FPV non sono affatto stretti.

## 1.4 FOTVOLTAICO A CONCENTRAZIONE (CPV)

Per migliorare l'efficienza di un sistema FPV è possibile agire sia sul fronte della ricerca di nuovi materiali, sia sul miglioramento di quelli esistenti per esempio con la produzione di silicio con minor concentrazione di impurezze.

Un approccio che già oggi assicura efficienze maggiori rispetto a quelle riportate prima è quello del fotovoltaico a concentrazione (CPV).

*Il concentratore*

Un concentratore è un sistema ottico, composto da lenti o specchi o una combinazione dei due, che permette di concentrare la luce del sole sulla cella fotovoltaica.

Il fattore di concentrazione viene solitamente espresso in “soli” anche se in realtà questa è una unità di misura di potenza: si assume che la luce diretta proveniente dal sole, nelle migliori condizioni atmosferiche possibili e per una superficie normale alla direzione dei raggi incidenti, sia caratterizzata da una potenza per unità di superficie di 1 sole  $\equiv 0.85 \text{ kW m}^{-2}$  [14].

Così una concentrazione di 100 soli corrisponde ad una potenza per unità di superficie 100 volte superiore a quella solare nelle condizioni di irraggiamento descritte sopra e cioè a  $85 \text{ kW m}^{-2}$ .

Sistemi di concentrazione e problematiche legate ai componenti ottici verranno trattati successivamente (vedi il paragrafo 1.5).

*Materiali*

L'uso di un concentratore permette di sostituire il semiconduttore esposto direttamente al sole con specchio o lente potenzialmente più economici, per unità di superficie, rispetto al semiconduttore. Per questo motivo l'uso di materiali fotovoltaici più costosi, in quantità molto minori perché sostituiti da lenti o specchi, non è da escludere in un'ottica di produzione su larga scala. Si trovano quindi:

**CELLE IN SILICIO** monocristallino o policristallino;

**CELLE A MULTIGIUNZIONE** a doppia e tripla giunzione come quelle viste in precedenza ed utilizzate in questo progetto.

*Efficienza*

I vantaggi dati da questo approccio non si limitano alla riduzione dei costi ma si estendono sul fronte dell'efficienza. Per celle in silicio si passa dal 25.0% registrato per il fotovoltaico di tipo FPV al 27.6% con una concentrazione di 92 soli ottenuto dal Fraunhofer Institute nell'ottobre 2004.

*Celle in silicio*

Le celle a multigiunzione beneficiano di incrementi in efficienza ben superiori, soprattutto per quanto riguarda quelle a tripla giunzione (vedi il grafico in figura grafico in figura 1.13 a pagina 16).

*Celle a multigiunzione*

Per celle di InGaP/InGaAs/Ge si passa dal 32%, ottenibile con fotovoltaico FPV, al 40.7% misurato dal National Renewable Energy Laboratory nel novembre 2006 con una concentrazione di 240 soli. Il valore più alto in assoluto si trova invece per celle di tipo InGaP/InGaAs/Ge metamorfiche esposte ad una intensità luminosa di 454 soli con un'efficienza del 41.1% misurata al Fraunhofer Institute nel gennaio 2009 [9, 10].

*L'inseguitore nel CPV*

In un impianto CPV il concentratore permette di convogliare raggi di luce pressoché paralleli sulla cella. L'asse ottico deve quindi essere allineato con la sorgente luminosa affinché il sistema fornisca energia. Per

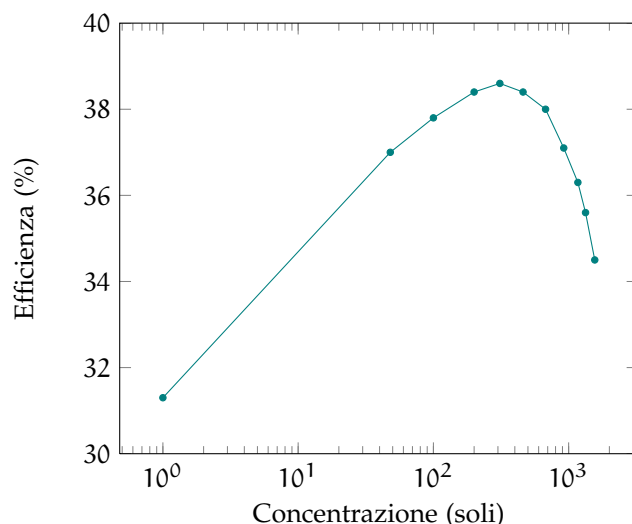


Figura 1.13: Dipendenza dell'efficienza dalla concentrazione per le celle a tripla giunzione a nostra disposizione. Dati del Fraunhofer ISE.

questo motivo, a differenza dell'approccio fotovoltaico tradizionale, non si può rinunciare all'inseguitore.

L'accettanza angolare di un sistema a concentrazione è tanto più piccola quanto più alto è il rapporto tra la superficie dell'ottica che raccoglie la luce e quella del ricevitore. Il massimo di efficienza per celle in silicio si ha per concentrazioni di circa 100 soli mentre per le celle a tripla giunzione, che andremo a studiare, il massimo è intorno a 400 soli. Come si vedrà più avanti l'accettanza angolare per un sistema ottico ottimale dipende dal fattore di concentrazione nel modo seguente:

$$\theta(C) = \arcsin \sqrt{\frac{1}{C}}$$

Per 100 soli e 400 soli si trova rispettivamente  $\theta(100) = 5.7^\circ$  e  $\theta(400) = 2.9^\circ$ .

La precisione richiesta per il sistema di inseguimento si può far corrispondere all'angolo  $\theta(C)$ . Come si vede i vincoli per il solare a concentrazione sono molto più stringenti rispetto a quelli per il fotovoltaico tradizionale: per quest'ultimo si era trovata una tolleranza angolare del puntamento di circa un'ordine di grandezza maggiore.

La tolleranza angolare viene ulteriormente ridotta se il sistema ottico non è ottimale e quindi se  $\theta_a < \theta(C)$  con  $\theta_a$  accettanza del sistema ottico reale.

#### 1.4.1 Vantaggi e svantaggi del CPV

Il fotovoltaico a concentrazione risulta allettante sotto vari punti di vista rispetto all'approccio classico; introduce altresì vari tipi di svantaggi e problematiche di cui è necessario tenere conto.



*Vantaggi*

Analizziamo innanzitutto i vantaggi di questa nuova tecnologia partendo dalla riduzione dei costi legati al semiconduttore per la produzione della cella. Il concentrare la luce sulla cella permette di ridurre le dimensioni di quest'ultima di un fattore pari a quello di concentrazione. Questo consente di impiegare materiali più costosi andando ad incidere in modo contenuto sul costo finale del prodotto.

*Riduzione dei costi*

Il prezzo del silicio cristallino è di circa  $180 \text{ \$/m}^2$  mentre quello delle celle a tripla giunzione, utilizzate per questo prototipo, di  $60\,000 \text{ \$/m}^2$ . Il costo del silicio usato per un modulo FPV eguaglia il costo delle celle a tripla giunzione usato in un sistema a concentrazione se  $C = 60000/180 = 333$ . Da qui il motivo per cui l'obiettivo di questo prototipo è raggiungere fattori di concentrazione intorno a  $C = 500$ : questo permette di contenere il costo per le celle a tripla giunzione. Il risparmio in termini di semiconduttore per fattori di concentrazione superiori sarebbe reso vano da un aggravio dei costi per ottiche migliori e processi di produzione dei moduli e delle celle più precisi.

Un altro vantaggio già evidenziato in precedenza è la maggiore efficienza delle celle all'aumentare dell'intensità luminosa.

*Maggiore efficienza**Svantaggi e problematiche*

Come già detto un sistema fotovoltaico a concentrazione necessita di un sistema di puntamento molto più preciso (circa  $0.1^\circ$  per questo progetto,  $1^\circ$  per celle in silicio e  $C \simeq 100$ ) rispetto a quello richiesto dal fotovoltaico tradizionale andando così ad incidere sui costi finali di produzione.

*Puntamento preciso*

Il concentratore è costituito da componenti ottici che inevitabilmente assorbono una parte della radiazione. Non è immaginabile l'impiego di lenti o specchi particolarmente costosi altrimenti verrebbe meno il vantaggio economico nell'aver ridotto le dimensioni dei semiconduttori. Si stima un assorbimento del 10% per ogni riflessione da parte di specchi o trasmissione attraverso lenti.

*Assorbimento dell'ottica*

Il concentrare luce sulla cella pone il problema della dissipazione del calore sia per non danneggiare la cella, sia per evitare la caduta in efficienza della stessa. Si stima una perdita di efficienza dell'ordine di  $(0.05-1) \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  per le celle a tripla giunzione e tre volte più grande per quelle in silicio [16, 6].

*Dissipazione del calore*

Nell'approccio tradizionale il modulo fotovoltaico è colpito sia da luce diretta che da quella diffusa mentre un concentratore raccoglie esclusivamente quella diretta che rappresenta l'80% circa del totale. Un 20% della potenza solare viene quindi persa e di questo bisogna tenere conto nel confronto tra l'efficienza di un modulo *flat* con uno a concentrazione.

*Luce diretta e diffusa*

## 1.5 CONCENTRATORI

### 1.5.1 Non imaging optics

Con non-imaging ci si riferisce a quei sistemi di focalizzazione che non conservano le informazioni sull'immagine raccolta dall'ottica. Un concentratore per fotovoltaico ha la sola funzione di focalizzare la luce solare sulla cella, ma non di creare l'immagine del sole su di essa. Questo fa sì che i vincoli sull'accettanza angolare siano meno stringenti rispetto ai sistemi di focalizzazione d'immagine.

#### *Stima dell'accettanza angolare*

L'area su cui viene concentrata la luce non è puntiforme. Quindi i raggi che colpiscono il concentratore non devono essere necessariamente paralleli all'asse ottico dell'apparato. L'angolo tra l'asse del concentratore e la luce incidente non deve superare un angolo limite  $\theta(C)$ . La relazione tra tale angolo e il fattore di concentrazione si può trovare da un'analisi prettamente geometrica:

$$\theta(C) = \arcsin \sqrt{\frac{1}{C}} \quad (1.2)$$

con evidente significato dei simboli [3].

In questo progetto l'obiettivo in termini di concentrazione è di  $C = 500$  per cui si trova  $\theta(500) = 2.56^\circ$  come valore teorico per un sistema ottico ottimale. Con la riduzione al minimo del numero di ottiche il valore di dell'accettanza reale si riduce rispetto a quella teorica e nel nostro caso risulta dell'ordine del decimo di grado.

*Limite teorico*

Considerando il sole come una sorgente infinitamente lontana che sottende un semiangolo  $\theta_\odot = 0.25^\circ$  si può ricavare una concentrazione massima teorica di

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \theta_\odot} \simeq 5.3 \times 10^4;$$

che è circa due ordini di grandezza superiore al valore utilizzato nel progetto. Di conseguenza in questo lavoro si possono considerare trascurabili dal punto di vista termodinamico le correzioni legate alle dimensioni angolari del sole. Tali dimensioni risultano comunque importanti per la progettazione del sistema ottico in quanto si ripercuotono su come e in che posizione i raggi solari vengono focalizzati dal concentratore.

### 1.5.2 Lenti

L'ottica di un concentratore può includere una o più lenti. Nell'utilizzo di lenti in un concentratore bisogna tenere conto di alcune tra le caratteristiche di questi componenti:

**ABERRAZIONE CROMATICA** specialmente per lunghezze focali lunghe, può rendere difficoltoso il concentrare tutta la luce all'interno della superficie del semiconduttore. Idealmente l'area della cella dev'essere illuminata uniformemente. In presenza di aberrazione

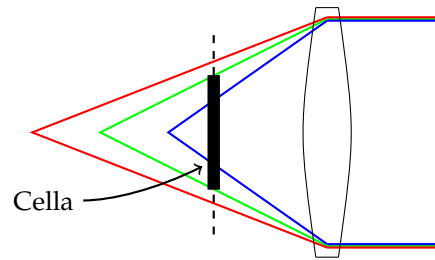


Figura 1.14: Effetto dell'aberrazione cromatica sull'illuminazione di una cella solare.

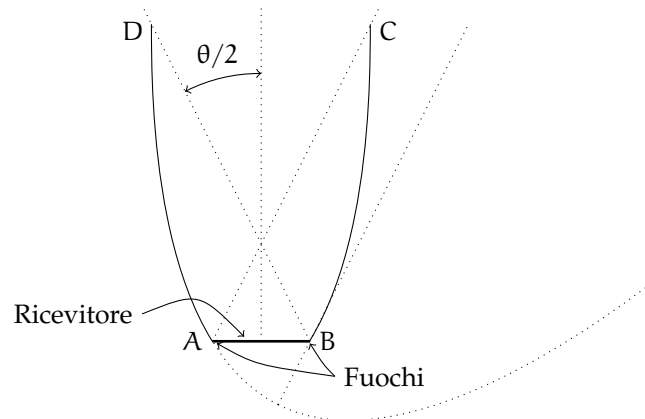


Figura 1.15: Schema di un concentratore parabolico composto. È formato da due parabole con fuochi collocati alle estremità del ricevitore. È indicato il semiangolo di accettazione  $\theta/2$ .

cromatica, se la focalizzazione è corretta per la luce verde, parte della luce rossa uscirà dal contorno della cella mentre la luce blu ne coprirà solo una sua porzione (vedi figura 1.14). L'effetto è una riduzione dell'efficienza della cella.

**ASSORBIMENTO** di parte della radiazione. Generalmente si considera che il 90% della luce venga trasmessa e il restante 10% venga riflessa. Questo fatto impone di ridurre al minimo il numero di componenti ottici visto che la potenza che giunge sulla cella viene moltiplicata per un fattore  $0.9^n$  con  $n$  lenti impiegate rispetto alla potenza che incide sull'ottica primaria.

**INGIALLIMENTO** della lente a causa del deterioramento col passare del tempo. Questo provoca una riduzione del coefficiente di trasmissione col passare del tempo.

In questo progetto non si è fatto uso di lenti per queste problematiche e per l'assenza di buone ottiche a costi vantaggiosi.

*Il concentratore parabolico composto*

Un classico esempio di concentratore non-imaging in cristallo è dato da quello parabolico composto (in inglese *compound parabolic concentrator* o CPC) schematizzato in figura 1.15 nella pagina precedente. Come si vede esso è composto di due parabole con assi inclinati rispetto alla normale alla superficie del ricevitore. I fuochi delle parabole sono posizionati sui punti A e B cioè ai bordi del ricevitore. Ogni parabola si estende in altezza fino a che la tangente non risulti verticale. L'asse di ognuna è parallelo al segmento che collega fuoco ed estremità dell'altra parabola (i segmenti AC e BD). La luce che entra nel concentratore si riflette sulle superfici per riflessione totale interna (lo stesso principio di funzionamento delle fibre ottiche).

Si può ridurre la dimensione dell'oggetto troncando le parabole con una piccola diminuzione del fattore di concentrazione o dell'angolo di accettazione. Per esempio un concentratore parabolico con fattore di concentrazione  $C_{\text{full}} = 11.4$  e angolo di accettazione  $5^\circ$  può venir sostituito con uno di metà altezza con  $C_{1/2} = 10$  e accettazione  $5^\circ$  oppure con uno con  $C_{1/2} = 11.4$  e accettazione  $4^\circ$ .

Come si vede la riduzione della superficie riflettente non ha conseguenze importanti ed è in genere adottata visto il dimezzamento dell'ingombro in altezza.

Questo apparato permette di realizzare sistemi fotovoltaici a bassa concentrazione con l'impiego di cristalli di notevoli dimensioni e quindi non è adatto per l'utilizzo con celle a tripla giunzione [3].

*La lente di Fresnel*

Uno dei più semplici sistemi di solare a concentrazione che si può trovare in letteratura (vedi [1]) prevede l'uso di lenti di Fresnel. I vantaggi di queste lenti sono l'aver una focale molto corta, i costi minori rispetto alle lenti tradizionali nonché un peso inferiore. Purtroppo sono caratterizzate da un fuoco non ben localizzato il che le rende poco interessanti per impieghi in sistemi ad alte concentrazioni, incluso questo prototipo da 500 soli.

## 1.5.3 Specchi

Gli specchi sono le ottiche più utilizzate nella realizzazione di concentratori. Le differenze rispetto alle lenti si possono riassumere nei seguenti punti:

**ASSENZA DI ABERRAZIONI** L'angolo di riflessione non dipende dalla lunghezza d'onda della luce e quindi l'aberrazione cromatica non è presente negli specchi.

**LIBERTÀ NELLA FORMA** I processi di produzione di specchi sono vari ed in genere permettono una libertà nella geometria del pezzo molto maggiore rispetto a quella delle lenti.

**RIFLETTIVITÀ** Al pari delle lenti una parte della luce viene assorbita per circa il 10% con conseguente perdita di efficienza.

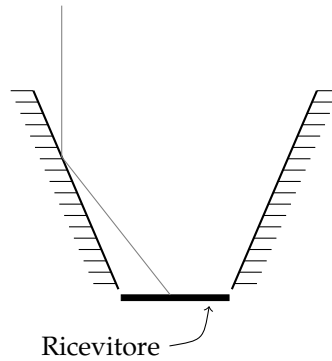


Figura 1.16: Sezione dello specchio a cono.

**OSSIDAZIONE** Col passare del tempo la superficie metallica dello specchio tende ad ossidarsi con la conseguente riduzione del coefficiente di riflessione. C'è la possibilità di ricoprire lo specchio con un sottile strato protettivo che però assorbe una parte della radiazione che lo attraversa.

#### *Cono di luce*

Un dispositivo a specchi sovente utilizzato nei concentratori è il cono di luce. È essenzialmente una piramide a base quadrata, privata delle facce superiore ed inferiore, o un cono a tutti gli effetti a seconda della geometria del ricevitore (in figura 1.16 è rappresentato in sezione).

Alcuni decenni fa questo dispositivo veniva utilizzato come concentratore, probabilmente per la semplicità di realizzazione. Esso presenta problemi di efficienza nel convogliare la luce sul ricevitore: parte dei raggi, dopo alcune riflessioni, escono dal cono e quindi non raggiungono la cella.

Nei concentratori più recenti il cono viene utilizzato per ovviare ad imperfezioni dell'ottica che causano la focalizzazione di parte della luce fuori dalle celle. Posizionato vicino a queste ultime esso permette di convogliare parte dei raggi luminosi che lo colpiscono sul ricevitore.

Vista la perdita del 10% di potenza per ogni riflessione, è bene migliorare l'ottica principale per evitare che questo dispositivo sia reso necessario.

#### *Specchio parabolico*

Insieme alle lenti di Fresnel, gli specchi parabolici sono le ottiche più utilizzate nel fotovoltaico a concentrazione. Questo fatto non deve indurre a pensare che essi siano la miglior soluzione per quest'applicazione: l'accettanza angolare di questi dispositivi non si avvicina a quella teorica che si calcola con l'equazione 1.2 a pagina 18. Scelta una concentrazione  $C$  si può calcolare dalla 1.2 l'angolo  $\theta_{\max}$  per un concentratore ottimale. Per una parabola con lo stesso fattore di concentrazione  $C$  ponendo la sorgente ad un angolo  $\theta_{\max}$  viene perso il 40% della luce.

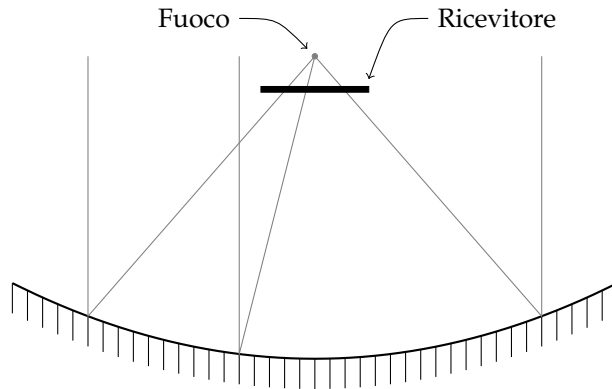


Figura 1.17: Sezione di uno specchio a parabola. Si noti che è necessario posizionare il ricevitore fuori fuoco per illuminarne tutta la superficie.

Nonostante questo, se si vuole ridurre il concentratore ad un singolo specchio, difficilmente si troverà qualcosa di alternativo ad un paraboloido.

In figura 1.17 è rappresentata una parabola che dirige fasci paralleli al proprio asse sulla cella. Il ricevitore, come si vede, non va posizionato in corrispondenza del fuoco, dove si otterrebbe solo la riproduzione dell'immagine del sole su una piccola superficie. È necessario posizionare la cella prima o dopo il fuoco in modo che essa venga completamente illuminata.

Si può inoltre far notare che la cella (e soprattutto i supporti necessari al suo posizionamento) oscura una parte dello specchio riducendo così la superficie utile del concentratore.

Nei due concentratori studiati in questo progetto (verranno descritti più avanti) si fa uso di specchi parabolici cilindrici e di un paraboloido.

## 2 | APPARATO PER MISURE DI EFFICIENZA

### INDICE

---

2.1	Celle a multigiunzione	23
2.1.1	Celle preassemblate da Emcore	23
2.1.2	Scheda con celle in serie	25
2.1.3	Il diodo di bypass	27
2.1.4	Cavo di collegamento cella-carico	28
2.2	Sistema di misura	29
2.2.1	Carico variabile	29
2.2.2	Segnali di corrente e tensione: il traduttore	30
2.2.3	Controllo e misura via software	31

---

### 2.1 CELLE A MULTIGIUNZIONE

#### 2.1.1 Celle preassemblate da Emcore

In figura 2.1 è riportato l'assemblaggio di una cella a tripla giunzione effettuato direttamente da Emcore allo scopo di fornire ai propri clienti un dispositivo pronto per test con luce solare concentrata.

Tra le caratteristiche di questo componente si evidenziano:

- implementazione di diodi di bypass: entrano in funzione in caso di danneggiamento della cella;
- supporto in ceramica che permette di isolare elettricamente la cella dalla metallizzazione sottostante e assicura nel contempo un'alta conducibilità termica, utile per ottimizzare la dissipazione di calore;
- connessioni in oro tra la cella ed i contatti;
- superficie di  $1 \text{ cm}^2$ ;
- efficienza di picco dichiarata: 39%.

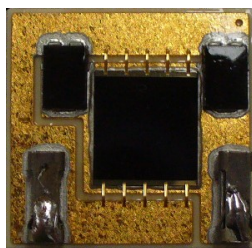


Figura 2.1: Cella da  $1 \text{ cm}^2$  assemblata da Emcore.

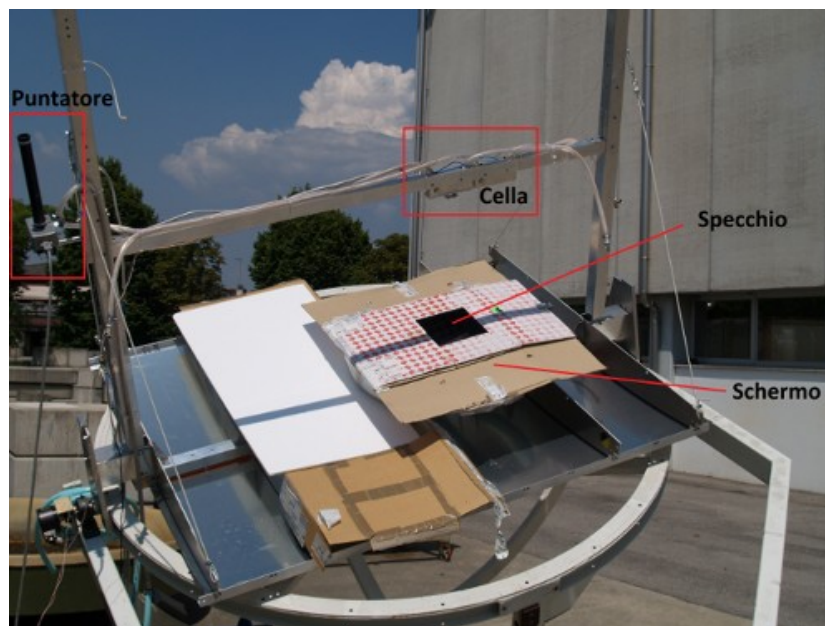


Figura 2.2: Concentratore utilizzato per le celle da 1 cm<sup>2</sup>. Sulla sinistra è presente il puntatore, la cella sulla sbarra di supporto, al centro lo specchio con la maschera che determina forma del fuoco e fattore di concentrazione.

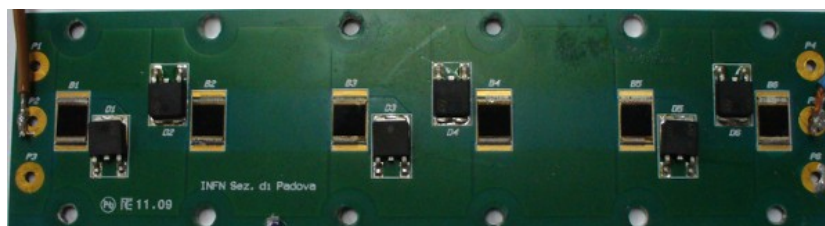


Figura 2.3: Scheda con sei celle in serie assemblata nei laboratori dell'Università di Padova e della sezione di Padova dell'INFN.

### *Il concentratore per celle da 1 cm<sup>2</sup>*

Il concentratore usato per queste celle è mostrato in figura 2.2. Consiste in uno specchio parabolico circolare con diametro di circa 60 cm davanti al quale è applicata una maschera che permette di ottenere un fuoco quadrato, quindi con la stessa geometria della cella, e di variare il fattore di concentrazione tra 250, 600 e 900 a seconda delle dimensioni del foro.

La cella è fissata ad una sbarra mobile che permette di posizionare il ricevitore sul fuoco dello specchio. Come si vede la sbarra proietta un'ombra sullo specchio riducendone la superficie utile e di questo si è tenuto conto nel calcolare le dimensioni della maschera.



## 2.1.2 Scheda con celle in serie

La scheda in figura 2.3 è stata ideata specificatamente per il progetto. La disposizione delle celle dipende direttamente dal tipo di concentratore utilizzato e che sarà descritto più avanti. Le dimensioni della schedina sono di 15 cm di larghezza per 4 cm di altezza.

Le celle qui utilizzate sono dello stesso tipo di quelle descritte nel paragrafo precedente, ma sono fornite da Emcore non assemblate e con superficie di  $30 \text{ mm}^2$  (hanno un lato di 5.5 mm).

Partendo dal fondo, la schedina è composta di:

- una lastrina di alluminio dello spessore di circa 1 mm;
- uno strato di vetronite di  $66 \mu\text{m}$  per isolare elettricamente la lastra di alluminio dal resto della scheda;
- piste in rame con spessore di  $100 \mu\text{m}$  per il collegamento delle celle in serie e con i diodi di bypass;
- contatti in oro su cui sono state saldate le celle e i diodi di bypass;
- un altro strato di vetronite per proteggere i contatti.

Come si vede la funzione di isolante elettrico non è espletata da uno strato di ceramica (come per la cella assemblata da Emcore) ma da della vetronite. Seppur sottile, tale strato riduce lo scambio termico tra le celle e la lastrina di alluminio. Questo potrebbe ripercuotersi sul fronte dell'efficienza ad alte concentrazioni e cioè nel momento in cui il calore prodotto diventa significativo rispetto a quello che la scheda è in grado di dissipare.

*Concentratore per scheda con celle in serie*

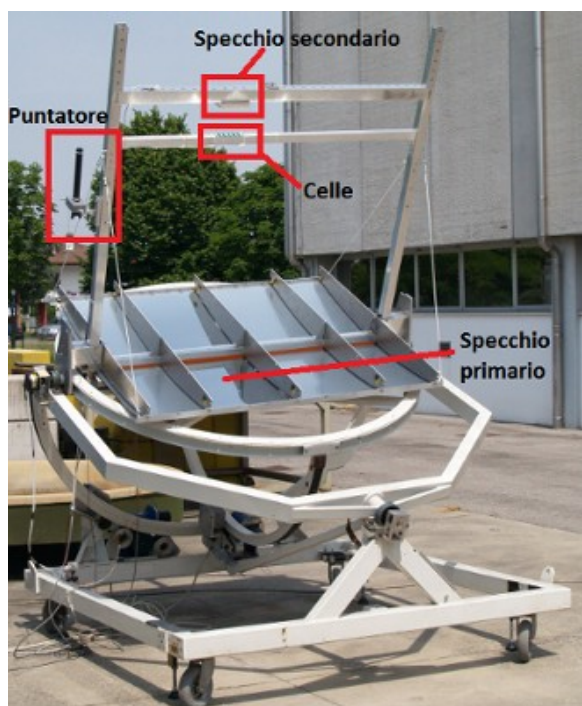
Il concentratore usato con queste schede è mostrato in figura 2.4; è composto da due componenti ottici:

**SPECCHIO PRINCIPALE** è di forma parabolica cilindrica e focalizza la luce lungo una linea. È costituito di una lastra di alluminio anodizzato poggiata su sbarre con profilo parabolico che danno la forma desiderata allo specchio;

**SPECCHIO SECONDARIO** è composto di una serie di parabole affiancate con larghezza di 2.5 cm ciascuna e orientate ortogonalmente rispetto allo specchio primario. Le parabole sono ottenute da un blocchetto di alluminio (figura 2.5); ad ognuna di esse è associata una cella sulla quale viene quindi concentrata la luce che giunge dall'altro specchio.

La linea lungo cui viene focalizzata la luce dal primo specchio viene "spezzata" dal secondo per formare un fuoco quadrato in corrispondenza di ogni cella. La focalizzazione dell'ottica primaria non è risultata soddisfacente in quanto parte della luce viene proiettata sopra e sotto le celle. Per questo motivo si sono aggiunti ulteriori specchi, in prossimità delle celle, che riflettono la luce sui ricevitori (figura 2.5).

Si può determinare facilmente il fattore di concentrazione considerando che l'altezza utile dello specchio è di 120 cm e che la larghezza



(a) Concentratore utilizzato



(b) Schermi per ridurre il fattore di concentrazione

Figura 2.4: Concentratore utilizzato per la scheda assemblata ai laboratori dell'INFN di Padova. Sulla sinistra è presente il puntatore, la scheda con le celle sulla sbarra inferiore, l'ottica secondaria sulla sbarra superiore e alla base lo specchio primario.

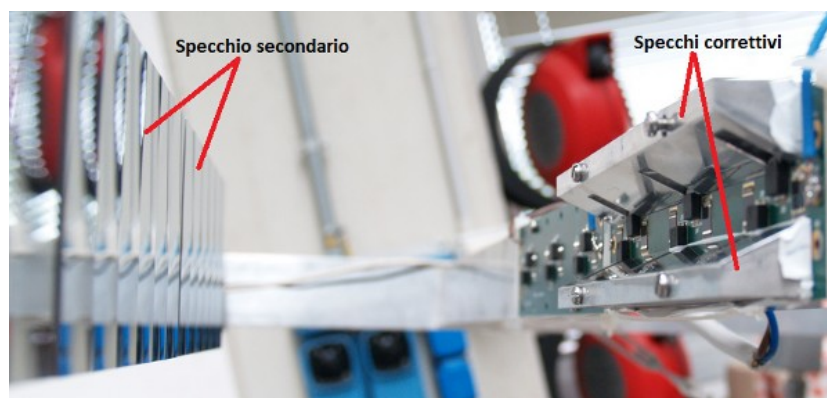


Figura 2.5: Ottica secondaria e specchi correttivi dell'ottica primaria.

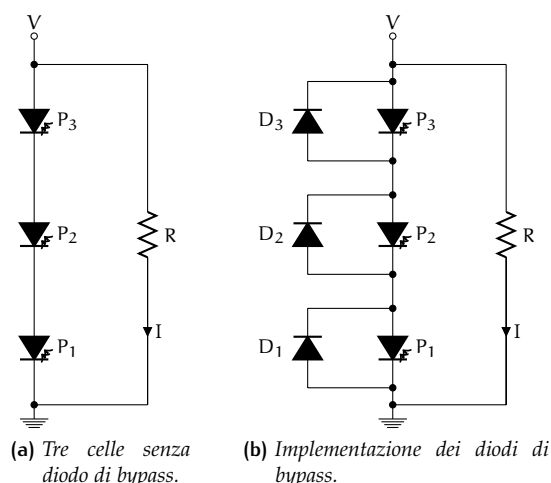


Figura 2.6: Celle in serie senza e con diodi di bypass.

di ogni scheda è 15 cm. Le 6 celle che compongono la scheda hanno una superficie complessiva di  $1.8 \text{ cm}^2$  e quindi il fattore di concentrazione è  $C = \frac{120 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}}{1.8 \text{ cm}^2} = 1000$ . Questo valore può essere ridotto coprendo parte dello specchio primario, cosa che è stata fatta fissando dei pannelli che permettono di dimezzare la superficie esposta dello specchio ottenendo un fattore di concentrazione  $C = 500$  (si veda la figura 2.4b).

### 2.1.3 Il diodo di bypass

Come si è visto, nell'implementazione delle celle solari si includono dei diodi di bypass nel circuito.

La figura 2.6a rappresenta tre celle fotovoltaiche connesse in serie. Le celle sono attraversate dalla stessa corrente  $I$  corrispondente alla minima delle correnti prodotte dalle celle se prese singolarmente nelle stesse condizioni di irraggiamento.

Supponiamo che una delle celle si danneggi o venga oscurata. In queste condizioni la corrente  $I$  si annulla o si riduce in modo significativo. La mancata produzione di energia da parte di una sola cella compromette cioè l'intero sistema di celle in serie.

In figura 2.6b è rappresentata l'integrazione dei diodi di bypass. Durante un normale funzionamento i diodi sono polarizzati inversamente e la corrente  $I$  fluisce lungo le celle. Nel caso in cui una di esse (per esempio la  $P_2$ ) venga danneggiata od oscurata, la corrente passa per il corrispondente diodo di bypass (il  $D_2$ ) e l'unico effetto che ne deriva è la riduzione della differenza di potenziale ai capi del carico  $R$  che scende da  $V = 3V_j$  a  $V = 2V_j - V_d$  dove  $V_j$  rappresenta la differenza di potenziale ai capi di una singola cella e  $V_d$  quella ai capi del diodo. Il deficit in potenza generata con questa configurazione corrisponde approssimativamente al mancato irraggiamento di una cella, senza ripercussioni sull'energia prodotta dalle altre celle.

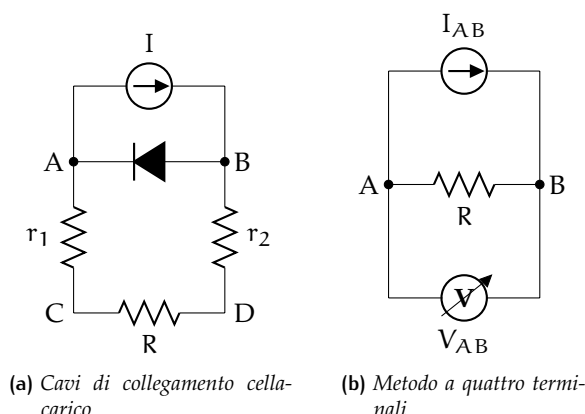


Figura 2.7: Misura della resistenza del cavo cella-inverter

2.1.4 Cavo di collegamento cella-carico

*Perché misurare la resistenza del cavo*

Il cavo utilizzato in questo prototipo e che collega le celle al carico (in genere l’inverter o il sistema di misura) è lungo circa 10m ed il suo diametro è di circa 2 mm. Tale cavo è a tutti gli effetti parte dell’apparato: le importanti correnti coinvolte (dell’ordine di 1 A) fanno sì che anche una resistenza di 0.1 Ω porti a cadute di potenziale significative. In figura 2.7a è riportato uno schema che rappresenta lo scenario appena descritto.

La cella è rappresentata con un generatore di corrente in parallelo con un diodo. Essa è collegata al carico R con due cavi di resistenza totale  $r = r_1 + r_2$ . È chiaro che una parte della potenza prodotta dalla cella viene dissipata dal cavo e non è direttamente rilevabile dagli strumenti in corrispondenza del carico R. Tale potenza è uguale a  $P_r = (V_{AB} - V_{CD})I = ((r + R)I - RI)I = rI^2$  mentre la potenza totale dissipata è  $P_{tot} = V_{AB}I = (r + R)I^2$ . Il rapporto tra le due è

$$\frac{P_r}{P_{tot}} = \frac{r}{r + R}$$

che rappresenta l’importanza della resistenza del cavo in un processo di misura dell’MPP.

Tale rapporto è significativo (dell’ordine di  $10^{-1}$ ) per valori di r dell’ordine di 0.1 Ω visto che i valori del carico variabile utilizzati nelle misure sono compresi tra 0.3 Ω ed ∞.

La misura della resistenza r non può essere fatta con l’utilizzo di un comune tester in quanto la sensibilità dello strumento è confrontabile con il valore da misurare. Il metodo di misura adottato è quello a quattro terminali. Questo tipo di misura consiste nel collegare il generico carico R ad un generatore di corrente  $I_{AB}$  e ad un voltmetro  $V_{AB}$ . In figura 2.7b viene riportato uno schema della configurazione appena descritta.

*Metodo a quattro terminali*

Per ridurre l’errore sono state effettuate più misure al variare della corrente. I punti corrente-tensione si dispongono lungo una retta la cui pendenza corrisponde alla resistenza da misurare. I dati raccolti sono rappresentati nel grafico in figura 2.8.

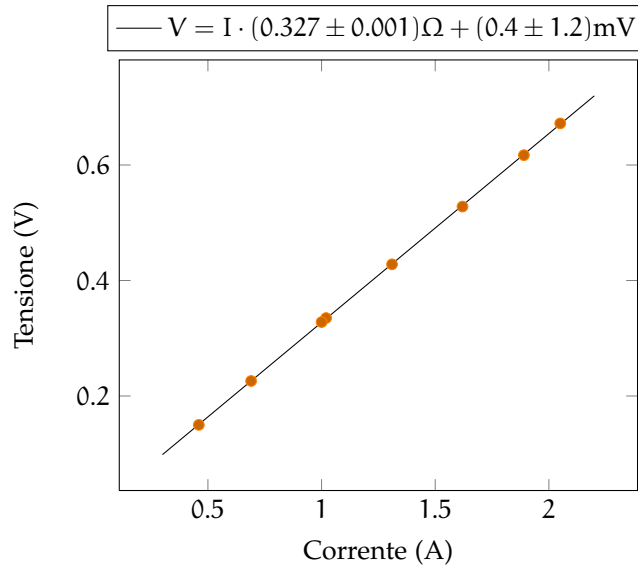


Figura 2.8: Misure di resistenza del cavo cella-inverter

La regressione lineare fornisce un coefficiente  $\rho^2 = 0.99996$ , l'intercetta  $V_0 = (0.4 \pm 1.2) \text{ mV}$  è compatibile con lo zero, il valore della resistenza è

*Risultati ottenuti*

$$r = (0.327 \pm 0.001) \Omega.$$

La componente di potenza dissipata dai cavi, per un carico che va da  $R = 0.3 \Omega$  ad infinito (circuito aperto), risulta essere

$$\frac{P_r}{P_{\text{tot}}} \simeq (0-50) \%$$

Quindi è importante considerare questo contributo nell'analisi della potenza prodotta dalle celle; questo verrà fatto aggiungendo la caduta di potenziale  $rI$  sui cavi alla tensione  $V$  misurata ai capi del carico.

$$V' = V + rI.$$

## 2.2 SISTEMA DI MISURA

Come detto nel paragrafo 1.2.2 la caratterizzazione di una cella, compresa la potenza che essa produce, viene fatta per mezzo della curva I-V. Al fine di ottenere tale curva è necessario misurare i valori di tensione e corrente al variare del carico applicato. Questo è reso più semplice per mezzo della realizzazione di un sistema software di controllo del carico e misura.

### 2.2.1 Carico variabile

In figura 2.9 è riportata una foto del carico variabile Uniwatt EL100 utilizzato per la misura di potenza delle celle. È controllabile sia ma-

## APPARATO PER MISURE DI EFFICIENZA



Figura 2.9: Foto del carico variabile utilizzato nel processo di misura di tensione e corrente. Modello Uniwatt EL100.

nualmente con dei potenziometri che con un segnale esterno in tensione applicato al connettore di tipo BNC che si può vedere in basso a destra nella foto.

Tra le caratteristiche principali di questo strumento si possono menzionare:

- tensione di carico: (1–50) V;
- corrente massima: 20 A;
- potenza massima: 100 W;
- resistenza ai capi:  $(0.3–15 \times 10^3) \Omega$ ;
- tempo di salita in corrente ((0–100) %): 60  $\mu$ s;
- errore in corrente dopo 8 h: < 0.25 %;
- temperatura di esercizio: (15–40) °C;
- settaggio a corrente costante o resistenza costante.

Il controllo del carico con una tensione esterna viene fatto con un segnale  $v_{in}$  a cui corrisponde una corrente costante  $I_{out}$  che attraversa il carico data da

$$I_{out} = v_{in} \cdot 2 \text{ A V}^{-1} \quad (2.1)$$

quindi  $v_{in}$  varia tra 0 V e 10 V visto che la corrente massima che può passare per il carico è di 20 A.

### 2.2.2 Segnali di corrente e tensione: il traduttore

La misura via software di tensione e corrente viene eseguita per mezzo di schede ADC della National Instruments. Sebbene per la lettura della tensione non ci siano particolari problematiche, la misura della corrente non è possibile direttamente con questi strumenti.

Per questo motivo ci si è affidati all'apparato riportato in figura 2.10 che permette di ottenere due segnali in tensione  $v_I$  e  $v_V$  proporzionali rispettivamente alla corrente  $I$  che lo attraversa e alla tensione  $V$  ai capi dell'ingresso. La dipendenza delle uscite dall'ingresso è data dalle relazioni:

$$v_I = \frac{I}{5 \text{ A V}^{-1}} \quad (2.2)$$

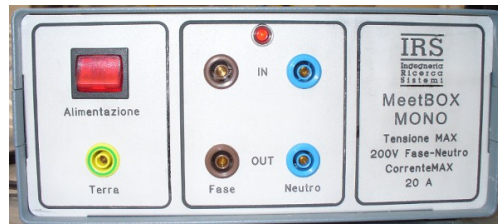


Figura 2.10: Il traduttore utilizzato per ottenere due segnali in tensione in funzione di tensione e corrente di ingresso.

$$v_V = \frac{V}{65} \quad (2.3)$$

Tra le caratteristiche salienti di questo strumento si possono segnalare:

- corrente efficace: 20 A;
- precisione complessiva in corrente: 0.5 %;
- tensione efficace: 200 V;
- precisione complessiva in tensione: 0.8 %.

La connessione del traduttore è fatta come segue: l'ingresso dello strumento (le due boccole superiori) è connesso ai capi della cella solare mentre l'uscita (le due boccole inferiori) va al carico variabile descritto in precedenza.

### 2.2.3 Controllo e misura via software

Il controllo del carico variabile e la misura delle tensioni  $v_I$  e  $v_V$  viene effettuata via software con la programmazione di un'interfaccia in Labview e l'utilizzo delle schede di lettura ad esso associate.

#### *Cos'è Labview*

Labview è un ambiente di sviluppo prodotto dalla National Instruments basato sul linguaggio "G". Nella programmazione in Labview si utilizzano icone e fili di collegamento che ricordano in qualche modo un diagramma di flusso. Con esso è possibile realizzare dei sistemi di misura, test o controllo con l'utilizzo di schede esterne fornite dalla stessa società.

Un programma sviluppato in Labview è costituito di due componenti tra loro legate: il pannello frontale e il diagramma a blocchi.

Il pannello frontale rappresenta l'interfaccia grafica del programma attraverso la quale si interagisce fornendo dati di ingresso e leggendo quelli in uscita.

Il diagramma a blocchi è il programma vero e proprio: qui vengono costruite le funzioni e le operazioni sui dati. È composto da icone e fili di collegamento che ricordano in qualche modo i diagrammi di flusso. Le icone presentano degli ingressi e delle uscite, a seconda del tipo di operazioni che svolgono.

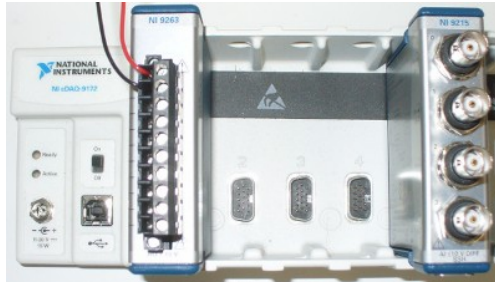


Figura 2.11: Foto delle due schede Labview utilizzate per il controllo del carico variabile (a sinistra) e per la lettura di tensioni con conversione analogico-digitale (a destra).

#### *Le schede utilizzate*

Le misure di potenza vengono effettuate via software comandando le schede di acquisizione e di uscita che si possono vedere in figura 2.11.

A sinistra si trova il modello NI-9263. È un modulo di uscita in tensione analogico. Tra le caratteristiche principali troviamo:

- quattro canali di uscita;
- tensione di uscita tra  $-10\text{ V}$  e  $10\text{ V}$ ;
- risoluzione del DAC: 16 bit;
- corrente massima per canale:  $\pm 1\text{ mA}$ .

Uno dei quattro canali di questo modulo viene utilizzato per comandare il carico variabile.

A destra si trova invece la scheda NI-9215. È un modulo di lettura di tensioni analogiche. È caratterizzato da:

- quattro canali di ingresso;
- tensioni in ingresso tra  $-10\text{ V}$  e  $10\text{ V}$ ;
- risoluzione dell'ADC: 16 bit;
- tempi di conversione:  $(4.4-10)\text{ }\mu\text{s}$  a seconda del numero di canali utilizzati;
- impedenza di ingresso:  $200\text{ k}\Omega$ .

Due ingressi di questo modulo sono utilizzati per le misure di tensione e corrente.

#### *Il programma di misura di tensione e corrente*

La programmazione dell'interfaccia è stata effettuata con uno schema piramidale: piccoli programmi alla base effettuano operazioni semplici; più programmi di livello base formano un programma più complesso e così via.

Il programma alla base della misura di curve I-V è quello rappresentato in figura 2.12. L'operazione avviene in due fasi: impostazione del carico e successivamente misure di tensione e corrente, che devono



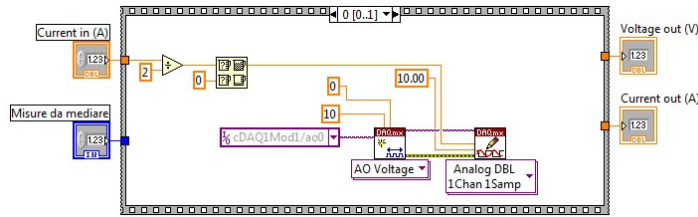
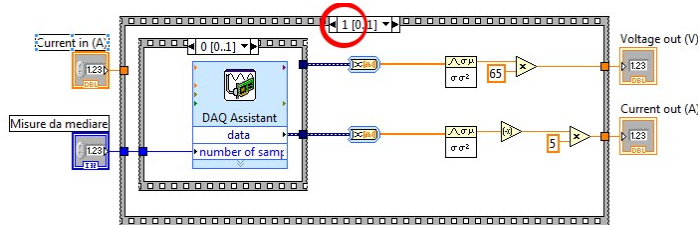
(a) *Settaggio corrente*(b) *Letture corrente e tensione*

Figura 2.12: Programma di lettura corrente e tensione: viene prima impostato il carico variabili in modo che venga attraversato da una precisa corrente, poi vengono effettuate le misure di corrente e tensione

essere ordinate temporalmente. Per questo motivo si utilizza la struttura *Stacked sequence structure* rappresentata da un rettangolo grigio al cui interno si posiziona il codice. L'ordine con il quale viene eseguito il codice è determinato in base all'indice indicato in rosso nella figura 2.12b.

In figura 2.12a è riportato il settaggio della corrente massima che può attraversare il carico variabile: viene preso l'ingresso "Current in", che viene diviso per due in modo da ottenere un segnale in tensione per il carico in accordo con l'equazione 2.1. Con un operatore si seleziona il massimo tra il valore ottenuto e 0 così da evitare di passare al carico tensioni negative. Quindi con le altre due icone ("AO Voltage" e "Analog DBL") si trasferisce il risultato ottenuto alla scheda di uscita NI-9263 che è collegata al carico variabile.

Nella fase successiva (figura 2.12b) vengono effettuate le letture sequenziali (si noti la presenza di un'altra *Stacked sequence structure* all'interno della prima) delle tensioni  $v_I$  e  $v_V$ . In particolare vengono effettuate un numero di misure determinate dall'ingresso "Misure da mediare" le quali vengono successivamente mediate con un operatore. Il risultato delle medie viene quindi moltiplicato per i fattori indicati nelle equazioni 2.2 e 2.3 e quindi passato in uscita.

Viene cambiato il segno della corrente per ottenere un valore positivo: le celle sono contropolarizzate e quindi la direzione della corrente è invertita rispetto a quella di un normale diodo polarizzato direttamente.

#### Misura di curva I-V

La rilevazione di una curva I-V viene fatta sfruttando il programma appena descritto. Quest'ultimo viene rappresentato come un'icona e

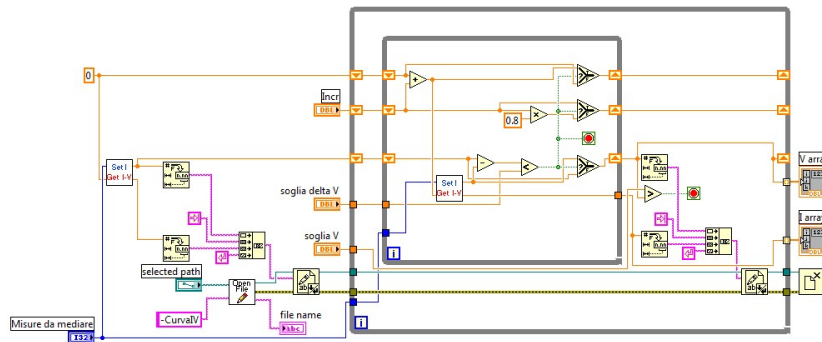


Figura 2.13: Programma di misura della curva I-V: si noti la presenza del sottoprogramma che effettua singole misure di tensione e corrente rappresentato con l'icona "Set I Get I-V".

posto all'interno di un ciclo che permette di ripetere le misure di tensione e corrente variando con continuità la corrente da zero al valore massimo che la cella riesce a fornire.

In figura 2.13 si può vedere il programma scritto a questo scopo. All'apparenza può sembrare piuttosto complesso, ma il funzionamento non lo è particolarmente:

- si impostano alcune stringhe per il salvataggio dei dati su file (icone in magenta sulla sinistra);
- si effettua una prima misura con corrente nulla per inizializzare il file (icona "Set I Get I-V" sulla sinistra che rappresenta il programma descritto prima);
- la corrente misurata viene passata, insieme ad altri dati, ad un ciclo (rettangolo grigio esterno);
- i dati entrano a loro volta in un secondo ciclo all'interno del quale vengono effettuati: l'incremento di corrente  $\Delta I$  rispetto al valore precedente, la misura di tensione e corrente, un controllo della distanza nel piano I-V del nuovo punto da quello precedente. Se la distanza supera un valore massimo di soglia l'incremento in corrente  $\Delta I$  viene dimezzato e viene ripetuta la misura. Se la distanza tra i punti non supera il valore di soglia allora il ciclo è interrotto e la misura è ritenuta valida: il risultato esce dal ciclo. Se la distanza tra i punti è superiore al valore di soglia, ma il dimezzamento dell'incremento  $\Delta I$  è già avvenuto, si esce lo stesso dal ciclo più interno e non viene ridotto ulteriormente il valore di  $\Delta I$  per non superare i limiti di sensibilità del carico variabile;
- usciti dal ciclo più interno viene salvata la nuova misura su file e viene fatto un controllo sulla tensione misurata: se questa risulta minore di un valore di soglia allora viene interrotto anche il ciclo esterno. Se la soglia non è superata vengono ripetute le misure con un nuovo incremento di corrente.

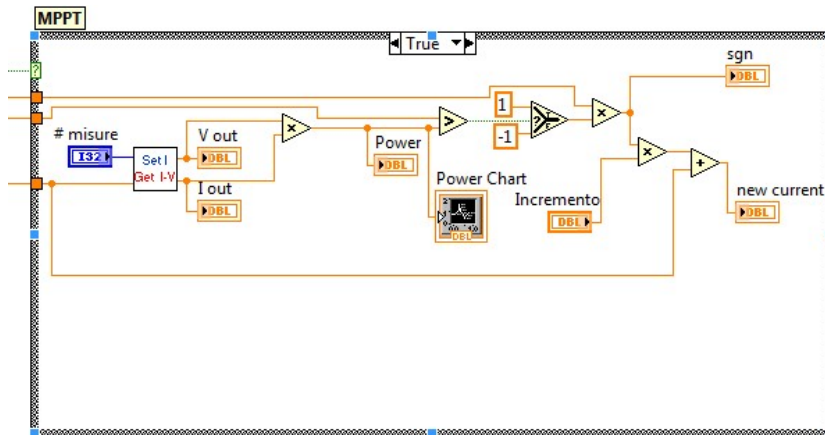


Figura 2.14: Programma di misura del punto di massimo. La struttura che lo contiene è inclusa in un ciclo più grande non riportato per maggiore chiarezza del blocco che qui interessa.

- una volta interrotto il ciclo esterno le misure vengono passate in uscita come degli array e viene chiuso il file in cui sono stati salvati i dati.

#### Ricerca dell'MPPT

La ricerca del punto di massimo viene fatta ancora una volta sfruttando il sottoprogramma di controllo del carico e di misura di tensione e corrente.

In figura 2.14 si trova il blocco di codice che permette di seguire il punto di massima potenza (vedi paragrafo 1.2.2) durante l'esposizione della cella al sole. Questo è inserito, insieme a dell'altro codice necessario al controllo dell'inseguimento, all'interno di un ciclo più grande che qui non viene presentato per assicurare la chiarezza del codice che qui ci interessa.

Gli ingressi visibili a sinistra sono: in verde un boolean che permette di decidere se effettuare o meno la ricerca del massimo, in arancione il segno dell'incremento di corrente e la potenza  $P_{old}$  corrispondenti all'esecuzione precedente del ciclo e infine, sempre in arancione, la corrente da impostare nella nuova esecuzione.

Come si può vedere vengono fatte le misure di tensione e corrente con il sottoprogramma "Set I Get I-V", quindi i due valori sono moltiplicati in modo da ottenere la potenza  $P_{new}$ , questa viene confrontata con la potenza  $P_{old}$  ottenuta precedentemente. Se  $P_{new} > P_{old}$  allora viene mantenuto il segno dell'incremento di corrente, altrimenti questo viene cambiato. Viene infine impostato il nuovo valore di corrente "new current" che verrà utilizzato per l'esecuzione successiva del ciclo.

Con questo codice la corrente che il carico variabile accetta viene aumentata o diminuita a seconda del segno dell'incremento  $\Delta I$  in modo da avvicinare il più possibile il punto di massimo. Al raggiungimento dell'MPP il valore in corrente oscilla intorno ad esso e durante l'esecuzione del programma si osserva che l'incremento cambia segno ad

#### APPARATO PER MISURE DI EFFICIENZA

ogni esecuzione del ciclo permettendo così di rimanere in un intorno abbastanza piccolo del massimo.

# 3

## APPARATO PER MISURE DI PUNTAMENTO

### INDICE

---

3.1	Simulazione dei circuiti elettronici	37
3.2	Componenti elettronici	38
3.2.1	Amplificatore operazionale	38
3.2.2	Il temporizzatore NE555	38
3.2.3	Fotoresistenze e fotodiodi	39
3.2.4	Multiplexer	40
3.2.5	Circuito integrato programmabile (PIC)	40
3.3	Montatura e motori passo-passo	41
3.3.1	La posizione del sole nel cielo	42
3.3.2	Trasformazione di coordinate	43
3.4	Orientamento veloce	43
3.5	Inseguimento fine	48
3.6	Posizionamento software e manuale	54
3.6.1	Segnale di frequenza	54
3.6.2	Segnale di direzione software	56
3.6.3	Controllo manuale	56
3.7	Il PIC e il multiplexer	56
3.8	Apparato di misura degli angoli	57
3.8.1	L'encoder	57
3.8.2	Programma di lettura	58

---

### 3.1 SIMULAZIONE DEI CIRCUITI ELETTRONICI

La suite di programmi Orcad è ideata per la progettazione e simulazione di circuiti analogici, digitali e integrati. Tra i programmi messi a disposizione si sono usati Capture e Spice.

Il primo è destinato al disegno dello schema circuitale. I componenti che si desidera utilizzare devono essere caricati attraverso delle librerie. Ad ogni componente può essere associato o meno un insieme di informazioni necessarie alla simulazione. Per studiare il comportamento del circuito è necessario caricare le librerie che includono tali informazioni.

*Disegno del circuito*

Una volta disegnato il circuito si definisce un profilo di simulazione: si specifica se studiare tensione e corrente in funzione del tempo, temperatura o frequenza. Nel nostro caso vengono analizzati i segnali soltanto in funzione del tempo.

*Simulazione*

Si procede quindi al posizionamento sullo schema circuitale di sonde virtuali di tensione o corrente e alla simulazione con Spice. Il risultato è presentato graficamente con la possibilità di effettuare un salvataggio su file.

Nella realizzazione della circuiteria per il puntamento si è fatto uso di questo strumento di simulazione sia per dimensionare i componenti

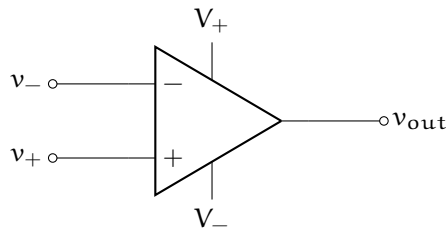


Figura 3.1: Amplificatore operazionale.

in base alle necessità e prevedere i cambiamenti nel comportamento dei circuiti, sia per controllare il corretto funzionamento del circuito reale.

## 3.2 COMPONENTI ELETTRONICI

### 3.2.1 Amplificatore operazionale

L'amplificatore operazionale è alla base di varie tipologie di circuiti tra cui il comparatore (nome a volte usato per identificare il componente stesso) e l'amplificatore con retroazione.

Nella realizzazione della circuiteria di controllo del puntamento si è usato il modello LM324 che presenta le seguenti caratteristiche:

- integra quattro amplificatori operazionali in un unico componente;
- compatibilità con segnali logici;
- larghezza di banda: 1 MHz;
- tensione di alimentazione singola: (3–32) V;
- tensione di doppia alimentazione: ( $\pm 1.5$ – $\pm 16$ ) V;
- corrente agli ingressi: 45 nA;
- offset tra gli ingressi: 2 mV in tensione e 5 nA in corrente;
- temperatura di esercizio: (0–70) °C.

### 3.2.2 Il temporizzatore NE555

L'integrato NE555 è un temporizzatore che può essere configurato come multivibratore monostabile, bistabile o astabile. Un multivibratore è un componente la cui uscita è caratterizzata da due soli stati possibili identificati in questo caso dalla massa e dalla tensione di alimentazione  $V_{CC}$ .

In figura 3.2 viene proposto lo schema a blocchi del componente.

Tra le sue caratteristiche si possono evidenziare:

- frequenza operativa fino a circa 500 kHz;

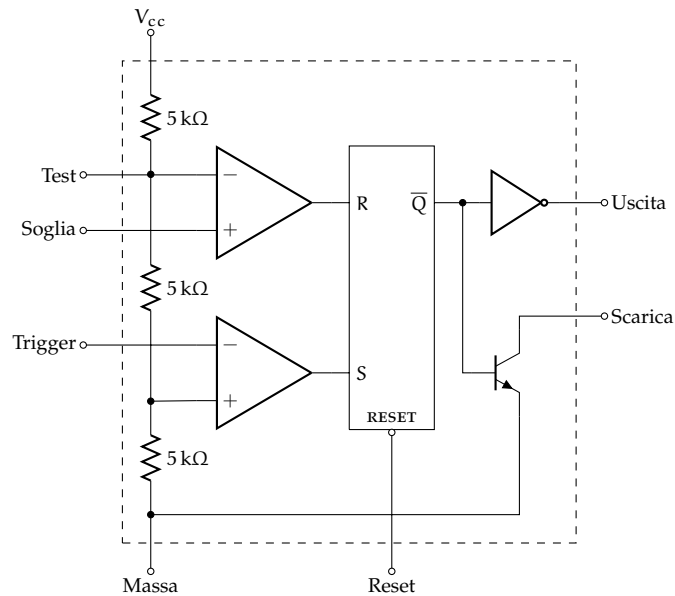


Figura 3.2: Schema a blocchi dell'NE555

- temporizzazione da microsecondi fino ad alcune ore;
- correnti di ingresso ed uscita fino a 200 mA;
- compatibilità con i segnali TTL;
- stabilità in temperatura di  $5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

### 3.2.3 Fotoresistenze e fotodiodi

Le fotoresistenze e i fotodiodi sono componenti il cui comportamento dipende dall'intensità della luce che li colpisce.

#### *Fotoresistenze*

Una fotoresistenza è una cella fotoconduttiva cioè un bipolo la cui conducibilità aumenta con la luminosità.

In questo progetto è stato usato un modello che presenta le seguenti caratteristiche:

- picco di sensibilità: 550 nm;
- temperatura di lavoro tra  $-60^\circ\text{C}$  e  $75^\circ\text{C}$ ;
- potenza dissipata a  $25^\circ\text{C}$ : 50 mW;
- resistenza al buio: 20 M $\Omega$ ;
- resistenza alla luce (100 lx): 5 k $\Omega$ .

## APPARATO PER MISURE DI PUNTAMENTO

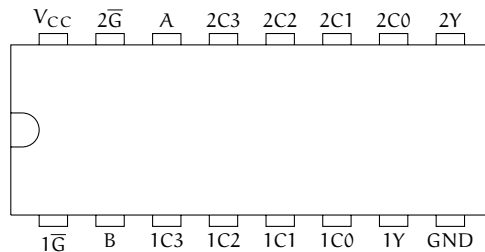


Figura 3.3: Configurazione del package del multiplexer SN54HC153

### Fotodiodi

Un fotodiode è riconducibile ad una piccola cella solare in silicio. Al pari di questa si comporta come un generatore di corrente dipendente dalla potenza di irraggiamento.

La documentazione tecnica del componente a nostra disposizione riporta le seguenti caratteristiche:

- dimensioni del sensore: 2.29 mm;
- ingombro in larghezza: 5.31 mm;
- corrente massima in DC: 10 mA;
- temperatura di lavoro tra  $-25^{\circ}\text{C}$  e  $75^{\circ}\text{C}$ .

Le dimensioni di questo componente sono importanti visto che quattro di essi trovano posto all'interno del tubo dell'inseguitore descritto più avanti.

### 3.2.4 Multiplexer

Un multiplexer è un componente a logica TTL che copia in uscita uno tra più segnali in ingresso. Il numero di ingressi è di solito una potenza di due ( $N = 2^n$ ) visto che la selezione di quale di essi copiare in uscita si effettua con un numero binario a  $n$  bit letti attraverso  $n$  pin del componente.

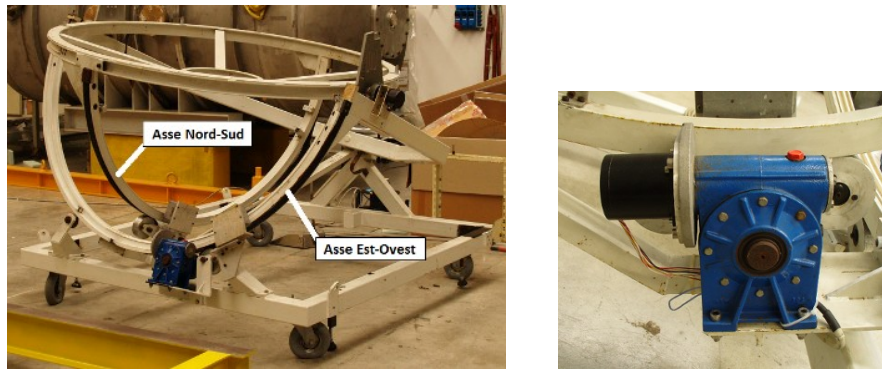
Il modello SN54HC153 (vedi figura 3.3) è un doppio multiplexer a quattro linee: integra due multiplexer con quattro ingressi ciascuno (1Cx e 2Cx). I due multiplexer non sono indipendenti nel senso che le due uscite (1Y e 2Y) sono selezionate con un unico codice binario attraverso i pin A e B. Questo fatto viene sfruttato nella realizzazione della circuiteria di controllo del puntatore.

### 3.2.5 Circuito integrato programmabile (PIC)

Con circuiti integrati programmabili ci si riferisce ad una classe di componenti integrati molto versatile. Sono dispositivi dotati di una memoria più o meno estesa e in grado di eseguire del codice.

Uno di questi componenti è in grado di compiere le stesse operazioni che altrimenti richiederebbero un gran numero di porte logiche. Un altro vantaggio è dato dal fatto che può essere riprogrammato per





(a) Montatura utilizzata. Sono indicati gli assi di rotazione.

(b) Motore passo passo.

Figura 3.4: Montatura e uno dei motori passo passo.

correggere banchi o includere nuove funzionalità nel circuito. Con l'utilizzo di porte logiche le stesse operazioni rendono necessari la rimozione e il riposizionamento di svariati componenti: un'operazione evidentemente più lenta e meno agevole della riprogrammazione del PIC.

Il modello PICAXE-18 utilizzato è un componente destinato all'hobbistica ma risulta comunque adeguato all'uso che ne viene fatto in questo progetto. È caratterizzato da:

- cinque ingressi di cui tre possono essere usati in ADC;
- otto uscite;
- programmazione in linguaggio simile al BASIC;
- memoria di 256 byte corrispondenti a 600/1000 linee di codice.

La società che produce il componente fornisce anche un ambiente di programmazione basilare ma efficace.

### 3.3 MONTATURA E MOTORI PASSO-PASSO

Il sistema di concentrazione e le celle sono fissati ad una montatura (vedi la foto in figura 3.4a) che ne consente l'orientamento visto che è dotata di due gradi di libertà rotazionali. Il movimento per ogni asse di rotazione è controllato da un motore passo-passo (vedi figura 3.4b).

I due motori sono a loro volta controllati da un driver con cui si interfaccia l'elettronica di controllo. La velocità di rotazione è comandata in frequenza con un segnale TTL secondo la relazione

$$\dot{\theta} = f(\text{Hz}) \cdot \text{h}$$

cioè la frequenza espressa in Hz corrisponde al numero di gradi di cui il sistema ruota in un'ora. La velocità angolare media del sole è  $\omega = 360^\circ/24\text{h} = 15^\circ\text{h}^{-1}$ ; durante l'inseguimento la frequenza in ingresso al driver dev'essere intorno ai 15 Hz.

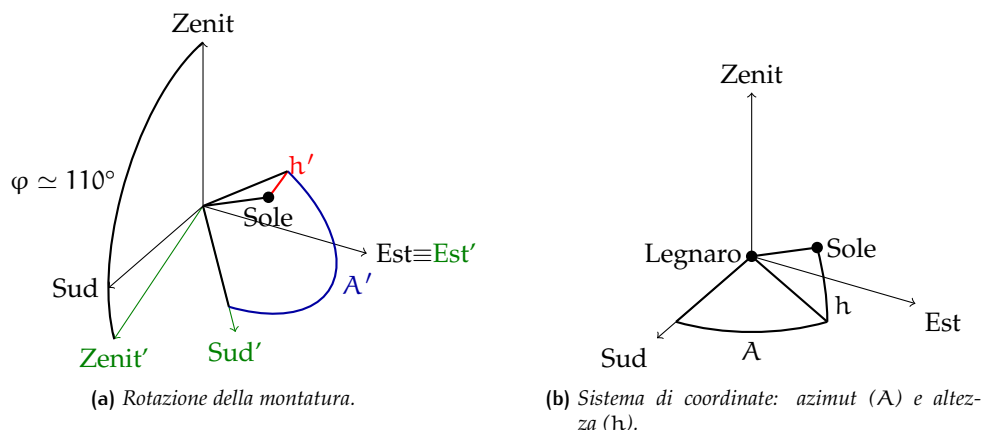


Figura 3.5: Rotazione montatura e sistema di coordinate.

I motori possono sostenere frequenze in ingresso al driver fino a circa 1000 Hz; questo apparato è quindi adeguato per un orientamento veloce del concentratore, necessario nella fase iniziale di puntamento.

### 3.3.1 La posizione del sole nel cielo

Per il controllo del puntamento è necessario determinare la dipendenza dell'angolo di rotazione per ogni asse della montatura in funzione dell'ora locale. Per fare questo determiniamo innanzitutto la posizione del sole e cioè il suo azimuth  $A$  (angolo Nord-Sud) e l'altezza  $h$  (angolo Est-Ovest) rappresentati nel diagramma in figura 3.5b.

L'ora standard  $t$  deve essere corretta visto che risulta esatta solo per quelle località che si trovano alla longitudine del fuso corrispondente. Si definisce così il tempo solare espresso in minuti dalla mezzanotte:

$$t' = t + 4(L_{\text{fuso}} - L_{\text{loc}}) + E$$

dove  $L_{\text{fuso}} = 15^\circ$  è il meridiano corrispondente al fuso orario italiano e  $L_{\text{loc}} = 11.95^\circ$  corrisponde alla longitudine di Legnaro. Il fattore 4 deriva dal fatto che la terra ruota di  $1^\circ$  ogni 4 min.

Il termine  $E$  tiene conto delle fluttuazioni stagionali della velocità di rotazione della terra ed è parametrizzata (in minuti) come

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B))$$

dove  $B$  esprime la posizione della terra nel moto di rivoluzione intorno al sole:

$$B = (n - 1) \frac{360^\circ}{365}$$

con  $n$  numero del giorno dall'inizio dell'anno. Si è così ottenuta la coordinata temporale corretta  $t'$  da associare alle misure della posizione del sole fatte al tempo locale  $t$ .

L'angolo zenitale  $\theta_z$  è il complementare dell'altezza  $h$  ed è dato da:

$$\theta_z = \arccos(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta)$$

dove  $\phi$  corrisponde alla latitudine locale che per Legnaro vale  $\phi = 45.36^\circ$ ,  $\delta$  è la declinazione del sole (coordinate celesti) e  $\omega$  è l'angolo orario cioè tra la direzione sud e la linea che congiunge l'osservatore alla proiezione del sole sull'orizzonte; si può scrivere come  $\omega = 15^\circ(t' - 12h)$ . L'angolo  $\delta$  viene invece parametrizzato con l'espressione

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B \\ & - 0.006758 \cos(2B) + 0.000907 \sin(2B) \\ & - 0.002679 \cos(3B) + 0.00148 \sin(3B) \end{aligned}$$

Si è quindi trovata una delle due coordinate che identificano la posizione del sole:  $h = 90^\circ - \theta_z$ .

L'azimut  $A$  è dato dall'espressione:

$$A = \text{sign}(\omega) \left| \arccos \left( \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right|$$

di cui sono già noti tutti i parametri.

Per approfondimenti sull'argomento si veda [5].

### 3.3.2 Trasformazione di coordinate

Come si vede dalla figura 3.5a il sistema di coordinate della montatura di cui si dispone è ruotato di un angolo  $\varphi \simeq 110^\circ$ . È quindi necessario applicare una trasformazione di coordinate per esprimere gli angoli  $A$  e  $h$  appena trovati in termini di  $A'$  e  $h'$  corrispondenti a quelli misurati. Si tratta di applicare una matrice del tipo

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

che rappresenta una rotazione di un angolo  $\varphi$  intorno all'asse  $y$  che qui corrisponde alla direzione Est. Si trova

$$\begin{aligned} h' &= \arcsin(\cos h \cos A \cos \varphi + \sin h \sin \varphi) \\ A' &= \arcsin\left(-\frac{\cos h \sin A}{\cos h'}\right) \end{aligned}$$

Il calcolo delle coordinate  $A'$  e  $h'$  è stato implementato in un programma Labview utilizzato durante la fase di inseguimento per monitorare il corretto posizionamento del concentratore.

## 3.4 ORIENTAMENTO VELOCE

Per l'orientamento rapido del concentratore è stata realizzata una piramide (vedi figura 3.6) a base quadrata munita di una fotoresistenza per ogni faccia. La funzione della piramide è quella di allineare il sistema al sole con una precisione sufficiente a garantire l'illuminazione di almeno uno dei fotodiodi montati sull'inseguitore fine.

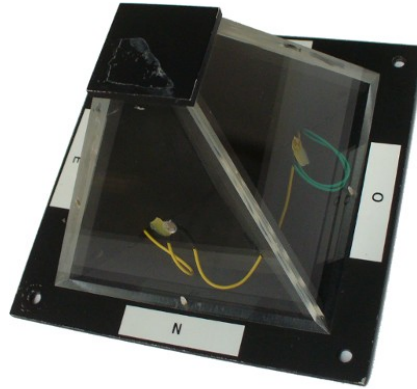


Figura 3.6: La piramide utilizzata per effettuare il puntamento rapido.

I gradi di libertà della montatura sono due; ad ognuno di essi è associata una coppia di fotoresistenze che comanda l'asse corrispondente.

Analizziamo il circuito, suddiviso in più stadi, che permette di ottenere i segnali di direzione e frequenza letti dal driver.

*Tensione di sbilanciamento tra le fotoresistenze*

In figura 3.7 è schematizzato il primo stadio: usando le fotoresistenze  $R_{foto1}$  e  $R_{foto2}$  si ricava il segnale  $v_{diff}$  dipendente dal differente livello di irraggiamento delle stesse.

All'ingresso non invertente dell'amplificatore  $A_1$  la tensione  $v_{in} \equiv v_{1+}$  è positiva se la fotoresistenza  $R_{foto1}$  è più illuminata della  $R_{foto2}$ ,  $v_{in} < 0$  nel caso opposto. In particolare si trova

$$v_{in} = 5V \frac{R_{foto2} - R_{foto1}}{R_{foto2} + R_{foto1}} \quad (3.1)$$

per  $R_{foto1}$  e  $R_{foto2}$  trascurabili rispetto a  $390\text{ k}\Omega$ , condizione sempre verificata per flussi di luce derivanti dall'irraggiamento solare.

L'ingresso non invertente  $v_{2+}$  è ad una tensione prossima a  $0\text{ V}$  così come  $v_{2-}$  per il principio del cortocircuito virtuale tra gli ingressi. Quindi  $i_2 = 0\text{ mA}$  e anche  $v_{2out}$  risulta praticamente a massa come gli ingressi di  $A_2$ .

L'ingresso invertente  $v_{1-}$  si porta alla stessa tensione  $v_{in}$  per il cortocircuito virtuale e si ottiene così  $i_1 = v_{in}/1\text{ k}\Omega$  da cui si trova subito che

$$v_{diff} = v_{in} + i_1 \cdot 5\text{ k}\Omega = 6v_{in}$$

Visto che il modulo di  $v_{in}$  raggiunge facilmente valori dell'ordine del volt,  $v_{diff}$  assume valori diversi da quelli di saturazione ( $V_+$  e  $V_-$ ) solo vicino all'equilibrio.

L'ingresso non invertente dell'amplificatore  $A_2$  non è stato collegato a massa ma ad un partitore per ottenere un effetto d'isteresi ed evitare l'oscillazione del circuito in corrispondenza dell'equilibrio. Le resistenze variabili in serie a quelle da  $10\text{ k}\Omega$  permettono invece di bilanciare le possibili asimmetrie di funzionamento tra  $R_{foto1}$  e  $R_{foto2}$ .

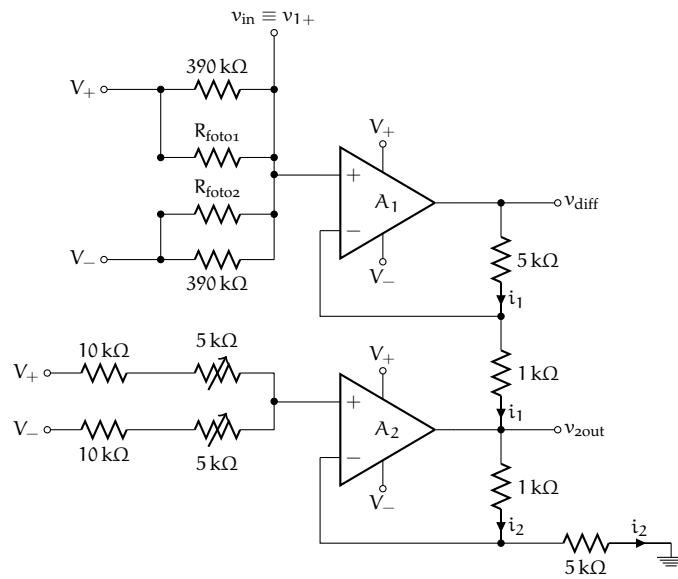


Figura 3.7: Circuito usato per ottenere un segnale in tensione che dipenda dallo sbilanciamento tra le fotoresistenze.

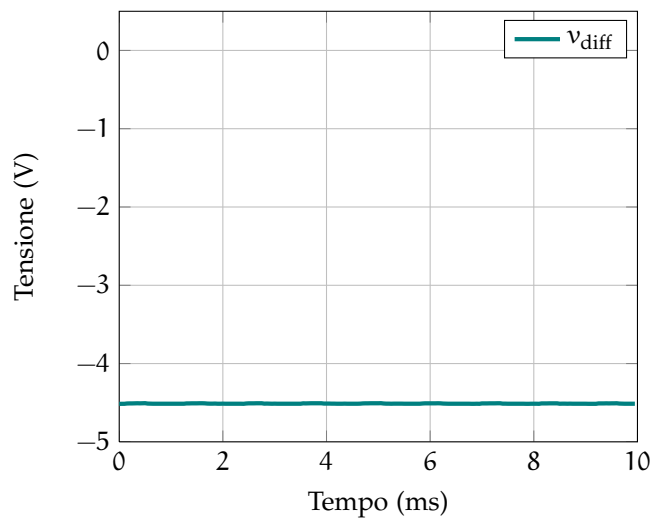


Figura 3.8: Misura della tensione  $v_{diff}$  in condizioni di illuminazione asimmetrica delle fotoresistenze.

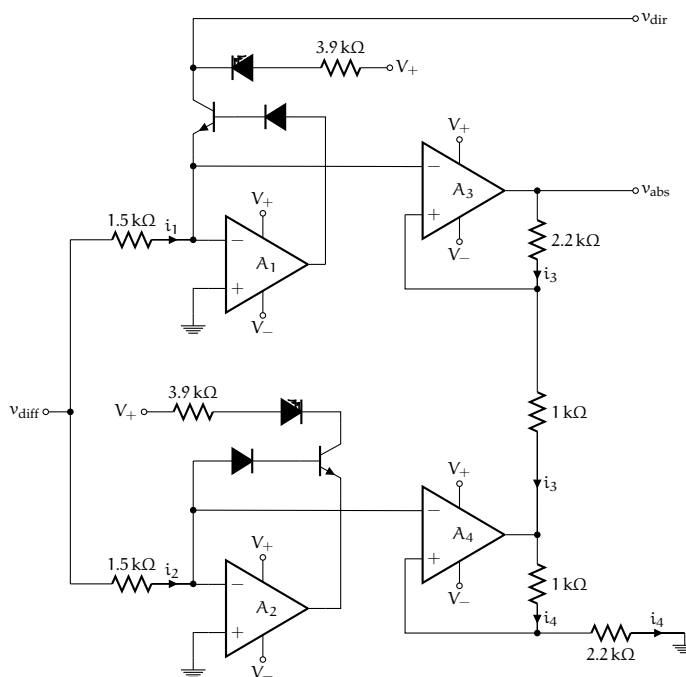


Figura 3.9: Circuito usato per ottenere i segnali di direzione e valore assoluto dello sbilanciamento per le fotoresistenze.

Nel grafico in figura 3.8 è riportata la misura della tensione  $v_{diff}$  in condizioni di illuminazione asimmetrica delle fotoresistenze. Come si può vedere il segnale è vicino alla saturazione dell'operazionale: si misura  $v_{diff} = -4.5\text{ V}$ .

*Direzione e valore assoluto*

In figura 3.9 è schematizzato il circuito che fornisce il segnale di direzione  $v_{dir}$  e il valore assoluto della tensione  $v_{abs}$  che sarà utilizzato nell'ultimo stadio.

*Segnale di direzione*

Analizziamo inizialmente la parte del circuito che fornisce il segnale direzionale e cioè quella dell'amplificatore  $A_1$ . Nel caso in cui  $v_{diff} < 0$  la corrente  $i_1$  è negativa e può scorrere lungo il nodo di feedback, quindi per il principio del cortocircuito virtuale  $v_{1-} = v_{1+} = 0\text{ V}$ . Per le proprietà dei transistor la corrente di collettore è circa uguale a quella di emettitore ed in questo caso corrisponde a  $i_1 = v_{diff}/1.5\text{ k}\Omega$ .

Per  $v_{diff} < 0$  si trova quindi  $v_{dir} = V_+ - |i_1|3.9\text{ k}\Omega - V_d$  che, con  $V_+ = 5\text{ V}$  e  $V_d = 0.6\text{ V}$ , porta a

$$v_{dir} \simeq 4.4\text{ V} - 2.6|v_{diff}|$$

con limite inferiore dato da  $v_{1-} = 0\text{ V}$ . Visto che  $|v_{diff}|$  è quasi sempre uguale a  $5\text{ V}$  si può assumere che lontano dall'equilibrio tra le fotoresistenze e per  $v_{diff} < 0$  la tensione  $v_{dir}$  è nulla.

Per  $v_{diff} > 0$  la corrente dovrebbe entrare nel transistor attraverso l'emettitore il che non può avvenire. Di conseguenza non ci sono correnti che attraversano il led e la resistenza da  $3.9\text{ k}\Omega$  e quindi non c'è caduta di potenziale tra  $V_+$  e  $v_{dir}$ , cioè  $v_{dir} = 5\text{ V}$ .

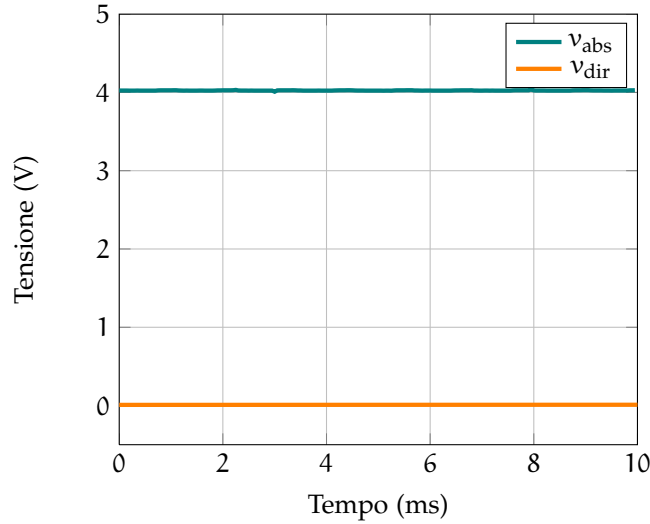


Figura 3.10: Misura delle tensioni  $v_{abs}$  e  $v_{dir}$  in condizioni di illuminazione asimmetrica delle fotoresistenze.

Usando il fatto che il segno di  $v_{diff}$  è uguale a quello di  $v_{in}$  e ricordando l'equazione 3.1, il segnale di direzione si comporta nel seguente modo:

$$v_{dir} = \begin{cases} 0 \text{ V} & \text{se } R_{foto2} < R_{foto1} \\ V_+ \equiv 5 \text{ V} & \text{se } R_{foto1} < R_{foto2} \end{cases}$$

Il valore assoluto  $v_{abs}$  di  $v_{diff}$  si ottiene con ragionamenti analoghi a quelli fatti sinora si trova che:

*Valore assoluto dello sbilanciamento*

$$\begin{aligned} \text{se } v_{diff} < 0 \text{ allora } & \begin{cases} v_{3-} = v_{3+} = 0 \text{ V} \\ v_{4-} = v_{4+} = v_{diff} < 0 \end{cases} \\ \text{se } v_{diff} > 0 \text{ allora } & \begin{cases} v_{3-} = v_{3+} = v_{diff} > 0 \\ v_{4-} = v_{4+} = 0 \text{ V} \end{cases} \end{aligned}$$

La rete costituita dagli amplificatori operazionali  $A_3$  e  $A_4$  è uguale a quella di figura 3.7 a pagina 45 e si può procedere allo stesso modo trovando

$$v_{abs} = 3.2|v_{diff}| \quad \text{per ogni } v_{diff}$$

Quindi questo circuito restituisce il valore assoluto dell'ingresso amplificandolo di un fattore costante, indipendentemente dal segno di  $v_{diff}$ .

In figura 3.10 si riporta il risultato della misura di  $v_{abs}$  se all'ingresso c'è il segnale  $v_{diff}$  di figura 3.8. Come si nota il segno di  $v_{abs}$  è positivo e l'ampiezza è prossima al valore di saturazione: si registrano circa 4V che evidenziano una leggera attenuazione rispetto a  $|v_{diff}|$  probabilmente dovuta alla prossimità dei segnali ai valori di saturazione.

La tensione di direzione conferma che per valori negativi di  $v_{diff}$  si ottiene un segnale  $v_{dir} \simeq 0 \text{ V}$ .

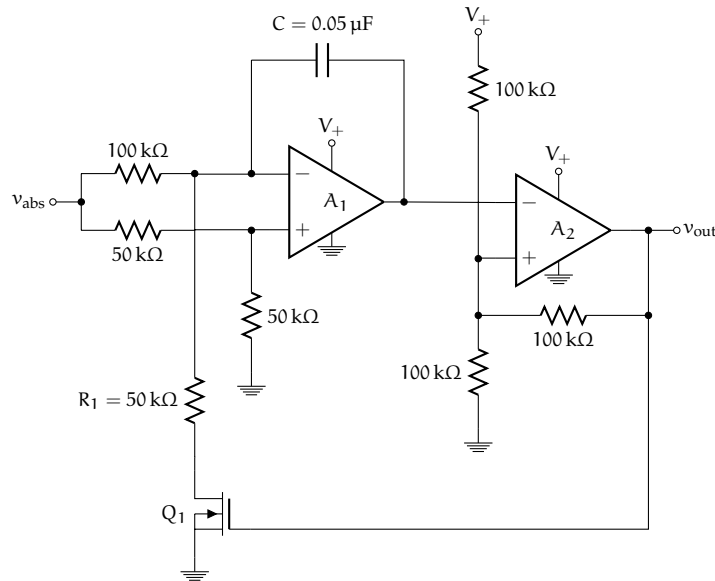


Figura 3.11: Schema del circuito di conversione di tensione in segnale in frequenza [11].

#### Conversione tensione-frequenza

Il circuito in figura 3.11 restituisce un segnale in frequenza dipendente dalla tensione di ingresso secondo l'espressione:

$$f = 150 \frac{v_{\text{abs}}}{V_+} \text{Hz}$$

con  $v_{\text{abs}}$  tra  $0\text{V}$  e  $2(V_+ - 1.5\text{V}) = 7\text{V}$  per  $V_+ = 5\text{V}$ .

L'amplificatore  $A_1$  è un integratore ed è configurato in modo che la corrente che attraversa la capacità cambi direzione, ma non il modulo, nel momento in cui  $Q_1$  conduce. L'amplificatore  $A_2$  è invece connesso come trigger Schmitt con soglie di  $V_+/3$  e  $2V_+/3$ . Il mosfet  $Q_1$  si comporta come un interruttore: quando  $v_{\text{out}} = V_+$  allora l'interruttore è chiuso e il terminale inferiore di  $R_1$  è a massa. Quando  $v_{\text{out}} = 0\text{V}$  allora l'interruttore è aperto e il terminale inferiore di  $R_1$  è aperto.

Per l'inseguimento rapido è stata sostituita la capacità  $C$  con una da  $12\text{nF}$  in modo da portare la frequenza massima del segnale di uscita ( $v_{\text{abs}} \simeq V_+$ ) da  $150\text{Hz}$  a circa  $\frac{50\text{nF}}{12\text{nF}} 150\text{Hz} = 625\text{Hz}$ .

Anche qui si riporta una misura effettuata con all'ingresso il segnale  $v_{\text{abs}}$  di figura 3.10. Si misura un periodo del segnale di  $1.6\text{ms}$  a cui corrisponde una frequenza  $625\text{Hz}$  in accordo con le previsioni e più che sufficiente ad un posizionamento rapido.

Per maggiori dettagli su questo circuito si veda [11].

### 3.5 INSEGUIMENTO FINE

Per l'orientamento fine si usa un dispositivo come quello rappresentato in figura 3.13b. Si tratta di un tubo di lunghezza  $l = 30\text{cm}$  e



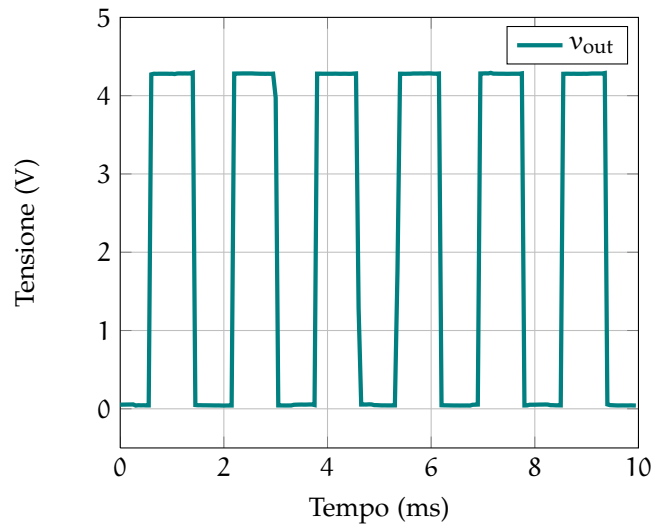


Figura 3.12: Misura della tensione  $v_{out}$  in condizioni di illuminazione asimmetrica delle fotoresistenze.

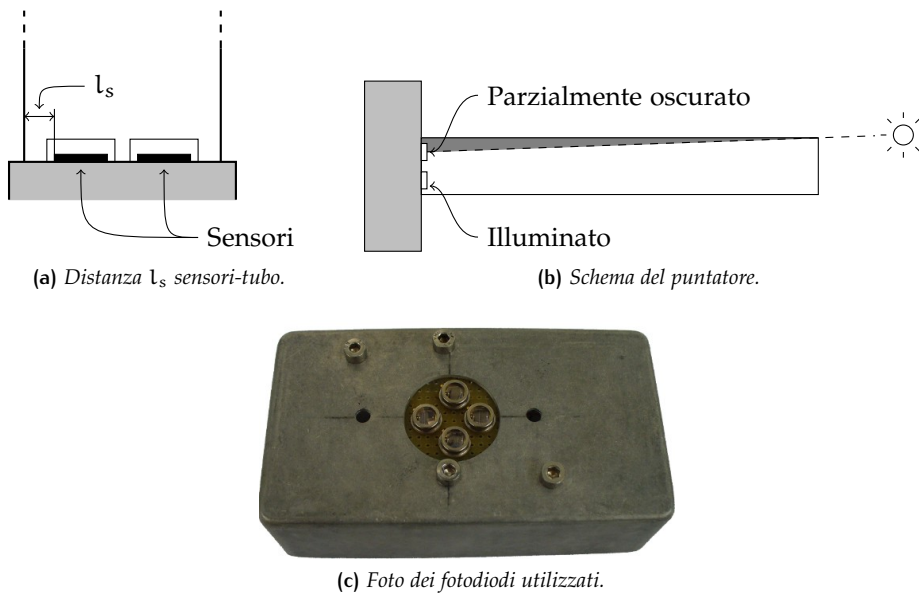


Figura 3.13: Schematizzazione del dispositivo di puntamento fine.

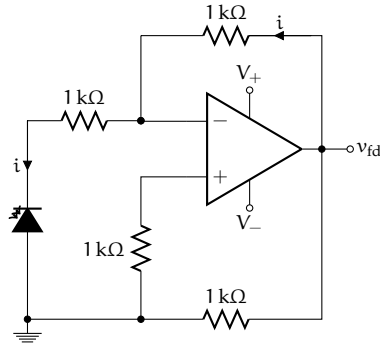


Figura 3.14: Circuito usato per ottenere un segnale in tensione dalla corrente generata dai fotodiodi.

diametro  $d = 3 \text{ cm}$  al cui interno trovano posto quattro fotodiodi: due per ogni grado di libertà della montatura, in analogia con quanto fatto per la piramide.

*Precisione del puntatore*

Per stimare la precisione del puntatore si supponga che il sistema si trovi in condizioni di luminosità uniforme (allineamento perfetto con il sole) e che esso risponda nel momento in cui uno dei fotodiodi (più precisamente il sensore in esso contenuto) inizi a venir oscurato.

L'angolo all'interno del quale il sistema risulta in equilibrio e cioè che assicura una luminosità uniforme su entrambi i sensori è dato da

$$\theta = \pm \tan^{-1} \left( \frac{l_s}{l} \right)$$

con  $l$  lunghezza del tubo e  $l_s$  distanza tra il tubo ed il sensore (vedi figura 3.13a). Invertendo l'espressione si trova la condizione a cui deve soddisfare  $l_s$  affinché  $\theta$  sia minore di un certo valore  $\theta_{\max}$ :

$$l_s < l \cdot \tan \left( \frac{\theta_{\max}}{2} \right)$$

Il puntatore mostrato nella foto in figura 3.13c è quello qui utilizzato e privato del tubo. Si misura  $l_s = 2.5 \text{ mm}$  circa e quindi risulta  $\theta = \pm 0.5^\circ$ .

*Segnale in tensione del fotodiodo*

Approssimiamo il fotodiodo con un generatore di corrente dipendente dall'intensità della luce che lo colpisce. Per ottenere un segnale in tensione si usa il circuito in figura 3.14. I due ingressi dell'amplificatore sono a massa e quindi la tensione di uscita è data da

$$v_{fd} = i \cdot 1 \text{ k}\Omega$$

ed è proporzionale alla corrente generata dal fotodiodo.

Come al solito si riporta in figura 3.15 una misura della tensione  $v_{fd}$  caratterizzata da una tensione di  $1.05 \text{ V}$  circa.

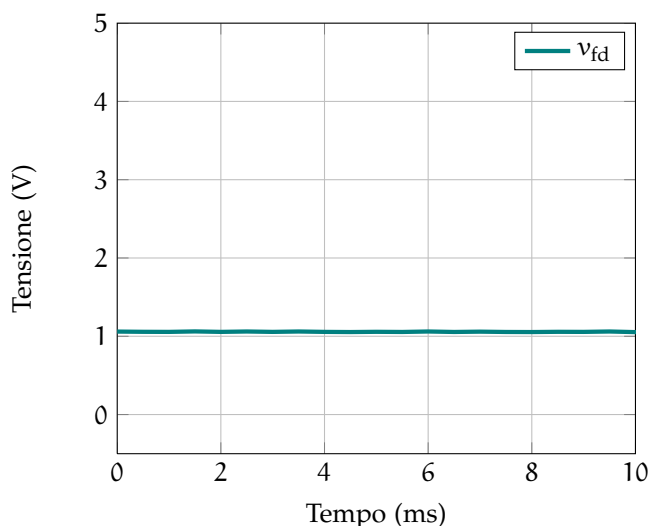


Figura 3.15: Misura della tensione  $v_{fd}$  per un fotodiode illuminato.

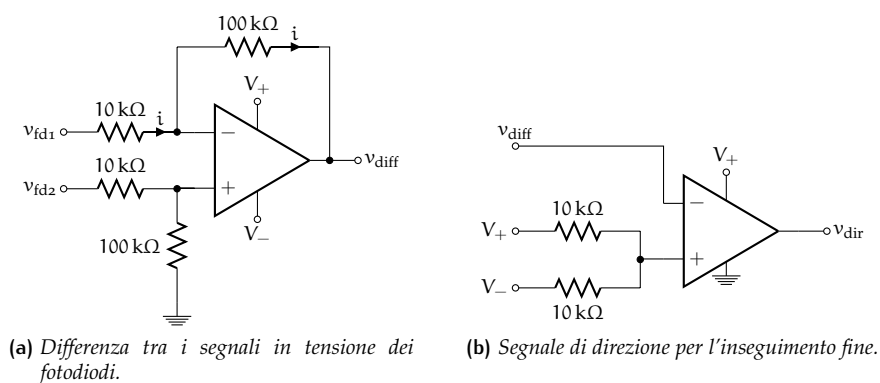


Figura 3.16: Differenza tra fotodiodi e segnale di direzione.

#### Sbilanciamento dei fotodiodi e segnale di direzione

Consideriamo uno dei due assi di movimento. La coppia di fotodiodi ad esso associata fornisce, attraverso due circuiti come quello in figura 3.14, due segnali in tensione  $v_{fd1}$  e  $v_{fd2}$ .

Con l'amplificatore differenziale di figura 3.16a si ricava la tensione  $v_{diff}$  che dipende dallo sbilanciamento tra i due fotodiodi. I due ingressi si portano alla tensione

$$v_- = v_+ = \frac{10}{11}v_{fd2}$$

La corrente che attraversa il ramo di retroazione è  $i = (v_{fd1} - v_-)/10 \text{ k}\Omega$  e quindi in uscita si ottiene

$$v_{diff} = v_- - 100 \text{ k}\Omega \cdot i = 10(v_{fd2} - v_{fd1})$$

Per ottenere un segnale di direzione si usa il comparatore di figura 3.16b. La tensione  $v_{diff}$  viene connessa all'ingresso invertente del

Segnale di sbilanciamento

Segnale di direzione

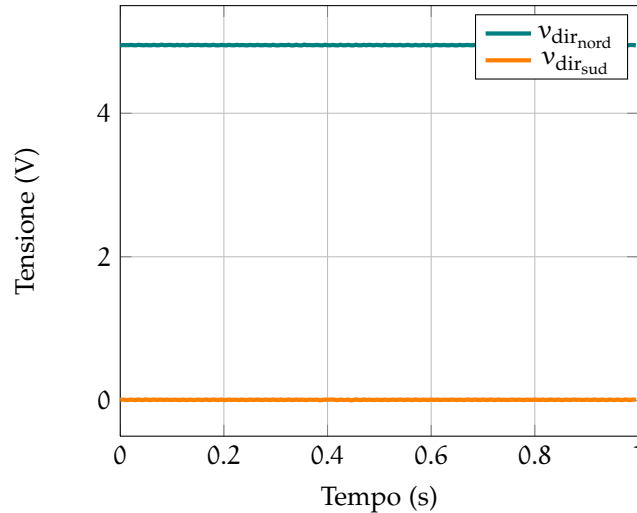


Figura 3.17: Misura della tensione  $v_{dir}$  in condizioni di illuminazione asimmetrica dei fotodiodi per entrambe le direzioni.

comparatore. All'ingresso non invertente si trova invece un partitore di tensione in modo da ottenere un'isteresi ed evitare oscillazioni dell'uscita in caso di equilibrio tra i fotodiodi ( $v_{diff} \simeq 0V$ ). Come risultato si ha che la tensione  $v_{dir}$  può assumere solo i valori di alimentazione dell'amplificatore operazionale. In termini di segnale proveniente dal circuito in figura 3.14 si ha

$$v_{dir} = \begin{cases} V_+ \equiv 5V & \text{se } v_{fd1} < v_{fd2} \\ V_- \equiv 0V & \text{se } v_{fd1} > v_{fd2} \end{cases}$$

In figura 3.17 sono riportate le misure per entrambi i casi confermando il comportamento desiderato.

#### Valore assoluto e segnale in frequenza

Il circuito in figura 3.18 restituisce il valore assoluto  $v_{abs}$  dell'ingresso  $v_{diff}$ .

Quando  $v_{diff} < 0$  il diodo sulla retroazione di  $A_2$  conduce e quindi tutti gli ingressi degli amplificatori si portano a 0V (cortocircuiti virtuali). Allora la corrente che attraversa il ramo di retroazione di  $A_1$  è  $i_1 = v_{diff}/10k\Omega$  e  $v_{abs} = -i_1 \cdot 10k\Omega = |v_{diff}|$ .

Per  $v_{diff} > 0$  la corrente  $i_2$  è nulla perché il diodo è contropolarizzato e quindi non c'è caduta di potenziale sia ai capi di  $R_2$  che di  $R_1$  visto che  $v_{1-} = v_{1+} = v_{diff}$ . Allora  $i_1$  è nulla e  $v_{abs} = v_{diff} = |v_{diff}|$  anche in questo caso.

In conclusione

$$v_{abs} = |v_{diff}| \quad \text{per ogni valore di } v_{diff}.$$

In figura 3.19 si trovano le misure per  $v_{diff}$  e la corrispondente  $v_{abs}$ . Dato l'ingresso  $v_{diff} = -4.4V$  si ottiene in uscita la tensione  $v_{abs} = 3.6V$ . Similmente a quanto trovato per il circuito in figura 3.9 si registra un'attenuazione del segnale di uscita.

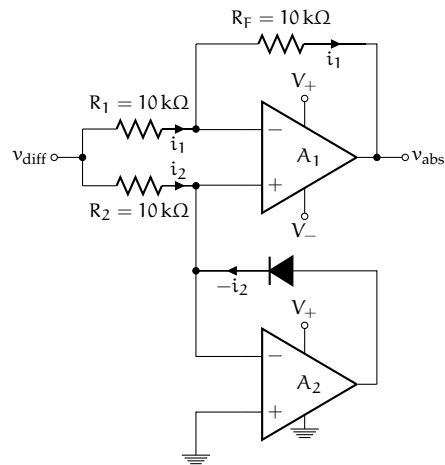


Figura 3.18: Valore assoluto dello sbilanciamento dei fotodiodi [12].

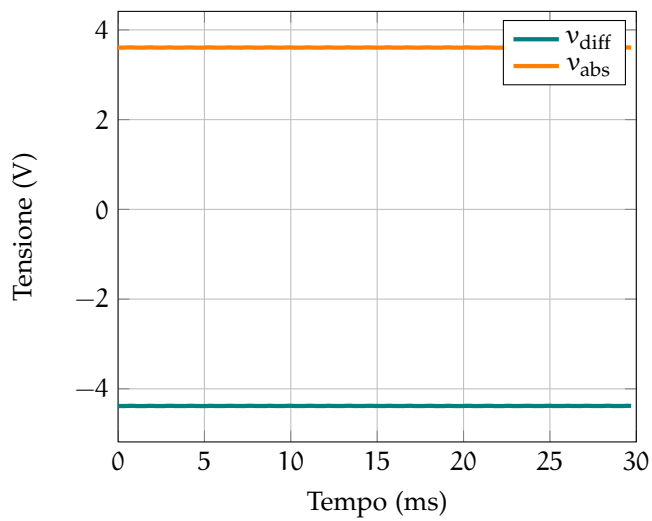


Figura 3.19: Segnale del valore assoluto  $v_{abs}$  e dell'ingresso corrispondente  $v_{diff}$ .

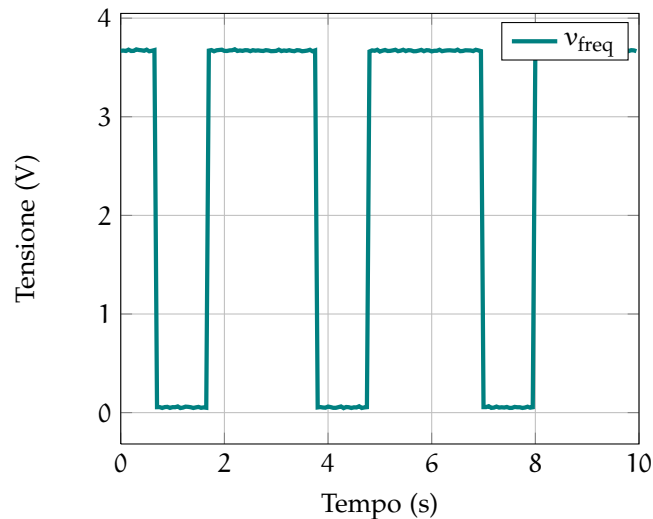


Figura 3.20: Segnale di frequenza in uscita dal circuito per fotodiodi oscurati in modo simmetrico. Notare che la scala è espressa in secondi.

Per il segnale in frequenza si è usato lo stesso circuito di figura 3.11 con l'utilizzo di una capacità  $C = 0.05 \mu\text{F}$ .

La velocità media del sole richiede che la frequenza di uscita del circuito sia  $f \simeq 15 \text{ Hz}$  in condizioni di equilibrio. Una misura dell'uscita fatta oscurando entrambi i fotodiodi e quindi in condizioni di simmetria è riportata in figura 3.20. Si ottiene un periodo di 3.1 s a cui corrisponde una frequenza di appena 0.3 Hz. In condizioni di equilibrio dell'angolo Nord-Sud (che varia molto più lentamente di quello Est-Ovest) il motore viene pressoché fermato.

Con una forte asimmetria nell'illuminazione dei fotodiodi si ottiene invece un segnale del tipo riportato in figura 3.21 dove si trova un periodo di 7.4 ms e quindi una frequenza di 135 Hz quindi dieci volte superiore a quella richiesta per inseguire il sole ed adeguata al posizionamento in condizioni di non equilibrio.

## 3.6 POSIZIONAMENTO SOFTWARE E MANUALE

È necessario predisporre un controllo dell'orientamento della montatura che non dipenda dagli inseguitori descritti sopra in modo da posizionare il concentratore a piacimento nel momento in cui non si effettua un inseguimento solare. Per questo motivo si è implementato un sistema di posizionamento software e un altro manuale (di emergenza) che permette di prendere il controllo dei motori.

### 3.6.1 Segnale di frequenza

Il segnale in frequenza che determina la velocità di rotazione dei motori passo-passo potrebbe venir generata da una delle schede Labview a disposizione. Per non impegnare un canale di uscita ed evitare l'ap-

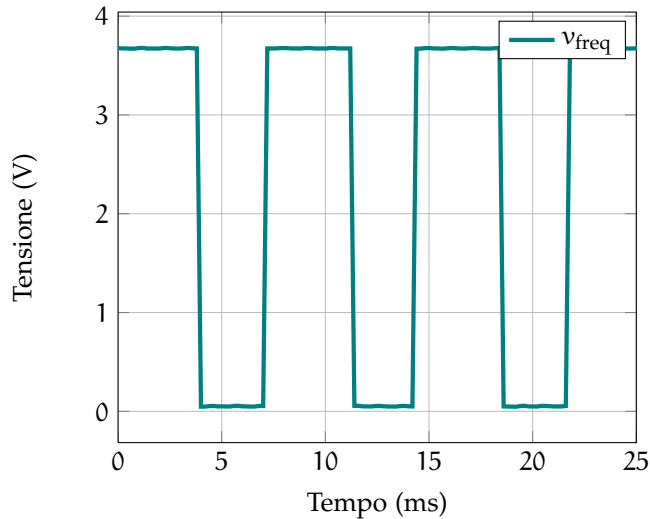


Figura 3.21: Segnale di frequenza in uscita dal circuito per fotodiodi illuminati in modo asimmetrico.

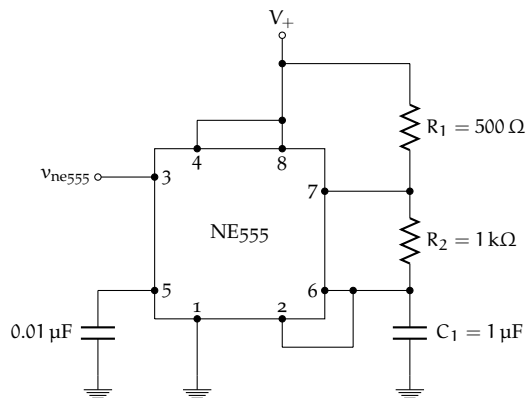


Figura 3.22: Schema di collegamento del temporizzatore NE555 che permette di ottenere un segnale di onda quadra nell'uscita  $v_{ne555}$ .

pesantimento del sistema di controllo e misura, si preferisce usare il temporizzatore NE555 nella configurazione in figura 3.22.

La documentazione tecnica del componente fornisce la formula per il calcolo della frequenza in funzione dei componenti:

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1}$$

Con i componenti dimensionati come nello schema si ottiene  $f = 576 \text{ Hz}$ . Per avere maggior flessibilità si è sostituita la resistenza  $R_2$  con un potenziometro e quindi si è diminuita la resistenza tra i piedini 6 e 7 in modo da incrementare a piacimento la frequenza rispetto al valore calcolato. In figura 3.23 si vede l'onda quadra generata dal circuito così ottenuto. Si misurano un periodo di  $1.1 \text{ ms}$  e quindi una frequenza di  $910 \text{ Hz}$  che assicura una velocità di rotazione di  $910^\circ \text{ h}^{-1}$ .

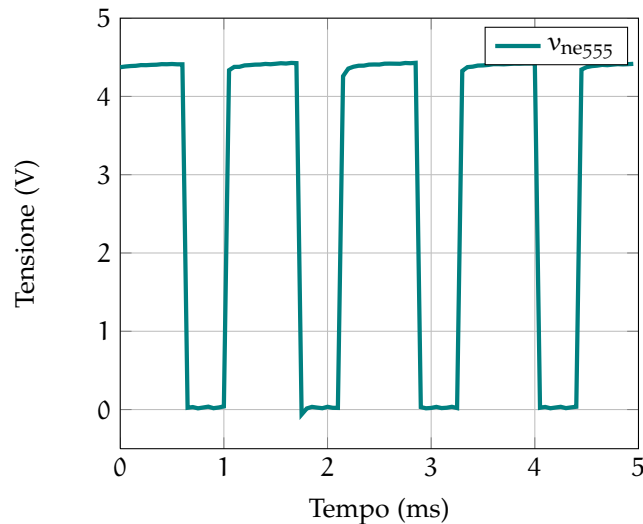


Figura 3.23: Misura della tensione  $v_{ne555}$  in uscita del circuito di generazione di onde quadre.

### 3.6.2 Segnale di direzione software

Il segnale di direzione viene fornito dal software di controllo attraverso una delle porte della scheda Labview NI-9403 mostrata in figura 3.24a dotata di 32 canali di ingresso e uscita digitale e con logica di tipo TTL. Il segnale di direzione viene impostato attraverso l'interfaccia grafica con un boolean (uno switch). In figura 3.24b si può vedere l'interfaccia di controllo via software. Si noti che è presente un pulsante di attivazione del controllo con Labview che genera un segnale da passare al PIC.

### 3.6.3 Controllo manuale

Nel controllo manuale il segnale di frequenza utilizzato è sempre quello generato dal temporizzatore NE555.

Il segnale di direzione è invece determinato da uno switch che permette di selezionare per la tensione di uscita  $v_{dir}$  i valori 5V e 0V.

Come per il controllo software, è necessario richiedere il controllo di posizionamento al PIC per mezzo di un segnale. Quest'ultimo viene generato da un flip-flop comandato con un semplice pulsante.

## 3.7 IL PIC E IL MULTIPLEXER

Come si è visto i segnali di direzione e velocità che possono comandare i motori passo-passo provengono da quattro diversi dispositivi: puntamento fine (fotodiodi), puntamento veloce (fotoresistenze), controllo software e manuale.

La selezione di quale dei quattro segnali è da usare per orientare il concentratore è effettuata dal PIC insieme al multiplexer.



### 3.8 APPARATO DI MISURA DEGLI ANGOLI

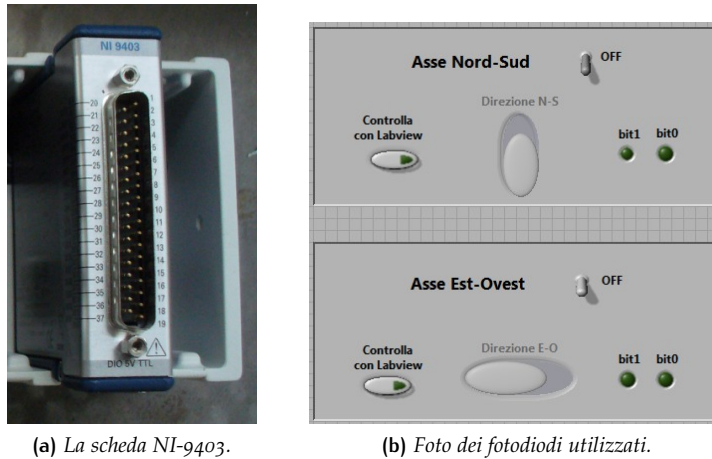


Figura 3.24: Scheda NI-9403 di input/output logico usata per generare il segnale di direzione a sinistra e interfaccia di posizionamento a destra.

Il multiplexer utilizzato integra due linee a quattro canali: in una delle linee vengono portati i segnali di direzione, nell'altra i segnali di velocità corrispondenti. L'uscita del multiplexer è collegata direttamente al driver che controlla i motori. La selezione di quale dei quattro canali deve essere riprodotto all'uscita è fatta dal PIC che esegue il programma riportato in appendice A.

Il programma determina una gerarchia per i dispositivi di controllo: il controllo manuale prevale sugli altri, l'interfaccia software prevale sugli inseguitori, gli inseguitori (piramide e puntatore) prendono il controllo solo se questo non è richiesto dagli altri due dispositivi.

Se il controllo è affidato agli inseguitori il PIC effettua una lettura delle tensioni  $v_{fd}$  dei fotodiodi per mezzo degli ingressi ADC. Se queste sono inferiori ad una soglia minima significa che i fotodiodi non sono illuminati e che il puntatore fine non è allineato; allora vengono passati al driver direzione e velocità provenienti dalla piramide. Se uno dei fotodiodi è illuminato e  $v_{fd}$  supera la soglia allora il controllo dei motori passa al circuito relativo al puntamento fine.

## 3.8 APPARATO DI MISURA DEGLI ANGOLI

### 3.8.1 L'encoder

Il rilevamento dell'orientazione della montatura viene fatto misurando gli angoli di rotazione per i due assi con l'utilizzo di due encoder di cui se ne mostra una foto in figura 3.25.

Un encoder è un dispositivo che restituisce un certo numero di segnali logici (nbit) in funzione dell'angolo di rotazione del perno centrale rispetto alla struttura esterna.

Quello a disposizione è un encoder assoluto, cioè l'angolo non viene azzarato quando si disconnette e riconnette il dispositivo. La codifica



Figura 3.25: Foto di uno degli encoder utilizzati per la lettura degli angoli. Al centro il perno fissato all'asse di rotazione e a destra il connettore per la lettura del codice gray.



Figura 3.26: Scheda di input/output Labview USB-6501 utilizzata per la lettura degli angoli.

dell'angolo è a 12 bit con segnale in uscita in codice Gray. Dal numero di bit si trova che il numero di punti in tutto l'angolo giro è  $N = 2^{12} = 4096$  quindi la risoluzione angolare è

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{N} \simeq 0.088^\circ$$

cioè inferiore alla precisione di  $0.1^\circ$  richiesta per il sistema di inseguimento.

### 3.8.2 Programma di lettura

La lettura dei 12 bit in uscita dall'encoder viene fatta per mezzo della scheda di acquisizione USB-6501 mostrata in figura 3.26 e che presenta le seguenti caratteristiche:

- 24 canali digitali sia di ingresso che uscita;
- timer a 32 bit;
- compatibile con segnali logici di tipo TTL.

Il codice Gray impiegato per la codifica degli angoli nell'encoder si distingue rispetto all'usuale codice binario poiché l'incremento di

un'unità produce il cambiamento di un solo bit. Nel caso del codice binario invece il passaggio, per esempio, dal numero  $2^k - 1$  a  $2^k$  implica la modifica di  $(k + 1)$  bit.

Nel caso in cui la lettura degli nbit da parte della scheda di acquisizione avvenga nel momento del passaggio da un valore a quello successivo, il codice Gray assicura un errore massimo di  $\Delta\theta$  mentre il codice binario porterebbe a risultati imprevedibili nel caso non tutti i  $(k + 1)$  bit si siano invertiti.

La conversione da codice Gray a binario è abbastanza semplice: le cifre in binario, da sinistra a destra, si ottengono eseguendo un'operazione XOR tra la cifra del codice Gray e il risultato dello XOR precedente. La prima cifra viene riportata così com'è. Qui di seguito si riporta un semplice esempio:

```
Gray:    11010 XOR
          1001
Binario: 10011
```

Come si vede ogni cifra binaria ottenuta è riportata come secondo termine dell'operatore XOR per ottenere la cifra binaria più a destra di essa.

Ottenuto il valore binario  $n_{(2)}$  si calcola il corrispondente valore decimale  $n$  e quindi si ottiene l'angolo

$$\theta = 360^\circ \frac{n}{N}$$

La lettura e conversione in gradi è stata implementata in un programma Labview usato nel monitoraggio dell'inseguimento.



# 4 | MISURE

## INDICE

4.1	Misure di efficienza	<b>61</b>	
4.1.1	Schede assemblate nei laboratori di Padova	61	
4.1.2	Schede preassemblate da Emcore	64	
4.2	Misure di puntamento	<b>66</b>	
4.2.1	Una correzione a posteriori	68	
4.2.2	La potenza misurata	70	

## 4.1 MISURE DI EFFICIENZA

### 4.1.1 Schede assemblate nei laboratori di Padova

La misura di efficienza per le celle assemblate a Padova appositamente per questo progetto è stata fatta comandando manualmente il carico variabile in quanto le schede Labview non erano ancora disponibili. La misura di tutti i punti che compongono una curva richiedeva un tempo di alcuni minuti e il risultato è quindi affetto da inevitabili fluttuazioni di luminosità del sole.

La misura viene fatta con l'utilizzo di due schede, prima prese singolarmente (figure 4.1 e 4.2 a pagina 62) e poi collegate in serie (figura 4.3 a pagina 63).

La potenza della luce diretta proveniente dal sole durante le misure è di circa  $625 \text{ W m}^{-2}$ . Visto che il fattore di concentrazione è 500 la potenza che arriva sulle celle è di 367 soli. Visto che la superficie delle celle di una scheda è data da  $S = 6 \times 0.3 \text{ cm}^2 = 1.8 \text{ cm}^2$  si ottiene una potenza luminosa per scheda di 55 W circa.

Si sarà notata la presenza di un ginocchio nelle curve I-V dei grafici 4.1 e 4.3: è dovuto al parziale danneggiamento di una delle celle della prima scheda. Quando la corrente prodotta dalle altre celle in serie supera i 100 mA la cella danneggiata non si disattiva in quanto non è in grado di produrre la stessa potenza, entra in funzione il diodo di bypass corrispondente e quindi si verifica una caduta di potenziale di 2.5 V.

Scheda	Potenza nel MPP (W)	Efficienza
1	3.3	6 %
2	3.3	6 %
1+2	6.7	6.1 %

Tabella 4.1: Potenza massima ed efficienza delle celle assemblate nei laboratori dell'INFN di Padova.

MISURE

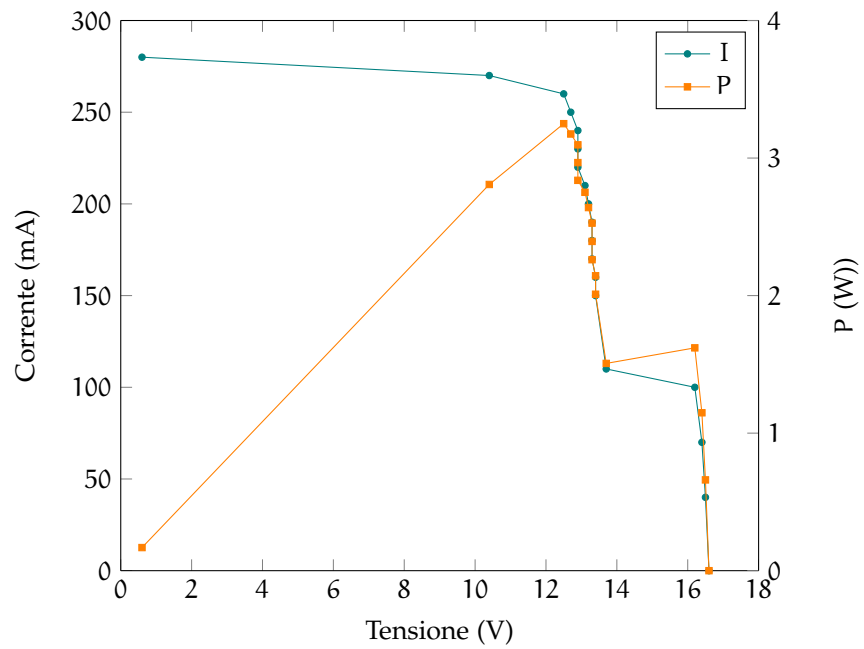


Figura 4.1: Curva I-V per la prima scheda con luce diretta di  $625 \text{ W m}^{-2}$ , fattore di concentrazione 500 a cui corrisponde una potenza di 367 soli.

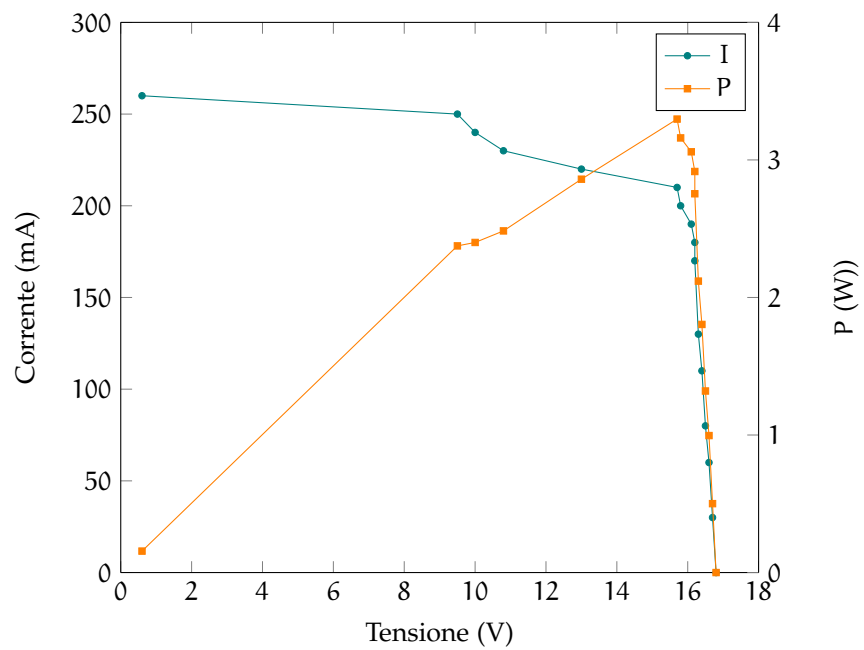


Figura 4.2: Curva I-V per la seconda scheda con luce diretta di  $625 \text{ W m}^{-2}$ , fattore di concentrazione 500 a cui corrisponde una potenza di 367 soli.

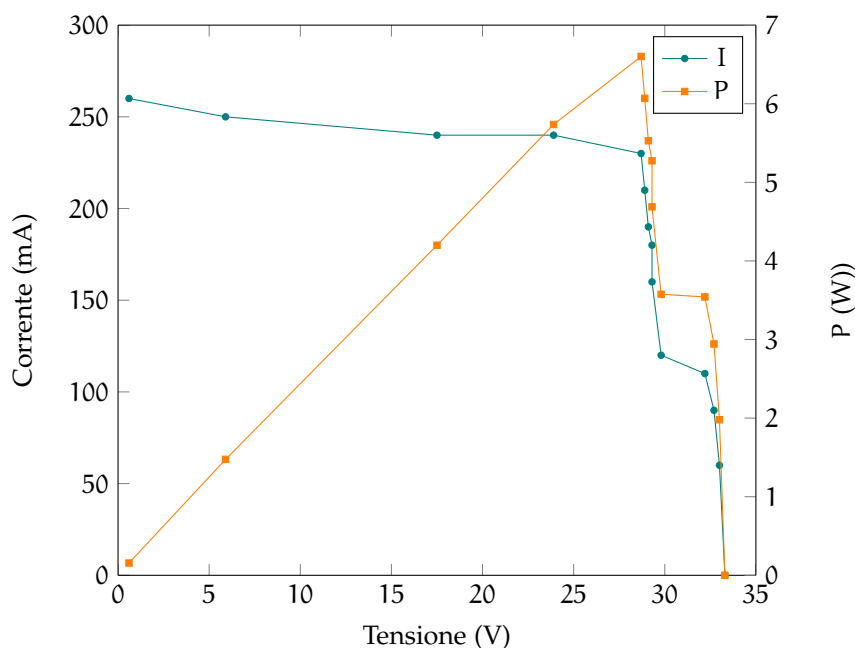


Figura 4.3: Curva I-V per le due schede in serie con luce diretta di  $625 \text{ W m}^{-2}$ , fattore di concentrazione 500 a cui corrisponde una potenza di 367 soli.

Come si può notare dai dati riportati in tabella 4.1 i risultati sono ben al di sotto delle aspettative. Il motivo è da ricercare non tanto nella qualità delle celle ma piuttosto in quella del concentratore.

Per cercare di determinare le cause della scarsa efficienza misurata si sono eseguite delle misure di riflettività di un campione dello specchio utilizzato per l'ottica primaria utilizzando un laser viola con lunghezza d'onda di 417 nm e potenza di 9.9 mW. Le prestazioni dell'alluminio Alanod di cui è composto lo specchio primario sono confrontate con quelle di uno specchio prodotto da Thorlabs (modello ME1-P01) che per la lunghezza d'onda considerata è caratterizzato da una riflettività intorno al 90%. I risultati per più angoli di incidenza sono riportati in tabella 4.2. Per il modello ME1-P01 la riflettività risulta intorno l'86% mentre per lo specchio Alanod essa varia tra il 18% ed il 27%.

Angolo (°)	ME1-P01 (mW)	Alanod (mW)
45	8.6	2.7
36	8.4	2.5
27	8.5	2.4
18	8.6	2.1
9	8.5	1.8

Tabella 4.2: Riflettività degli specchi Alanod e ME1-P01 in funzione dell'angolo di incidenza del fascio. Lunghezza d'onda di 417 nm e potenza incidente 9.9 mW

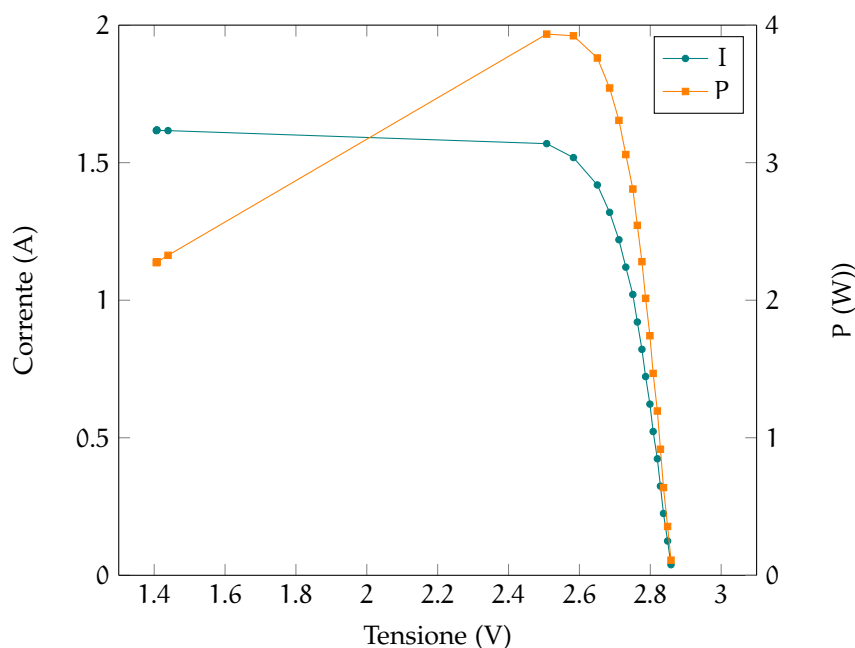


Figura 4.4: Curva I-V con luce diretta di  $640 \text{ W m}^{-2}$ , fattore di concentrazione 250 a cui corrisponde una potenza di 188 soli.

Il comportamento non cambia molto per luce con lunghezza d'onda maggiore: anche con laser rosso si è registrata una riflettività non superiore al 30%. Tali valori sono da imputare alla rugosità della superficie dello specchio, rilevabile anche ad occhio nudo.

È chiaro quindi che la scarsa efficienza di questo sistema di concentrazione è da attribuire quasi esclusivamente all'inefficienza del materiale utilizzato per lo specchio primario. Sostituendo questo componente con un altro caratterizzato da riflettività del 90% si sarebbero registrate efficienze intorno a  $\frac{0.9}{0.3}6\% = 18\%$ .

#### 4.1.2 Schede preassemblate da Emcore

La misura di corrente e tensione con queste celle è stata fatta sfruttando l'apparato messo a punto a tale scopo e descritto nel capitolo 2.

In questo caso si è usata una singola cella soggetta a diverse concentrazioni: 250, 600 e 900. La luce diretta misurata con un bolometro è di  $640 \text{ W m}^{-2}$  che corrisponde ad una potenza di 188 soli, 452 soli e 678 soli rispettivamente per i tre fattori di concentrazione scritti prima. I risultati sono rappresentati graficamente nelle figure 4.4, 4.5 e 4.6.

Come si vede ad alte concentrazioni è più problematico ottenere dei punti a basse tensioni probabilmente perché questa parte della curva risulta tanto più schiacciata quanto più si aumenta la concentrazione e quindi la variazione in corrente  $\Delta I$  necessaria per raccogliere più punti è più piccola della sensibilità degli strumenti.

In tabella 4.3 a pagina 66 si trovano le misure di potenza nel punto di massimo e l'efficienza delle celle. Contrariamente a quanto ci si aspetta l'efficienza diminuisce all'aumentare della potenza sul ricevi-



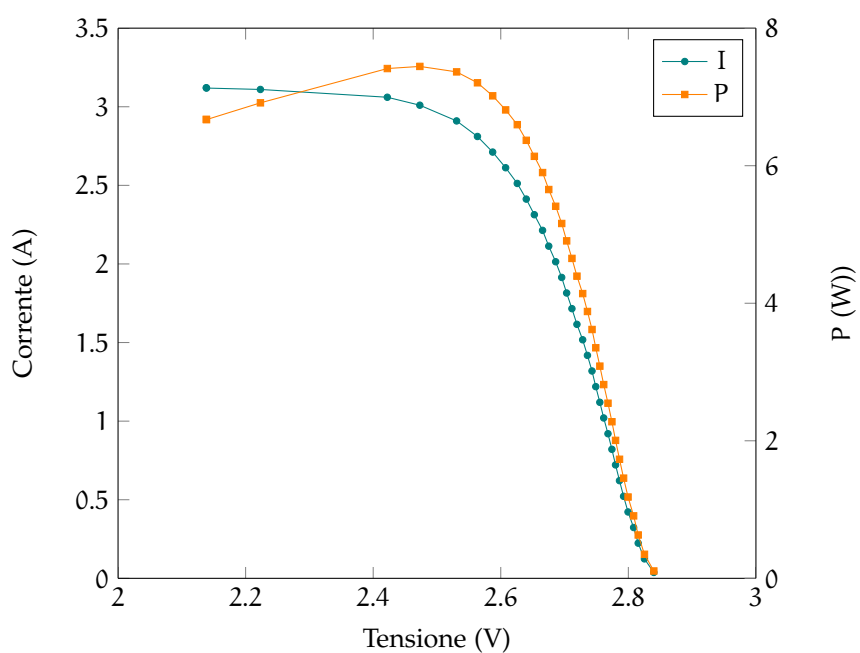


Figura 4.5: Curva I-V con luce diretta di  $640 \text{ W m}^{-2}$ , fattore di concentrazione 600 a cui corrisponde una potenza di 452 soli.

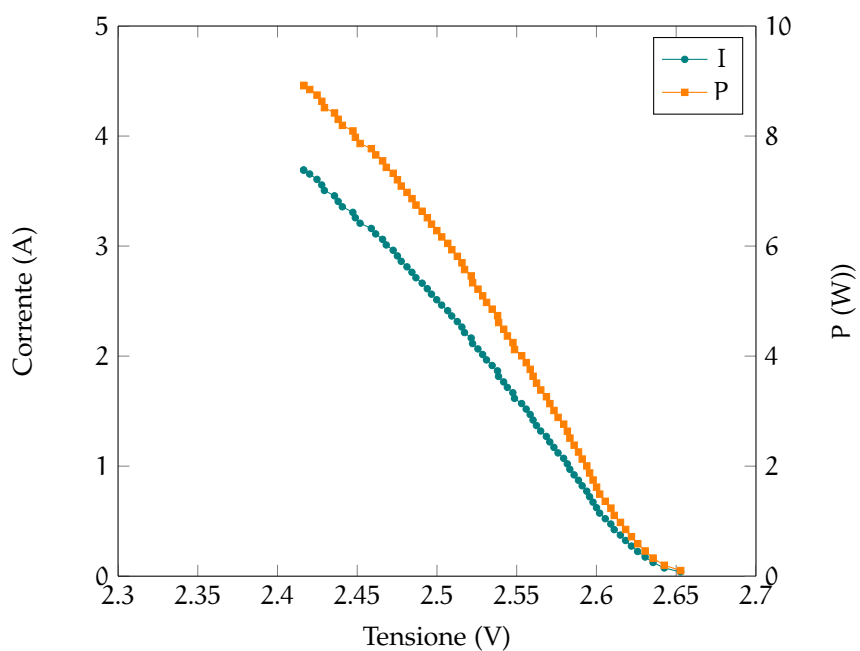


Figura 4.6: Curva I-V con luce diretta di  $640 \text{ W m}^{-2}$ , fattore di concentrazione 900 a cui corrisponde una potenza di 678 soli.

Potenza (soli)	Potenza nel MPP (W)	Efficienza
188	3.9	24.6 %
452	7.4	19.4 %
678	8.9	15.5 %

**Tabella 4.3:** Potenza massima ed efficienza della cella assemblata da Emcore. Potenza della luce diretta solare di  $640 \text{ W m}^{-2}$ . La temperatura non è costante.

tore. Il comportamento tipico di queste celle è riportato in figura 1.13 a pagina 16. Questa anomalia si può attribuire a due fatti:

**TEMPERATURA DELLA CELLA** che aumenta all'aumentare del fattore di concentrazione in assenza di un sistema di dissipazione adeguato. La cella da noi usata è caratterizzata da una perdita di efficienza  $\Delta\eta/\Delta T = 1 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

**FOCALIZZAZIONE DELLA LUCE** che può peggiorare all'aumentare del fattore di concentrazione: come si è visto nell'introduzione l'angolo di accettazione diminuisce all'aumentare del fattore C e quindi è probabile che una piccola parte della luce venga persa contribuendo alla diminuzione dell'efficienza.

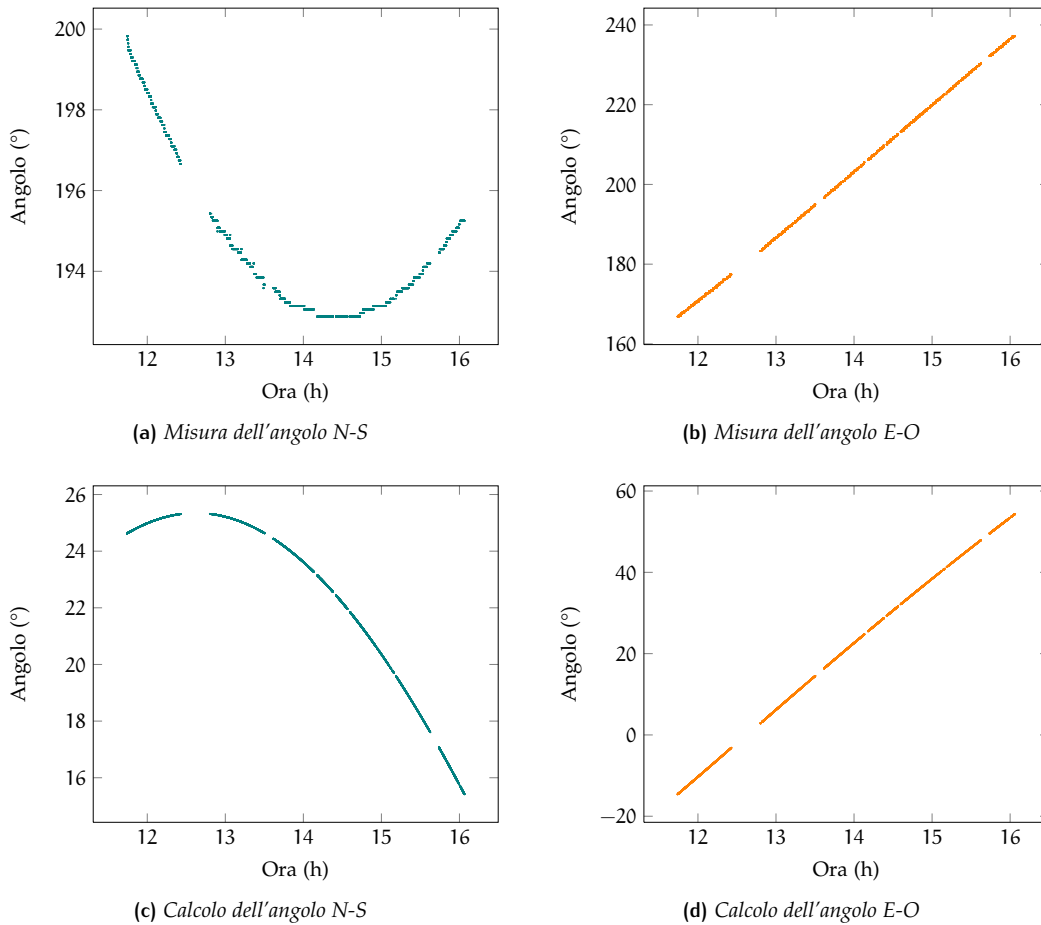
La potenza di 452 soli è molto vicina a quella di 500 soli, obiettivo di questo progetto. Si può ipotizzare che l'efficienza prossima al 20 % possa venir incrementata al 25 % in presenza di adeguati dispositivi di dissipazione termica e migliorando la focalizzazione della luce.

## 4.2 MISURE DI PUNTAMENTO

Per una misura di puntamento significativa è necessario esporre l'apparato alla luce solare per il più lungo tempo possibile. Questo richiede che le condizioni atmosferiche siano ottimali nelle ore centrali della giornata.

Purtroppo la messa a punto dell'apparato si è protratta quasi fino alla fine dell'estate. Il periodo successivo è stato caratterizzato da poche giornate completamente limpide e sgombre da nuvole. Per questo motivo verrà qui discussa una sola misura effettuata il 23 settembre: l'unico giorno utile che ha permesso di portare a termine un inseguimento per circa 4 h30 min. La corretta focalizzazione della luce sulla cella è stata controllata costantemente monitorando la potenza da essa generata. In caso di errata focalizzazione si è intervenuti correggendo il puntamento. Nell'arco di tutta la fase di inseguimento è stato necessario intervenire tre volte in questo senso; questo non deve stupire visto che la tolleranza angolare del puntatore è cinque volte maggiore di quella richiesta dal sistema ottico.

Gli angoli misurati sono l'azimut  $A'$  e l'altezza  $h'$  relativi all'asse Est-Ovest e Nord-Sud rispettivamente di cui si è parlato nel capitolo 3 e relativi al sistema di coordinate della montatura. Essi non corrispondono quindi all'alzo e all'angolo orario del sole: è importante tenerne conto per interpretare correttamente i dati che verranno presentati.

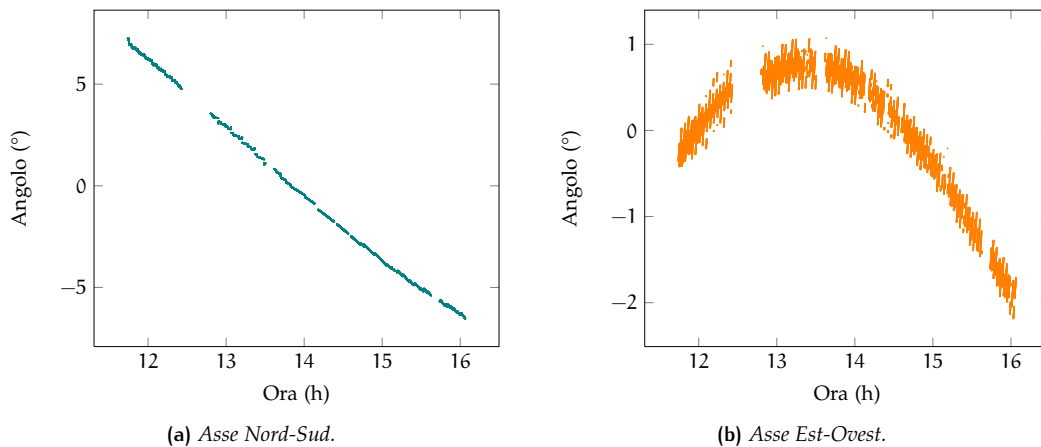


**Figura 4.7:** Misura (sopra) e valori calcolati (sotto) per gli angoli Nord-Sud (a sinistra) ed Est-Ovest (a destra).

Nelle quattro figure 4.7 sono riportati gli angoli misurati con gli encoder (sopra) e quelli calcolati tenendo conto del moto apparente del sole (sotto). Nel confronto tra valori misurati e calcolati si deve considerare che la misura degli angoli con gli encoder include un offset. Un controllo del corretto inseguimento può essere fatto osservando le differenze tra angoli misurati ed angoli calcolati.

Un primo sguardo delle figure 4.7b e 4.7d permette di dire che l'accordo per l'asse Est-Ovest è buono. Non si può dire altrettanto per l'asse Nord-Sud (figure 4.7a e 4.7c). La diversa orientazione della curva è dovuta semplicemente al fatto che l'encoder è stato posizionato sul lato più comodo per il collegamento della strumentazione anziché su quello che assicura il corretto verso di rotazione dell'angolo Nord-Sud. Desto invece sorpresa il fatto che l'angolo misurato per quest'asse aumenti dall'inizio dell'acquisizione fino alle ore 14 h30 min quando si sa che il sole raggiunge il massimo di altezza a mezzogiorno circa (esattamente a mezzogiorno solo se l'ora è espressa in tempo solare). Si è indotti a sospettare della presenza di un errore sistematico nella misura di quest'angolo.

## MISURE



**Figura 4.8:** Scostamento dell'angolo calcolato da quello misurato per l'asse Nord-Sud a sinistra ed Est-Ovest a destra. Viene introdotto un offset in modo che la media dei dati sia di  $0^\circ$ .

In figura 4.8b è riportata la differenza tra l'angolo Est-Ovest previsto e quello misurato azzerando l'offset del primo dato. La differenza tra i due è compresa in un range di  $3.5^\circ$ . La deviazione standard per questa serie di dati è  $\sigma_{EO} = 0.77^\circ$ .

Il grafico in figura 4.8a evidenzia la presenza di un errore sistematico nella determinazione dell'angolo Nord-Sud da parte degli encoder con una deriva quasi lineare dal valore calcolato. La deviazione standard in questo caso risulta naturalmente molto alta:  $\sigma_{NS} = 4^\circ$ .

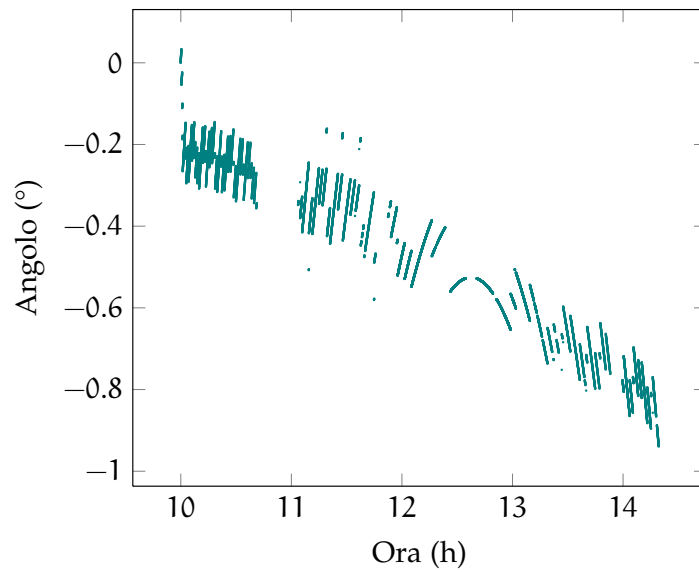
L'assenza di ulteriori giornate sufficientemente serene ha reso difficile l'approfondimento di questo scostamento delle misure dalle previsioni.

### 4.2.1 Una correzione a posteriori

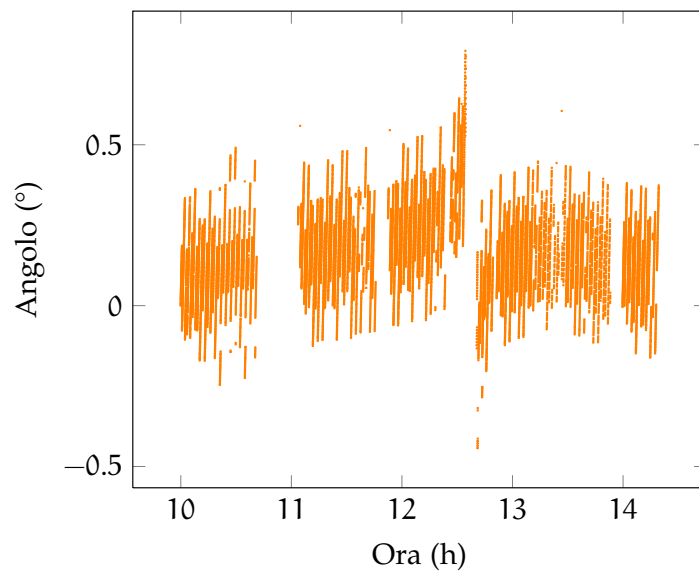
Osservando i grafici 4.7a e 4.7c si è già fatto notare che il punto di minimo nel primo caso e massimo nel secondo dovrebbero corrispondere al momento in cui il sole raggiunge l'altezza massima nel cielo e cioè a mezzogiorno circa.

La misura dell'angolo Nord-Sud raggiunge il minimo alle 14 h 32 min mentre il valore calcolato raggiunge il massimo alle 12 h 48 min. Una correzione a posteriori dell'errore sistematico osservato può essere fatta facendo coincidere questi due istanti di tempo con una traslazione temporale di un'ora e 44 minuti e cioè ricalcolando i valori di previsione angolare per un tempo  $t_{\text{new}} = t_{\text{old}} - 104 \text{ min}$ . Dal risultato ottenuto si trova che un'ulteriore correzione a posteriori può essere fatta modificando l'inclinazione della montatura da  $110^\circ$  a  $108.5^\circ$ .

In figura 4.9 sono rappresentati i valori così ottenuti per gli scarti tra angoli misurati e calcolati e come si può vedere il risultato è migliore per entrambi gli angoli. In particolare le deviazioni standard si riducono a  $\sigma_{EO} = 0.14^\circ$  per l'angolo Est-Ovest  $\sigma_{NS} = 0.19^\circ$  per quello Nord-Sud avvicinando quindi la precisione richiesta per il sistema di



(a) Scostamento calcolo-misura per l'asse Nord-Sud.



(b) Scostamento calcolo-misura per l'asse Est-Ovest.

**Figura 4.9:** Scostamenti tra angoli misurati e calcolati. È applicata la traslazione temporale di un'ora e 44 minuti nel computo dell'angolo previsto.

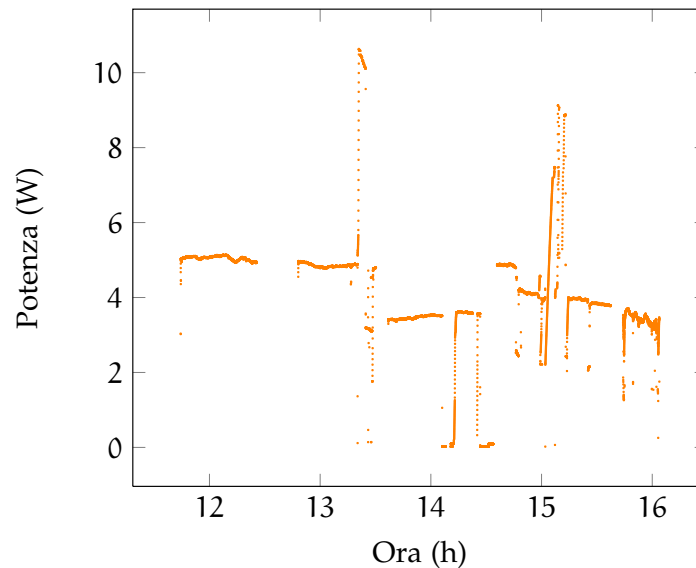


Figura 4.10: Potenza in funzione dell'ora locale. Le grandi fluttuazioni osservabili sono da ricondurre alla necessità di effettuare altre misure che richiedono interventi sul concentratore.

puntamento.

Una correzione più plausibile si può trovare in appendice B a pagina 79.

#### 4.2.2 La potenza misurata

L'efficacia o meno del sistema di inseguimento non è tanto determinata dalla corrispondenza tra la posizione del sole calcolata e quella misurata, ma piuttosto dalla focalizzazione o meno della luce solare sulla cella durante l'inseguimento.

In figura 4.10 sono riportati i dati relativi alla potenza generata dalla cella. Si tenga conto che durante l'inseguimento sono state effettuate rilevazioni di curve I-V intervenendo di tanto in tanto sull'ottica per variare il fattore di concentrazione.

Nella fase iniziale di inseguimento si può notare una focalizzazione corretta per circa 1 h36 min anche se interrotta nel mezzo a causa di un problema software sorto durante l'acquisizione. Seguono alcune fluttuazioni a cui corrispondono interventi sullo specchio e una correzione nel puntamento. Quindi l'inseguimento procede fino alla fine della misura ma con altre due correzioni del puntamento alle 14 h13 min e 14 h36 min; le successive fluttuazioni nella potenza sono dovute alle misure di curve I-V in corrispondenza alle riduzioni della potenza a valori di circa 2 W e ad interventi sull'ottica per i picchi intorno a 10 W.

Le fluttuazioni nella potenza generata dalla cella sono inevitabili nel momento in cui si agisce sull'ottica durante l'inseguimento. La disponibilità di più giorni con condizioni atmosferiche adeguate avrebbe permesso di effettuare le due misure in giorni diversi e di ottenere così un grafico di potenza in funzione dell'ora più significativo.

Il sistema di inseguimento non è ancora perfetto, ma permette di mantenere l'allineamento dell'ottica con il sole per intervalli di tempo di circa 1 h30 min. Non ci si aspettava comunque un risultato migliore visto che l'angolo di tolleranza dell'inseguitore è di  $\pm 0.5^\circ$  come mostrato in precedenza; il sistema a concentrazione richiede invece una precisione cinque volte superiore.





# 5 | CONCLUSIONI

## INDICE

---

5.1	Efficienza delle celle	73
5.1.1	Risultati ottenuti	73
5.1.2	Sviluppi futuri	74
5.2	Sistema di puntamento	74
5.2.1	I dispositivi realizzati	74
5.2.2	Come migliorare il puntamento	75
5.3	Futuro per il fotovoltaico a concentrazione	76

---

## 5.1 EFFICIENZA DELLE CELLE

### 5.1.1 Risultati ottenuti

Nelle misure di efficienza sono emerse le potenzialità delle celle a tripla giunzione utilizzate in questo progetto. In particolare con la cella da 1 cm<sup>2</sup> assemblata da Emcore è stato utilizzato uno specchio con buona riflettività permettendo di valutare le prestazioni ottenibili dalle celle se associate a un buon concentratore. Si è raggiunto un valore prossimo al 25% con potenza sul ricevitore di 188 soli e in assenza di dispositivi particolari di dissipazione termica se non il solo contatto con la lastrina di alluminio su cui è fissata la cella.

Si ritiene che sia possibile ottenere efficienze vicine al 30% per potenze di 500 soli con l'impiego di ottiche adeguate e un sistema di dissipazione del calore dimensionato in ragione del maggior flusso luminoso.

Il concentratore a doppio specchio usato con le schede assemblate appositamente per il progetto ha disatteso le aspettative. La causa della scarsa efficienza ottenuta è riconducibile alla bassa riflettività dello specchio primario che focalizza non più del 30% della luce incidente. La produzione di lastre in alluminio di così grandi dimensioni e con superficie sufficientemente liscia potrebbe incidere eccessivamente sui costi finali.

In caso contrario la sostituzione con un aggravio economico contenuto dello specchio con uno più performante permetterebbe di ottenere efficienze vicine al 20% e quindi superiori a quelle dei moduli fotovoltaici di tipo FPV in silicio. Questo nonostante la presenza di un'ottica secondaria che come si è visto contribuisce a ridurre la potenza luminosa focalizzata sulle celle.

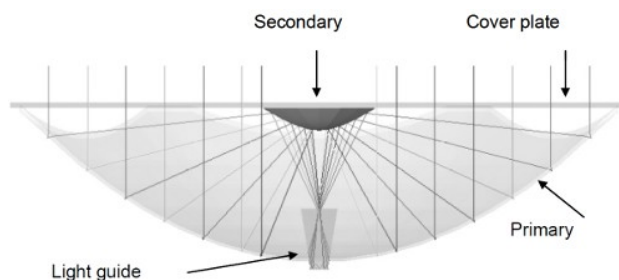


Figura 5.1: Concentratore di tipo Cassegrain: il ricevitore è dietro l'ottica primaria permettendo l'implementazione di sistemi di dissipazione senza coprire lo specchio principale [15].

### 5.1.2 Sviluppi futuri

Il miglioramento dei sistemi ottici passa attraverso la ricerca di buone combinazioni di specchi e/o lenti che da un lato permettano di ottenere grandi concentrazioni con accettanze angolari vicine a quella teorica e dall'altro consentano l'impiego di materiali poco costosi per la loro realizzazione.

In figura 5.1 si trova una delle soluzioni attualmente in fase di studio sia per questo progetto, che da parte di altri centri di ricerca. Un concentratore di questo tipo viene chiamato Cassegrain poiché ricorda i telescopi a riflessione omonimi. È composto da due specchi e una guida di luce in cristallo posta appena sopra la cella. Il vantaggio di questo dispositivo sta nella possibilità di dotare le celle di un voluminoso sistema di dissipazione passiva senza oscurare l'ottica primaria. È in fase di studio la geometria dei profili degli specchi e della guida di luce in modo da massimizzare l'accettazione angolare.

Per quanto riguarda i materiali si stanno studiando alcune soluzioni di specchi realizzati in plastica con successiva deposizione di alluminio per sublimazione. I risultati sono incoraggianti in termini di riflettività e la tecnologia risulta economica per una produzione su larga scala.

## 5.2 SISTEMA DI PUNTAMENTO

### 5.2.1 I dispositivi realizzati

Il sistema di puntamento che è stato realizzato include un posizionamento rapido per la fase iniziale di puntamento, un inseguitore fine che ha lo scopo di mantenere l'asse ottico del concentratore allineato con la direzione del sole, un controllo software per comandare i motori indipendentemente dalla direzione del sole ed infine un controllo manuale che assicura la possibilità di controllare l'apparato in caso di banchi nel software o di malfunzionamenti della circuiteria di inseguimento.

Quella realizzata è quindi una soluzione completa ma che soffre, come si è visto, di una tolleranza angolare dell'inseguitore fine troppo grande: il valore di  $0.5^\circ$  è cinque volte quello richiesto di  $0.1^\circ$  ed il si-

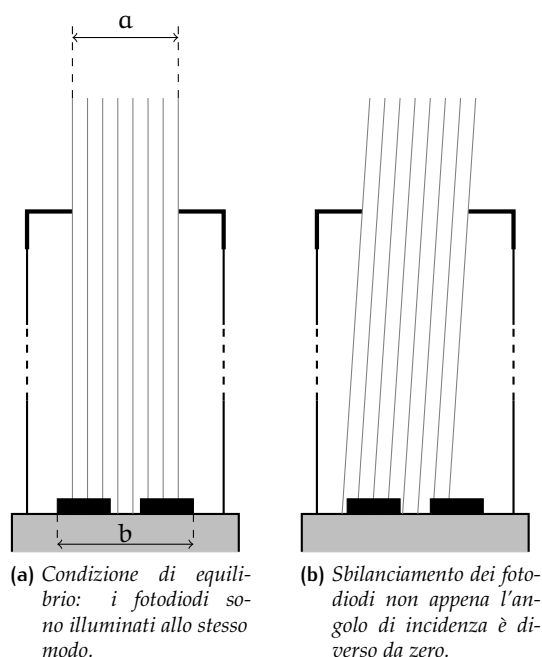


Figura 5.2: Miglioramento del sistema di puntamento: lo sbilanciamento dei fotodiodi si ottiene non appena l'angolo di incidenza è diverso da quello di equilibrio.

stema di puntamento non risulta adeguato all'inseguimento per tempi più lunghi di 1 h30 min.

### 5.2.2 Come migliorare il puntamento

Un accorgimento che permetterebbe di migliorare sensibilmente la precisione del sistema è quello rappresentato in figura 5.2. La differenza rispetto al puntatore utilizzato è semplicemente l'applicazione di un coperchietto all'estremità del tubo in modo da ridurre l'apertura dal valore del diametro di 3 cm ad una quantità  $a$ . Quest'ultima dovrà essere inferiore alla distanza  $b$  tra le estremità dei fotodiodi, come mostrato in figura.

L'equilibrio del sistema si verifica quando il flusso luminoso risulta uguale per entrambi i sensori. Chiaramente questa condizione è realizzata nel momento in cui il puntatore è allineato con la direzione della sorgente (figura 5.2a). Non appena si verifica il disallineamento (figura 5.2b) uno dei fotodiodi sarà soggetto ad un flusso maggiore rispetto all'altro provocando una risposta da parte della circuiteria di inseguimento.

Da un punto di vista geometrico la precisione di questo tipo di puntatore è infinita nel senso che la condizione di equilibrio è soddisfatta per uno e un solo angolo di incidenza. I componenti reali non sono perfetti e quindi la precisione è riconducibile alla sensibilità dei fotodiodi rispetto a variazioni di luminosità.

Bisogna ricordare inoltre che riducendo l'apertura del puntatore è richiesta una maggiore precisione nel posizionamento iniziale, fatto

nel nostro caso dalla piramide.

### 5.3 FUTURO PER IL FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE

Alla luce di quanto detto ci si potrebbe chiedere se sia possibile realizzare impianti a concentrazione, a costi competitivi, viste le problematiche in termini di dissipazione termica, puntamento ed efficienza dei sistemi ottici.

Le problematiche di inseguimento non sono insormontabili: si ritiene che con alcuni accorgimenti, come quello visto sopra, il perfezionamento del puntatore permetta di ottenere la tolleranza massima di  $0.1^\circ$  richiesta per sistemi fotovoltaici ad alta concentrazione.

Dal punto di vista della dissipazione termica sono disponibili soluzioni sia attive che passive. Queste ultime sono da preferire perché non prevedono parti in movimento e non richiedono il consumo di energia anche se sono caratterizzate da un maggiore ingombro e peso. Sono comunque assodati i benefici in termini di efficienza derivanti dall'adozione di un adeguato sistema di dissipazione [16].

Il problema principale che caratterizza il fotovoltaico a concentrazione è quello legato alle ottiche e cioè il riuscire a realizzare un sistema efficiente dal punto di vista della focalizzazione e trasmissione della luce ma che nel contempo assicuri costi contenuti per produzioni su larga scala. La collaborazione del gruppo di ricerca con la realtà industriale italiana sta cominciando a dare i primi frutti in questo senso.

In virtù di quanto detto è verosimile che proseguendo per la strada intrapresa si riesca realizzare dei prototipi competitivi con gli attuali moduli in silicio, con l'utilizzo di materiali economici e allo stesso tempo efficienti.

Se oggi le fonti alternative rappresentano una soluzione costosa rispetto all'utilizzo dei combustibili fossili, l'esaurimento di questi ultimi in un futuro più o meno prossimo renderà lo sfruttamento delle forme di energia rinnovabile, in primis quella solare, una necessità. La disponibilità, in futuro, di tecnologie in grado di rispondere alle nuove esigenze dipende esclusivamente dalla presenza di molti progetti di ricerca simile a questo.



## PROGRAMMA DEL PIC

Segue il listato del programma contenuto nel PIC per il controllo dell'inseguimento.

```
symbol SOGLIA_FOTODIODO_LOW = 10
symbol SOGLIA_FOTODIODO_HIGH = 50
symbol SOGLIA_FINE_CORSA = 160
symbol RESET = 0
symbol LED_FOTODIODO = 1
symbol LED_MANUALE = 2
symbol ADC_FOTO_1 = 2
symbol ADC_FOTO_2 = 3
symbol V_FOTO_1 = b1
symbol V_FOTO_2 = b2
symbol FINE_CORSA = pin0
symbol ADC_FINE_CORSA = 7
symbol V_FINE_CORSA = b5
symbol SW_MANUALE = pin1
symbol piramide = pin4
symbol labview = pin5
symbol DIREZIONE_MAN = pin6
symbol FLAG_FC = bit1
symbol flag_fotodiodo= bit2

attesa:
gosub resetta
let pins = %00101000
pause 400
goto verifica

finecorsa:
if flag_fc=0 then gosub resetta
flag_fc=1
let pins = %00011000
if labview= 1 and flag_fc= 1 then goto c_labview
if sw_manuale = 1 and flag_fc = 1 then goto manuale
goto verifica

manuale:
let pins = %00000000
goto verifica

c_piramide:
gosub resetta
let pins = %00010000
goto verifica

fotodiodo:
if flag_fotodiodo= 0 then gosub resetta
flag_fotodiodo=1
```

PROGRAMMA DEL PIC

```
let pins = %00100000
goto verifica

c_labview:
gosub resetta
let pins = %00110000
goto verifica

verifica:
if FINE_CORSA = 1 then
flag_fc = 0
endif

if FINE_CORSA = 0 then goto finecorsa

if sw_manuale = 1 and flag_fotodiodo = 1 then goto manuale
if labview= 1 and flag_fotodiodo= 1 then goto c_labview

readadc ADC_FOTO_1, V_FOTO_1
readadc ADC_FOTO_2, V_FOTO_2

if V_FOTO_1 > SOGLIA_FOTODIODO_HIGH
or V_FOTO_2 > SOGLIA_FOTODIODO_HIGH then
goto fotodiodo
else
flag_fotodiodo= 0
endif

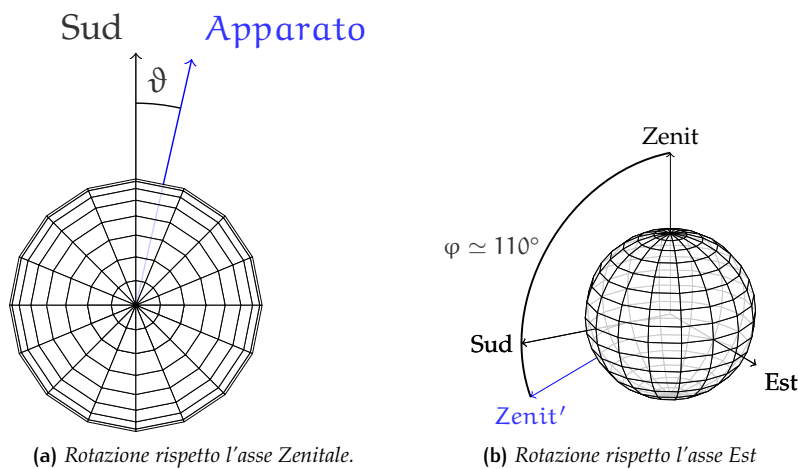
if labview = 1 then goto c_labview
if SW_MANUALE = 1 then goto manuale

goto c_piramide

resetta:
low RESET
pulsout RESET, 1000
return
```

# B | UNA CORREZIONE A POSTERIORI

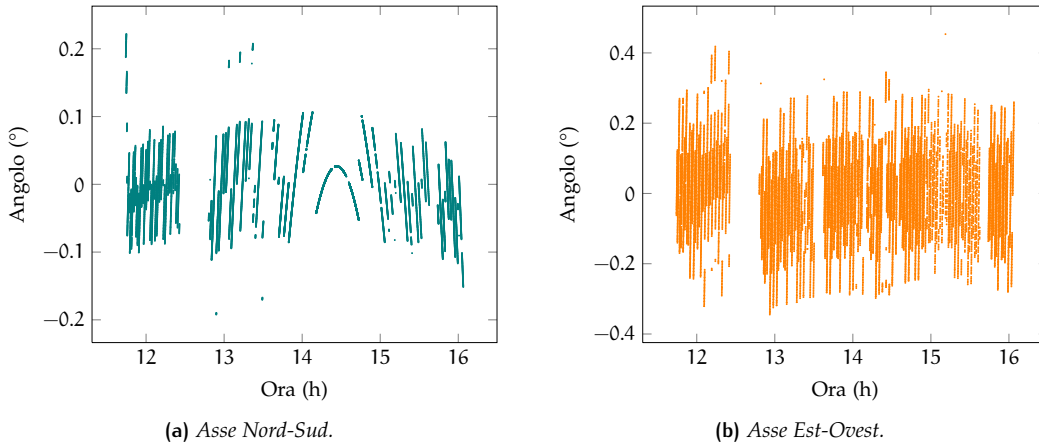
Quest'appendice vorrebbe sostituire o comunque completare il paragrafo 4.2.1 di pagina 68.



**Figura B.1:** A sinistra: la rotazione dell'apparato rispetto all'asse zenitale introduce un errore sistematico nella misura degli angoli. Una valutazione a posteriori dà  $\vartheta = 12.8^\circ$ . A destra si riporta per completezza il grafico già visto nel paragrafo 3.3.2 che rappresenta la rotazione del sistema di coordinate dell'apparato.

Osservando i grafici 4.7a e 4.7c a pagina 67 si è già fatto notare che il punto di minimo nel primo caso e massimo nel secondo dovrebbero corrispondere al momento in cui il sole raggiunge l'altezza massima nel cielo e cioè a mezzogiorno circa.

La misura dell'angolo Nord-Sud raggiunge il minimo alle 14 h32 min mentre il valore calcolato raggiunge il massimo alle 12 h48 min. Una correzione a posteriori dell'errore sistematico osservato può essere fatta assumendo che l'orientamento verso Sud dell'apparato non si stato sufficientemente preciso. Soprattutto le grosse dimensioni della montatura, ma anche la difficoltà nel determinare con grande precisione la direzione del Sud rendono plausibile questa ipotesi. Si assume quindi che la strumentazione sia ruotata di un'angolo  $\vartheta$  rispetto all'orientamento corretto come mostrato in figura B.1a. La trasformazione



**Figura B.2:** Scostamenti tra angoli misurati e calcolati. È applicata la rotazione rispetto all'asse zenitale di  $\vartheta = 12.8^\circ$ . Viene introdotto un offset in modo che la media dei dati sia di  $0^\circ$ .

di coordinate da applicare alle coordinate altazimutali per passare al sistema di riferimento della montatura è rappresentata da:

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \vartheta & \cos \varphi \sin \vartheta & \sin \varphi \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ -\sin \varphi \cos \vartheta & -\sin \varphi \sin \vartheta & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

e cioè prima una rotazione rispetto all'asse zenitale di un angolo  $\vartheta$  corrispondente a quello mostrato in figura B.1a e successivamente una rotazione rispetto alla direzione Est di un angolo  $\varphi$  (figura B.1b) come si è visto nel paragrafo 3.3.2 a pagina 43. Le nuove coordinate sono date da:

$$h' = \arcsin(-\cos h \cos A \sin \varphi \cos \vartheta - \cos h \sin A \sin \varphi \sin \vartheta + \sin h \cos \varphi) \\ A' = \arcsin\left(\frac{-\cos h \cos A \sin \vartheta + \cos h \sin A \cos \vartheta}{\cos h'}\right)$$

Nei grafici in figura B.2 si riportano gli scostamenti tra gli angoli misurati e quelli calcolati con  $\varphi = 110.6^\circ$  e  $\vartheta = 12.8^\circ$ . Come si vede la corrispondenza tra misure e previsioni è migliorata sensibilmente sia per l'angolo Nord-Sud che per quello Est-Ovest. Si calcolano le varianze  $\sigma_{EO} = 0.12^\circ$  e  $\sigma_{NS} = 0.05^\circ$  compatibili con la precisione richiesta per il sistema di inseguimento. Si ricorda che comunque sono state necessarie tre correzioni del puntamento durante tutto l'arco dell'inseguimento. In assenza di tali correzioni le deviazioni standard sarebbero sicuramente maggiori.

Per una conferma di questa ipotesi sarebbe necessario ripetere la misura cercando di orientare correttamente l'apparato verso Sud. Come detto prima il sistema di puntamento e quello di acquisizione sono stati ultimati alla fine dell'estate e non è stato possibile eseguire un'altra misura di inseguimento.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Kenji Araki<sup>1</sup>, Hisafumi Uozumi, Toshio Egami, Masao Hiramatsu, Yoshinori Miyazaki, Yoshishige Kemmoku, Atsushi Akisawa, N. J. Ekins-Daukes, H. S. Lee, and Masafumi Yamaguchi. Development of concentrator modules with dome-shaped fresnel lenses and triplejunction concentrator cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13, 2005. (Citato a pagina 20.)
- [2] F. Dimroth, W. Guter, Jan Schöne, E. Welser, M. Steiner, E. Oliva, A. Wekkeli, G. Siefert, S. P. Philipps, and A. W. Bett. Metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cells with > 41 % efficiency. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009. (Citato a pagina 11.)
- [3] Dufie and Beckman. *Solar Engineering Of Thermal Processes*, pages 345–351. Wiley, 1980. (Citato alle pagine 18 e 20.)
- [4] Dufie and Beckman. *Solar Engineering Of Thermal Processes, Third Edition*, chapter 23. Wiley, 2006. (Citato a pagina 6.)
- [5] Dufie and Beckman. *Solar Engineering Of Thermal Processes, Third Edition*, pages 10–16. Wiley, 2006. (Citato a pagina 43.)
- [6] Emcore. *CTJ Photovoltaic Cell*. [http://www.emcore.com/assets/photovoltaics/CTJ\\_B\\_Web.pdf](http://www.emcore.com/assets/photovoltaics/CTJ_B_Web.pdf). (Citato alle pagine 9, 10 e 17.)
- [7] Emcore. *Greater than 28% Triple-Junction Solar Cells*. [http://www.emcore.com/assets/photovoltaics/Emcore\\_Manuscript\\_Fatemi\\_3P-B5-03\\_WCPEC-3.pdf](http://www.emcore.com/assets/photovoltaics/Emcore_Manuscript_Fatemi_3P-B5-03_WCPEC-3.pdf). (Citato a pagina 10.)
- [8] Martin Green, Keith Emery, Klaus Bücher, David King, and Saneakazu Igari. Solar cell efficiency tables(version 9). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1997. (Citato a pagina 13.)
- [9] Martin Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, and Wilhelm Warta. Solar cell efficiency tables(version 34). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2009. (Citato alle pagine 13 e 15.)
- [10] Wolfgang Guter, Jan Schöne, Simon Philipps, Marc Steiner, Gerald Siefert, Alexander Wekkeli, Elke Welser, Eduard Oliva, Andreas W. Bett, and Frank Dimroth. Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1 % conversion efficiency under concentrated sunlight. *Applied Physics Letters*, 94, 2009. (Citato a pagina 15.)
- [11] Paul Horowitz and Winfield Hill. *The Art Of Electronics - 2nd Edition*, page 240. Cambridge university press, 1989. (Citato a pagina 48.)

## BIBLIOGRAFIA

- [12] Paul Horowitz and Winfield Hill. *The Art Of Electronics - 2nd Edition*, page 222. Cambridge university press, 1989. (Citato a pagina 53.)
- [13] R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, and N. H. Karam. 40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells. *Applied Physics Letters*, 90(183516), 2007. (Citato a pagina 9.)
- [14] Sarah Kurtz. Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry. *NREL Technical Report*, 2009. <http://www.nrel.gov/pv/pdfs/43208.pdf>. (Citato alle pagine 6, 12, 13 e 15.)
- [15] Mark McDonald and Chris Barnes. Spectral optimization of cpv for integrated energy output, 2008. (Citato a pagina 74.)
- [16] Anja Royne, Christopher J. Dey, and David R. Mills. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 86, 2005. (Citato alle pagine 17 e 76.)
- [17] Sapoval and Hermann. *Physics of semiconductors*, pages 230–233. Springer, 1995. (Citato a pagina 5.)
- [18] Sapoval and Hermann. *Physics of semiconductors*, page 28. Springer, 1995. (Citato a pagina 9.)
- [19] Sunpower. *Modulo Fotovoltaico 315*, 2009. [http://www.sunpowercorp.it/downloads/product\\_pdfs/panels/sp\\_315ewh\\_it\\_a4\\_w\\_ds.pdf](http://www.sunpowercorp.it/downloads/product_pdfs/panels/sp_315ewh_it_a4_w_ds.pdf). (Citato a pagina 13.)
- [20] U.S. Energy information Administration. *International Energy Annual*, 2006. (Citato a pagina 2.)