



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**Università degli Studi di Padova**

Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei"

Tesi di Laurea Magistrale in Fisica

*Caratterizzazione di Celle Fotovoltaiche  
a Tripla Giunzione per fotovoltaico ad  
alta concentrazione: Relazioni di  
Reciprocità*

Relatore Ch.mo Prof. Sandro Centro  
Correlatore Dott. Piergiorgio Antonini

Laureando  
Stefano Giovannini  
n° matr. 1018841

Anno Accademico 2013 / 2014

## Sommario

Introduzione .....	2
Air mass e standard dello spettro solare .....	4
Modello di una cella fotovoltaica .....	6
Celle a multigiunzione .....	8
Elettroluminescenza e relazioni di reciprocità .....	10
Metodi per misurare le curve I-V di una cella fotovoltaica .....	13
Resistore variabile .....	13
Carico capacitivo .....	13
Carico elettronico .....	13
Amplificatore bipolare di potenza .....	14
Four-Quadrant power supply .....	14
Convertitore DC-DC .....	15
Apparato sperimentale .....	16
Strumenti di misura utilizzati .....	16
Caratteristiche Ni9263 .....	17
Caratteristiche Ni9215 .....	17
Circuito impulsatore .....	18
Risposta del circuito a potenziale nullo in ingresso .....	19
Carico variabile .....	23
Principio di funzionamento .....	24
Limiti di funzionamento .....	25
Risposta a segnale nullo in ingresso .....	25
Programma di controllo e acquisizione dati .....	28
Giunzioni Tunnel .....	35
Ricerca dell'effetto dei diodi tunnel ad alte densità di corrente .....	39
Verifica delle relazioni di reciprocità .....	48
Conclusioni .....	61

## Introduzione

Negli ultimi anni, per motivi economici, ambientali e politici è cresciuto l'interesse verso la produzione di energia da fonti rinnovabili; una delle applicazioni più importanti è lo sfruttamento dell'energia solare tramite effetto fotovoltaico.

La ricerca sulle celle fotovoltaiche nasce negli anni '70 e nel tempo perfeziona le celle al silicio portandole vicine al limite teorico di efficienza, intesa come rapporto tra potenza ricevuta e potenza generata. Tale limite è stato calcolato da Shockley e Queisser<sup>1</sup> ed è pari a circa il 30% per celle a singola giunzione, quali quelle al silicio.

Contemporaneamente, a partire dagli anni '80, vengono sviluppati nuovi tipi di celle, che superano il limite di efficienza di Shockley-Queisser grazie alla presenza contemporanea di più giunzioni, da cui il nome di celle a multigiunzione. In *Figura 1* si può osservare l'evoluzione negli anni dei record di efficienza.

Le celle a multigiunzione hanno tipicamente i migliori valori di efficienza quando lavorano a concentrazioni solari elevate, quindi per poter farle rendere al meglio si è iniziato a progettare e realizzare impianti che tramite sistemi di specchi o lenti concentrassero l'energia solare. Tali impianti sono denominati in generale Concentrating Photovoltaic (CPV), con differenziazioni a seconda del livello di concentrazione raggiunto. Generalmente la divisione è in Low Concentrating Photovoltaic (LCPV) per concentrazioni di 1-10 soli, CPV tra 10-500 soli e High Concentrating Photovoltaic (HCPV) per concentrazioni maggiori di 500 soli. Sul preciso significato di concentrazione si tornerà nel capitolo 4. In *Figura 2* è osservabile un esempio di sistema HCPV attualmente in sviluppo presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

La costruzione di modelli teorici atti a comprendere maggiormente il funzionamento delle celle fotovoltaiche è continua; di recente sono state proposte due relazioni, dette di reciprocità, che legano input/output ottici ad input/output elettrici, sfruttando il fenomeno dell'elettroluminescenza<sup>2</sup>. Prime conferme della validità di queste relazioni sono già state date<sup>3,4</sup>**Errore. Il nome file non è valido.**, ma l'intervallo di correnti su cui poterlo applicare è ancora da determinare. È importante capire se la sua validità è estendibile a correnti paragonabili a quelle di lavoro nei sistemi a concentratore, così da aver un modo rapido di verificare l'efficienza delle celle.

Questo lavoro di tesi si inserisce nello sviluppo di un sistema fotovoltaico a concentrazione con i seguenti obiettivi:

- Creazione di uno strumento per la caratterizzazione di celle tramite elettroluminescenza, in modo da poter individuare eventuali celle difettose e classificare le celle acquistate in classi di efficienza. Ciò è importante per creare moduli con celle di efficienza simile tra loro, in quanto la presenza di una cella meno performante porterebbe ad una diminuzione dell'efficienza del modulo perché le celle sono connesse in serie. Inoltre lo stesso strumento sarà utilizzato per altri controlli di qualità in fasi più avanzate di costruzione di un modulo.
- Creazione di un prototipo di strumento per l'acquisizione della curva I-V di un modulo in funzione.
- Creazione del software di controllo degli strumenti
- Verifica delle relazioni di reciprocità ad alte densità di corrente

- Limiti della cella: ricerca dell'effetto dei diodi tunnel ad alte densità di corrente.

## Best Research-Cell Efficiencies

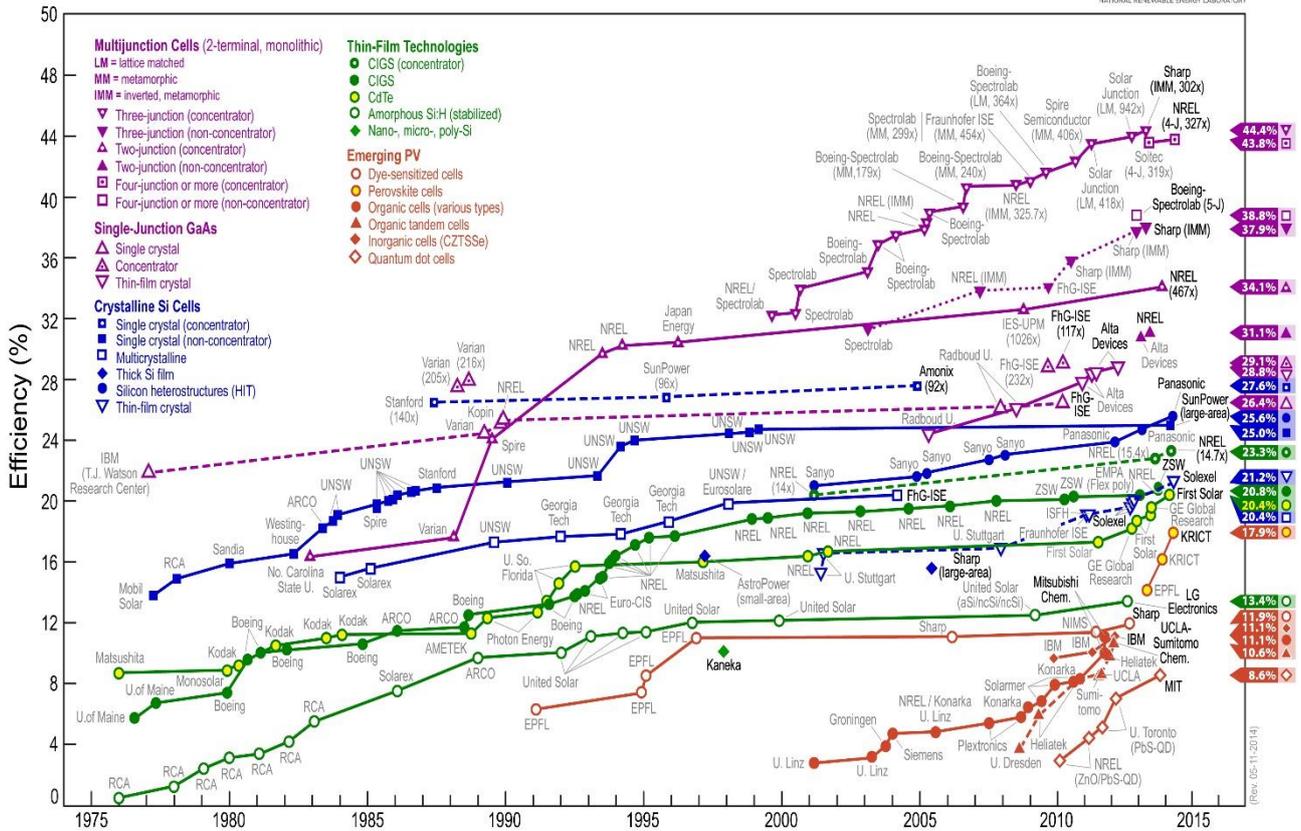


Figura 1. Grafico dell'evoluzione efficienze di celle fotovoltaiche negli anni (in ascissa). Le celle si dividono in cinque famiglie: celle al Silicio cristallino, celle a giunzione singola, celle a multigiunzione, celle a film sottile, celle "emergenti" che raggruppa tecnologie non classificabili fra le altre. Fonte National Renewable Energy Laboratory<sup>12</sup>

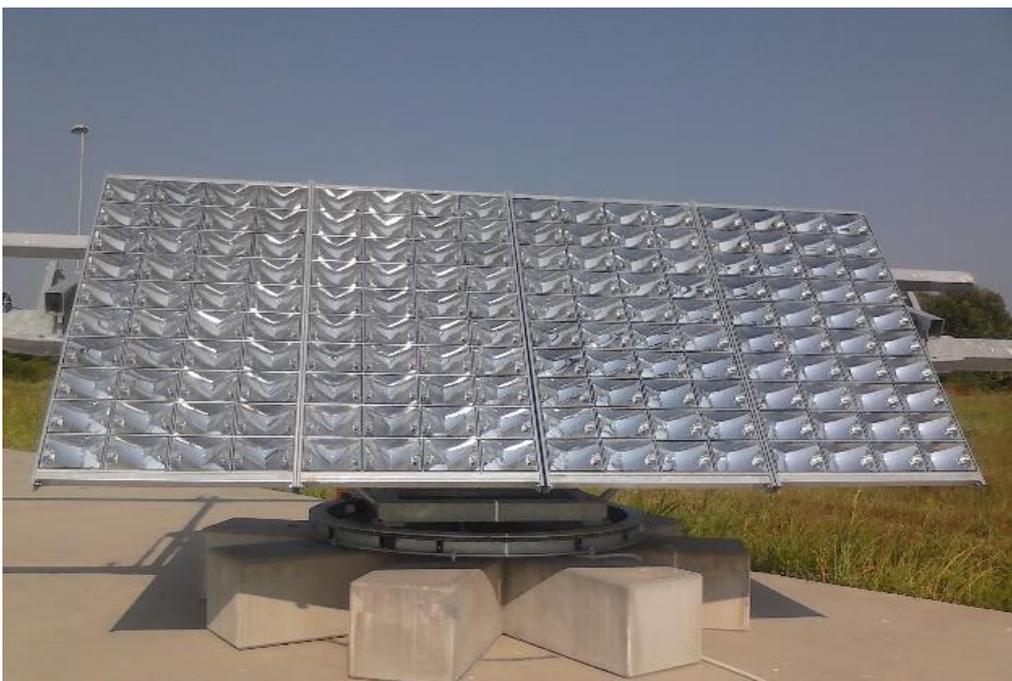
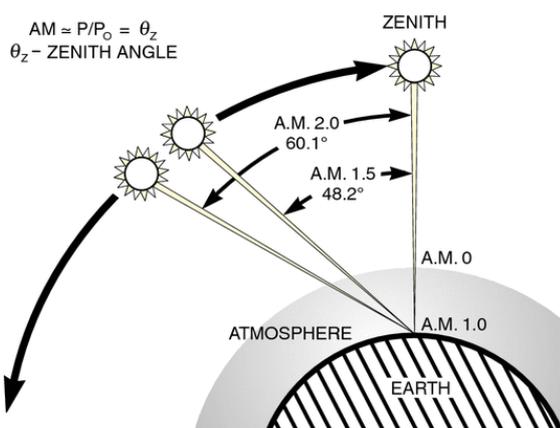


FIGURA 2. SISTEMA HCPV IN FUNZIONE AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO

## Air mass e standard dello spettro solare

Lo spettro solare è molto importante nel caso delle celle a multigiunzione. Infatti tali celle sono costituite da diverse (solitamente due o tre) celle fotovoltaiche di energy gap tra loro connesse in serie e la forma dello spettro si riflette sul bilanciamento delle correnti delle varie giunzioni. Le giunzioni sono realizzate in modo da generare tutte la stessa corrente per uno spettro ben definito.

Lo spettro solare misurato nello spazio è molto simile allo spettro di un corpo nero avente temperatura superficiale pari a circa 5800 K; l'irradianza ad 1 unità astronomica è pari a 1366 W/m<sup>2</sup>. Sulla superficie terrestre lo spettro non è però costante, e varia a seconda delle stagioni, dell'ora della giornata, del tempo meteorologico, della località geografica. Il cambiamento principale è dovuto alla presenza dell'atmosfera. Essa fa cambiare forma allo spettro, a seconda dello spessore attraversato, riducendo l'irradianza totale ed assorbendo alcune zone a causa della presenza di determinate molecole (in Figura 4 si vedono le zone di assorbimento dovute a H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>).



Da qui l'importanza di definire un parametro che rappresentasse l'impatto dell'atmosfera sullo spettro, l'Air Mass (AM); esso è il rapporto tra lo spessore di atmosfera che la luce deve attraversare e lo spessore di atmosfera allo zenith. Con riferimento alla Figura 3, si ha

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

Si definisce come AM0 lo spettro al di fuori dell'atmosfera terrestre (dove ha irradianza 1367 W/m<sup>2</sup> detta costante solare), AM1 lo spettro con il Sole allo zenith (θ = 0°), AM1.5 è riferito a θ≈48.2°.

FIGURA 3. RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLA AIR MASS.

Per poter confrontare tra loro le misure di celle fotovoltaiche sono stati definiti degli spettri standard; per celle destinate ad uso terrestre lo spettro di riferimento è lo ASTM G173 – 03 (Figura 4), che ha irradianza globale di 1000.4 W/m<sup>2</sup>, irradianza diretta di 900.1 W/m<sup>2</sup> ed è riferito ad un valore di Air Mass di 1.5.

Le irradianze globale e diretta sono definite rispettivamente come la quantità di radiazione che è ricevuta dalla semisfera celeste e la quantità di radiazione ricevuta direttamente dal Sole. La differenza tra i due valori è dovuta allo scattering che avviene nell'atmosfera.

Per quanto possibile abbiamo acquisito dati nei momenti della giornata con AM1.5, ottenibili dal sito internet NREL<sup>5</sup> e con irradianza diretta pari a circa 900 W/m<sup>2</sup>, misurata con un pireliometro.

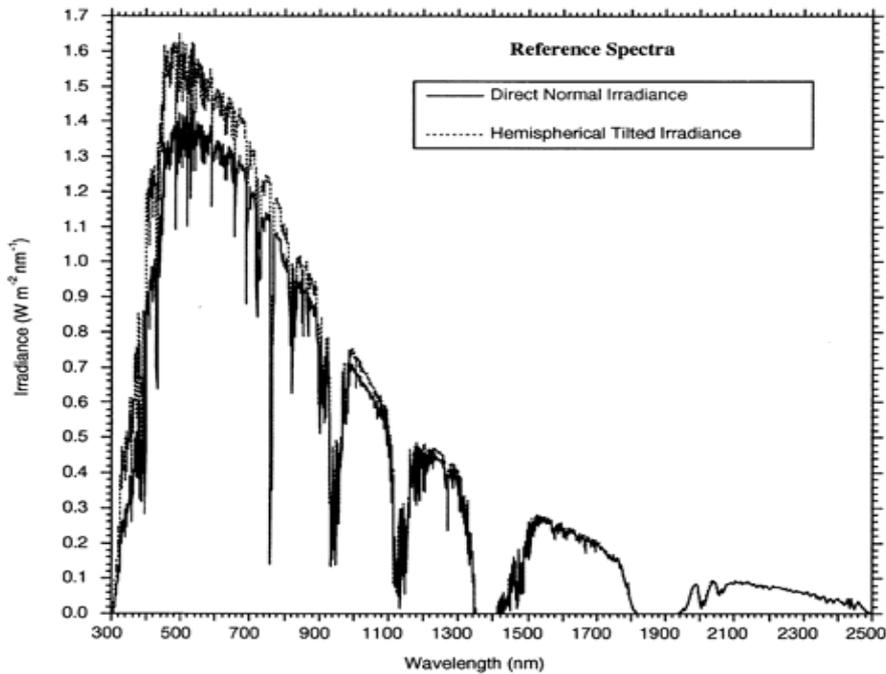


FIGURA 4. SPETTRO SOLARE

Definito lo spettro di riferimento, chiariamo l'importante differenza tra concentrazione geometrica e concentrazione solare, concetti chiave nel CPV.

Chiamata S la superficie sulla quale viene raccolta la luce per essere convogliata sulla cella, la concentrazione geometrica è semplicemente il rapporto tra S e la superficie della cella

$$C_{geom} = \frac{\text{Superficie } S}{\text{Superficie cella}}$$

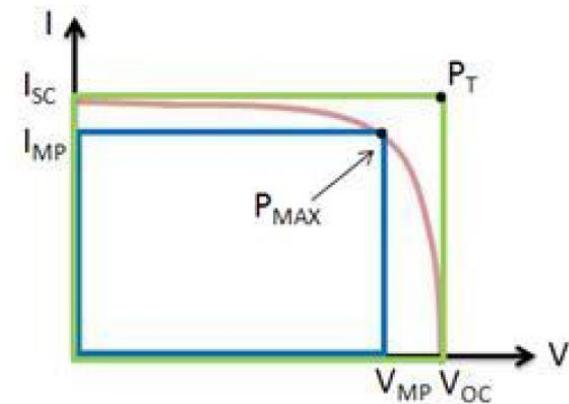
Tale valore è un valore limite ideale in cui tutta la radiazione viene convogliata senza perdite sulla cella. Ovviamente nella realtà questo è impossibile considerando anche solamente le perdite per riflessione e/o trasmissione, per cui spesso si utilizza il valore di concentrazione solare, definito come

$$C_{solare} = \frac{\text{Irradianza incidente sulla cella}}{\text{Irradianza diretta 1 sole}}$$

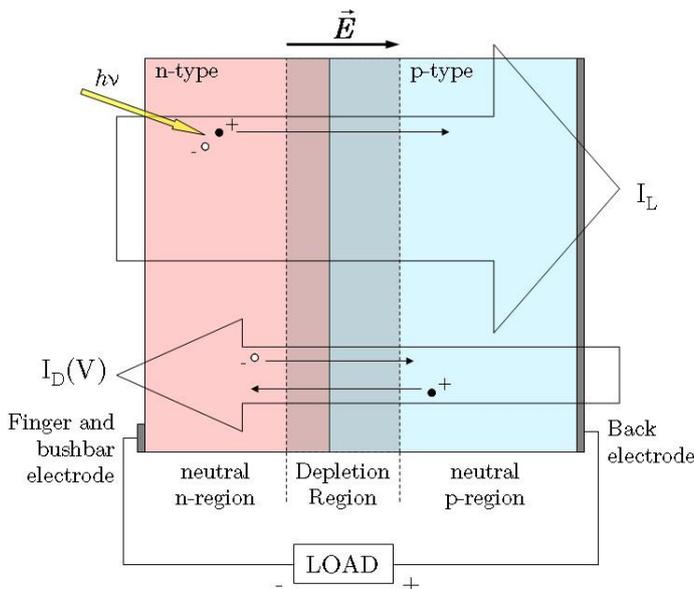
e solitamente espressa in numero di soli.

## Modello di una cella fotovoltaica

Una cella fotovoltaica è un dispositivo optoelettronico in grado di convertire luce in corrente elettrica. Il principio di funzionamento si basa sull'effetto fotoelettrico, spiegato da Einstein nel 1905<sup>6</sup>, che consiste nell'emissione di elettroni da un materiale quando viene colpito da un flusso di fotoni. Perché questo processo avvenga il fotone incidente deve avere una energia minima, chiamata energia di estrazione. In particolare interessa un sottogruppo di tali interazioni, chiamato effetto fotovoltaico, in cui l'elettrone passa dalla banda di valenza a quella di conduzione, diventando libero di muoversi nel materiale e permettendo di generare una corrente.



Tipicamente le celle sono formate da semiconduttori di elementi del IV gruppo (ad es. Si o Ge) drogati *n* ad una estremità con atomi del V gruppo (P, As) e dall'altra drogati *p* con atomi del III gruppo (B, Ga, In), formando una giunzione *p-n*. Sono possibili anche configurazioni più complesse con composti ternari (GaInAs, GaInP) o celle composte da materiali organici.



In Figura 5 è mostrato il processo fotovoltaico: le cariche prodotte dai fotoni sono accelerate dal campo presente nella zona di svuotamento e generano una corrente  $I_L$ , che fluisce attraverso il carico a cui la cella viene connessa. A causa del passaggio di corrente, ai capi del carico si forma una differenza di potenziale  $V$  che applicata alla giunzione modifica l'ampiezza della zona di svuotamento e genera una corrente  $I_D$  opposta ad  $I_L$ .

All'equilibrio, sul carico passa una corrente

$$I = I_L - I_D(V) = I_L - I_0 \left( e^{\frac{qV}{\eta k T}} - 1 \right)$$

Dove si è utilizzata per  $I_D$  l'equazione del diodo ideale di Shockley, con  $I_0$  corrente di saturazione inversa,  $q$  carica elementare,  $k$  costante di Boltzmann,  $T$  temperatura e  $\eta$  fattore di idealità.

Le celle fotovoltaiche possono essere considerate

FIGURA 5. RAPPRESENTAZIONE DELL'EFFETTO FOTOVOLTAICO

come generatori di corrente con potenza erogata  $P = I V$  determinata dal carico.

Per stabilire le caratteristiche di una cella sono considerati tre parametri:

- $V_{OC}$ , tensione misurata a circuito aperto ( $I = 0$ ), ovvero  $V_{OC} = \frac{\eta k T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$
- $I_{SC}$ , corrente misurata cortocircuitando la cella ( $V = 0$ ), ovvero  $I_{SC} = I_L$
- $P_{max}$ , la potenza massima che la cella può generare (il massimo del prodotto  $I V$ )

Se la cella fosse un generatore ideale, la sua curva  $I-V$  sarebbe un gradino, con una corrente costante fino alla massima tensione di utilizzo. Nella realtà questo non avviene e la curva è smussata. Dal punto di vista pratico quello che interessa è la potenza elettrica, da qui l'importanza del valore di  $P_{max}$ .

Facendo riferimento alla Figura 6, come parametro della bontà della cella si definisce il Fill Factor (FF)

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC} I_{SC}}$$

Fatte queste premesse, un semplice schema elettrico della cella è mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, dove oltre al generatore di corrente ed al diodo sono stati inseriti una resistenza in serie ed una in parallelo che servono a creare un modello in situazioni di non idealità. Tipicamente  $R_s$  è molto piccola e rappresenta le perdite di tensione per resistenze parassite sui bus ed i fingers (ovvero i collegamenti metallici che permettono il passaggio di corrente fuori dalla cella) mentre  $R_p$  è molto grande e rappresenta il non perfetto isolamento tra zone a diverso potenziale della cella.

L'effetto di queste due resistenze è mostrato in Figura 8 e Figura 9 ; l'aumento di  $R_s$  fa diminuire  $V$  mentre la diminuzione di  $R_p$  fa diminuire  $I$ . L'effetto principale è però la variazione di pendenza delle zone di curva che fa diminuire il Fill Factor.

**FIGURA 6. CURVA I-V DI CELLA FOTOVOLTAICA. IL FILL FACTOR È IL RAPPORTO TRA L'AREA DEL RETTANGOLO BLU E QUELLA DEL RETTANGOLO VERDE**

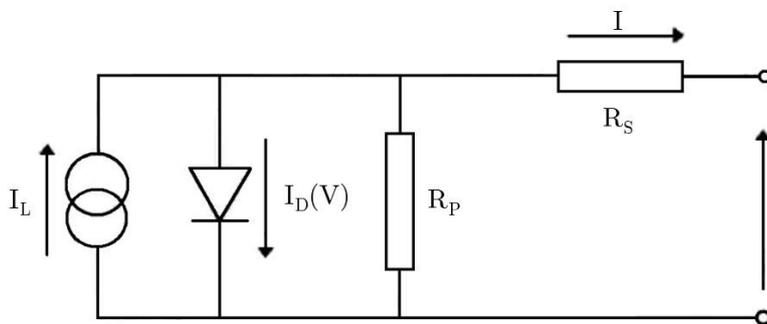
In prima approssimazione  $R_s$  può essere stimata dall'inverso della pendenza della curva nelle vicinanze di  $V_{oc}$ , mentre  $R_p$  dall'inverso della pendenza nelle vicinanze di  $I_{sc}$ .

Questo modello è accettabile solo in prima approssimazione, ma fallisce quando la situazione non è quella ideale, ad esempio in caso di illuminazione non uniforme dovuta a difetti dell'ottica o alla stessa costruzione della cella.

La capacità della cella di assorbire fotoni non è costante su tutte le lunghezze d'onda; per misurarla si definisce l'efficienza quantica esterna (EQE)

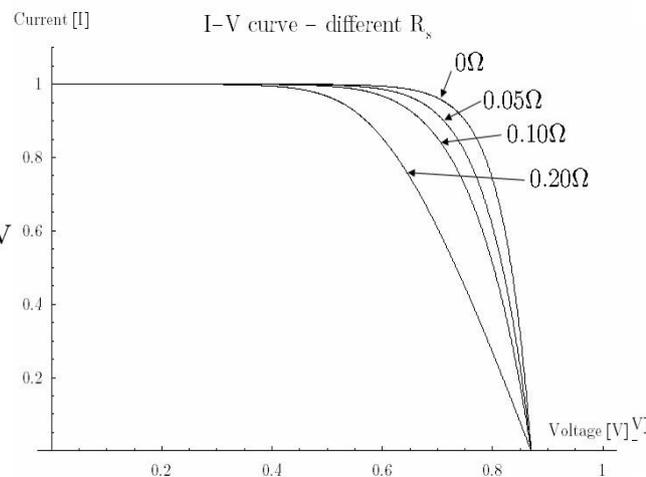
$$EQE(E_\gamma) = \frac{\# \text{ portatori di carica raccolti ai terminali}}{\# \text{ fotoni incidenti di energia } E_\gamma}$$

**FIGURA 7. MODELLO DI CELLA FOTOVOLTAICA A PARAMETRI CONCENTRATI**



**FIGURA 9. EFFETTO DELLA VARIAZIONE DELLA RESISTENZA IN SERIE SULLA CURVA I-V**

l'EQE di una cella al silicio.



**FIGURA 8. EFFETTO DELLA VARIAZIONE DELLA RESISTENZA IN PARALLELO SULLA CURVA I-V**

In Figura 10 è riportato a titolo esemplificativo

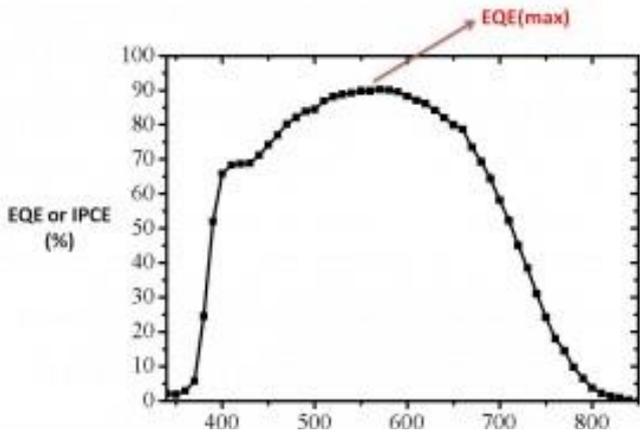


FIGURA 10. CURVA DI EQE DI UNA CELLA AL SILICIO

Detta  $E_\gamma$  l'energia del fotone e  $\phi(E_\gamma)$  il flusso di fotoni incidente sulla cella, il rapporto tra EQE e  $I_{sc}$  è

$$I_{sc} = q \int_0^\infty EQE(E_\gamma) \phi(E_\gamma) dE_\gamma$$

La giunzione può assorbire fotoni aventi un'energia almeno pari alla energy gap tra la banda di valenza e quella di conduzione; se i fotoni hanno un'energia maggiore, i portatori di carica disperderanno l'energia in eccesso sotto

forma termica, riscaldando la cella. L'aumento della temperatura causa una maggiore probabilità di ricombinazione, diminuendo quindi il numero di cariche raccolte e di conseguenza anche EQE.

## Celle a multigiunzione

L'introduzione di celle a multigiunzione (MJ, multijunction), di cui un esempio di struttura è in Figura 11, risolve parzialmente questo problema: essa infatti è formata da più giunzioni, ognuna con una energy gap diversa, in modo da sfruttare ognuna solo la parte dello spettro con energia vicina alla propria energy gap (Figura 12). Così facendo si minimizzano le perdite di energia sotto forma di dispersioni termiche e si migliora l'efficienza totale della cella.

Tra una giunzione e l'altra sono poste delle giunzioni tunnel che permettono il passaggio della corrente senza provocare significative perdite di potenziale (sulla descrizione delle giunzioni tunnel si tornerà più avanti nel capitolo omonimo).

L'insieme delle sottocelle è effettivamente una serie di generatori di corrente; questo limita la corrente massima esprimibile alla minima corrente prodotta da una delle sottocelle. È chiaro quindi che la divisione in sottocelle deve essere fatta in modo che ognuna di esse riceva una quantità di fotoni adeguata a creare la stessa quantità di corrente delle altre. Tale condizione deve essere verificata per un buon numero di ore della giornata, durante le quali lo spettro solare cambia, passando da ore in cui domina la parte infrarossa (alba e tramonto) ad altre in cui domina la parte ultravioletta (ore centrali della giornata).

Questi sono i principali limiti dell'utilizzo di celle oltre le 4 giunzioni.

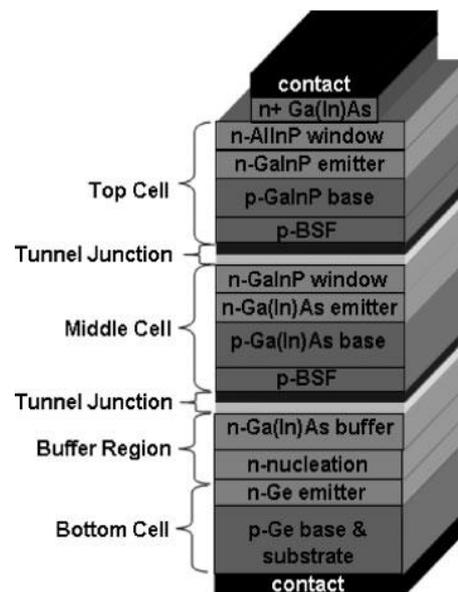


FIGURA 11. DETTAGLIO DEGLI STRATI DI UNA CELLA A TRIPLA GIUNZIONE

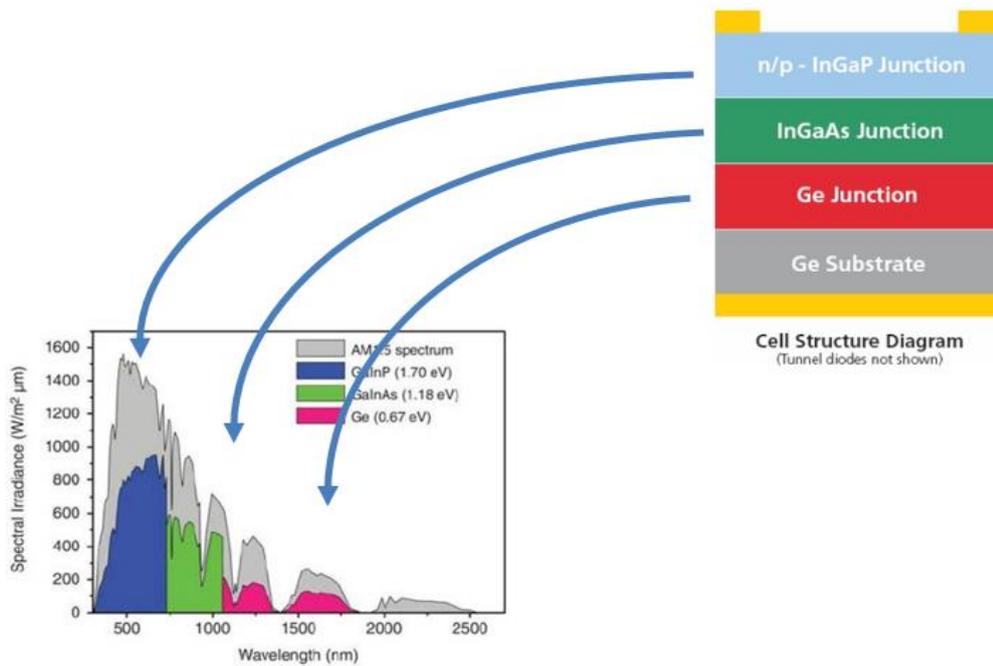


FIGURA 12. OGNI GIUNZIONE DELLA CELLA È COSTRUITA PER ASSORBIRE UNA PARTE DELLO SPETTRO BEN PRECISO.

Il modello più semplice di cella MJ è quello a parametri concentrati, che sostanzialmente riprende il modello descritto in precedenza per la cella a singola giunzione collegando le diverse sottocelle con diodi tunnel (Figura 13).

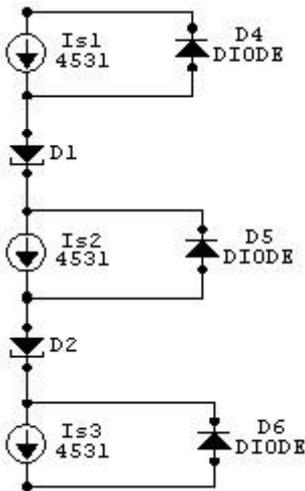


FIGURA 13. MODELLO A PARAMETRI CONCENTRATI DI UNA CELLA A TRIPLA GIUNZIONE.

Questo modello non è però del tutto soddisfacente alle concentrazioni raggiunte nei sistemi ad alta concentrazione, poiché le previsioni si discostano dall'andamento reale. Si rendono necessari modelli a elementi distribuiti per spiegare le perdite dovute a ricombinazione; ad oggi diverse proposte sono state fatte senza che nessuna spieghi tutti gli effetti osservati<sup>7</sup>. In Figura 14 si trova un esempio di modello a parametri distribuiti. Si noti come le diverse regioni della cella abbiano una descrizione leggermente diversa, la presenza di più diodi e l'aggiunta di resistenze per modellizzare la diffusione nello spazio tridimensionale delle cariche.

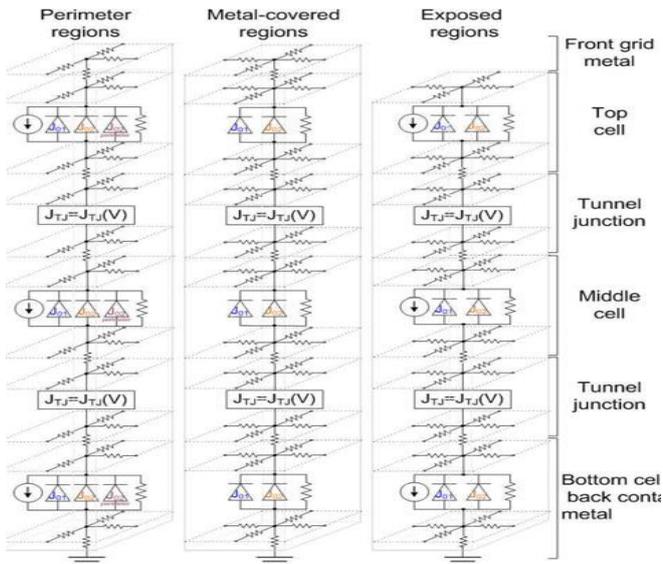


Figura 14. Modella di cella fotovoltaica a tripla giunzione a parametri distribuiti. Fonte: Garcia et al. <sup>8</sup>

### Elettroluminescenza e relazioni di reciprocità

L'elettroluminescenza è il fenomeno per cui un materiale emette luce quando è attraversato da corrente. I fotoni emessi sono generati dalla ricombinazione radiativa tra elettroni e lacune. In un semiconduttore gli elettroni si trovano in banda di conduzione e le lacune in banda di valenza; ricombinandosi emettono un fotone di energia pari alla energy gap.

Tale fenomeno è alla base del funzionamento dei LED (Light-Emitting Diode). Le celle fotovoltaiche invece, come già spiegato, sfruttano il processo inverso e cella e LED sono entrambi diodi. Grazie a questa analogia sono state proposte recentemente due relazioni, dette di reciprocità, che legano output ottici ed input elettrici di una cella e viceversa.<sup>2,9</sup>

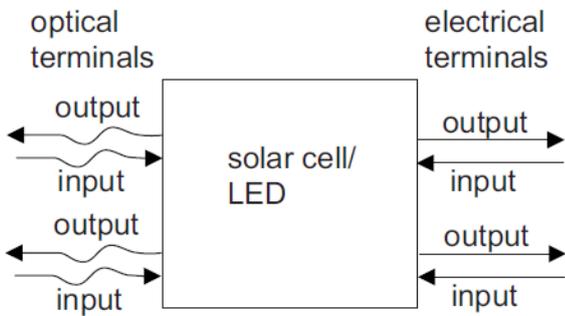


FIGURA 15. ANALOGIA LED - CELLA FOTOVOLTAICA

Le condizioni necessarie alla dimostrazione sono il principio del bilancio dettagliato e la legge di Planck.

Imponendo ad una cella il passaggio di corrente, essa funzionerà come LED ed è possibile dimostrare che, in condizioni di equilibrio termodinamico,

$$\phi_{em}^{norm}(E_\gamma) = EQE_{PV}(E_\gamma)\phi_{BB}(E_\gamma) \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Con  $\phi_{em}^{norm}(E_\gamma)$  flusso di fotoni emesso in direzione normale alla superficie della cella,  $EQE_{PV}(E_\gamma)$  efficienza quantica esterna,  $\phi_{BB}(E_\gamma)$  spettro di corpo nero,  $q$  carica elementare,  $k$  costante di Boltzmann,  $V$  tensione della cella,  $T$  temperatura.

Si ricorda che in approssimazione di Boltzmann ( $E - qV \gg kT$ ) lo spettro di corpo nero è

$$\phi_{bb}(E_\gamma) = \frac{2 \pi}{h^3 c^2} E_\gamma^2 \exp\left(\frac{-E_\gamma}{kT}\right)$$

Questa è la prima relazione di reciprocità, e la sua importanza sta nella possibilità di misurare EQE tramite elettroluminescenza almeno nella zona di energia vicina alla energy gap<sup>4</sup>, solamente conoscendo T,V e il flusso di fotoni emesso. Questo è un procedimento più rapido e semplice di una misura diretta che richiederebbe monocromatori.

La seconda relazione è

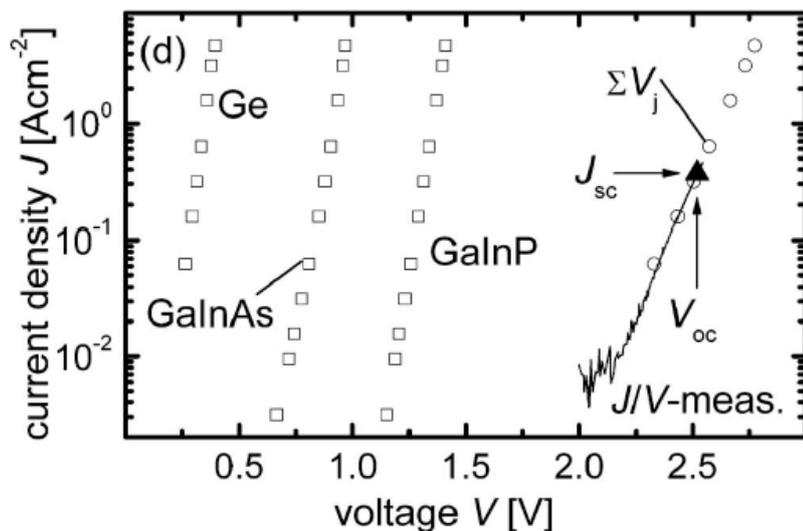
$$\Delta V_{OC} = V_{OC}^{rad} - V_{OC} = - \frac{kT}{q} \ln(EQE_{LED})$$

Dove  $V_{OC}$  è la tensione di cortocircuito misurata,  $V_{OC}^{rad}$  è la tensione di cortocircuito nel limite radiativo (ovvero in cui le cariche si ricombinano solo in modo radiativo, senza ricombinazione Auger o Shockley – Read-Hall),  $EQE_{LED}$  è l'efficienza quantica considerata come LED ovvero  $EQE_{LED} = \frac{J_{em}(V)}{J_{inj}(V)}$ , con  $J_{em}$  corrente emessa (flusso di cariche che si ricombina radiativamente) e  $J_{inj}$  flusso totale di cariche iniettate.

$$V_{OC}^{rad} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{SC}}{J_{em,0}}\right)$$

Quando in una cella avviene l'effetto fotovoltaico, gli elettroni/buche in eccesso che vengono a trovarsi in banda di conduzione/valenza modificando la distribuzione di carica e la situazione di equilibrio in cui è presente un solo livello di Fermi. Si passa ad una situazione di quasi-equilibrio in cui il livello di Fermi si è diviso in due livelli, denominati livelli di quasi-Fermi, uno per la zona  $p$  ed uno per la zona  $n$ . La differenza di energia tra essi è direttamente proporzionale alla tensione letta ai capi della cella.

Che l'eccesso di portatori di carica sia determinato dall'effetto fotovoltaico o derivi da un'iniezione diretta tramite una corrente sotto alcuni aspetti è equivalente. Su questo si basano le relazioni di reciprocità. In tutte le verifiche sperimentali svolte si suppone sempre che, date le  $V_{OC}$  e  $J_{SC}$  di una cella in funzionamento fotovoltaico, iniettando una densità di corrente pari a  $J_{SC}$  nella stessa cella non illuminata si ritrovi come tensione  $V_{OC}$ . Se ciò è valido in circuito aperto dovrebbe esserlo durante tutta la curva I-V, e questo è stato verificato da Kirchartz<sup>4</sup> per correnti di inferiori a



1mA/cm<sup>2</sup> (curva nera in Figura 16)

FIGURA 16. I QUADRATI SONO LE TENSIONI DELLE SOTTOCELLE DI UNA CELLA 3J, I PALLINI LA LORO SOMMA E LA CURVA NERA RAPPRESENTA LA CURVA J-V DELLA CELLA AD UNA CONCENTRAZIONE TALE DA PRODURRE UNA  $J_{SC}$  PARI A QUELLA INIETTATA IN ELETTROLUMINESCENZA. L'ACCORDO È OTTIMO.

Verifiche sperimentali di queste relazioni sono sempre più numerose, ma sono state sempre fatte a densità di corrente dell'ordine di 100 mA/cm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>.

In questa tesi si vuole verificarne la applicabilità a correnti molto più elevate, fino ai limiti di funzionamento della cella, grazie al confronto delle curve I-V ottenute in elettroluminescenza, ruotate con la trasformazione  $I \rightarrow I_{max,inj} - I$ , con le curve I-V della cella misurata ad alte concentrazioni solari.

Oltre a quello visivo, come parametro per giudicare la bontà dei risultati confronteremo i Fill Factor ricavati nei due casi.

Contemporaneamente cercheremo l'effetto della zona di resistenza negativa delle giunzioni tunnel; ci aspettiamo di non vedere variazioni quando studieremo la cella in EL poiché saremo in regime di polarizzazione inversa, mentre in polarizzazione diretta ci aspettiamo una discontinuità nelle curve I-V una volta raggiunte correnti maggiori della massima corrente trasmissibile dalle TJ della cella. Purtroppo non è possibile fare previsioni sulla comparsa di tale fenomeno perché le caratteristiche delle giunzioni tunnel non sono divulgate dai produttori.

## Metodi per misurare le curve I-V di una cella fotovoltaica

Finora si è discusso solo dei modelli di celle, ma non come poterle studiare; seguendo Duran et al. <sup>10</sup>, vengono elencati i principali metodi di misura delle curve I-V e relative caratteristiche.

### Resistore variabile

Alla cella viene collegato un resistore variabile (Figura 17); variandone il valore di resistenza da zero (cortocircuito) a infinito (circuito aperto) si ottiene la curva I-V della cella. E' un metodo molto semplice ed economico ma ha limiti: non si raggiunge mai esattamente  $I_{sc}$  poiché una resistenza nulla è impossibile e non è possibile la misura in polarizzazione inversa.

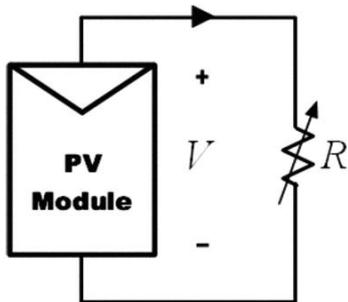


FIGURA 17. RESISTORE VARIABILE

### Carico capacitivo

Collegando alla cella una capacità è possibile passare dalla condizione  $I_{sc}$  (capacità scarica) a quella di  $V_{oc}$  (capacità carica). Si può anche partire da una capacità carica ma a potenziale negativo in modo che la curva passi per l'asse ottenendo  $I_{sc}$ .

I limiti di questo metodo sono:

- per avere curve affidabili bisogna avere capacità con una bassa resistenza equivalente in parallelo
- si deve attendere la completa scarica/carica delle capacità, il che rende la misura lenta se svolta su moduli
- non è possibile fare misure in condizioni specifiche di I-V, si può solo acquisire una curva completa

la capacità deve essere direttamente proporzionale alla  $I_{sc}$  ed indirettamente proporzionale alla  $V_{oc}$  da misurare <sup>11</sup>

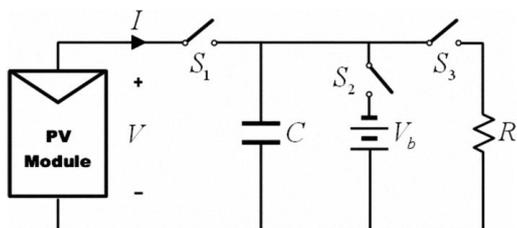


FIGURA 18. CARICO CAPACITIVO

### Carico elettronico

In alternativa ai metodi citati, che utilizzano elementi passivi, si può usare come carico uno strumento attivo, in genere chiamato "carico variabile" o "electronic load".

Come carico sulla cella viene utilizzato un transistor, tipicamente un MOSFET; la tensione ai capi della cella viene controllata dalla tensione di gate-source, e di conseguenza la corrente che fluisce.

Per tracciare la curva I-V il MOSFET deve operare nei regimi di cut-off (ovvero spento), resistivo (in cui la corrente dipende linearmente dalla tensione) e attivo (la corrente dipende debolmente dalla tensione); la maggior parte della potenza sarà quindi assorbita dal MOSFET stesso, limitandone l'applicabilità alle potenze che è in grado di sopportare. È possibile mettere in serie diversi transistor per aumentare la  $I_{sc}$  massima che può essere assorbita.

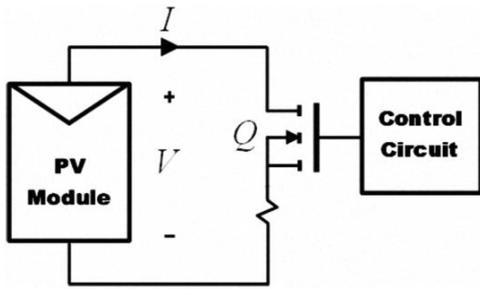


FIGURA 19. CARICO ELETTRONICO

### Amplificatore bipolare di potenza

Questo metodo attivo è basato sul circuito di un amplificatore di potenza in cui si utilizzano due transistor a giunzione bipolare come carico, uno per corrente diretta ed uno per corrente inversa. La tensione può essere invertita per misurare la dark current. Come nel caso di carico elettronico i transistor operano nei regimi di cut-off, regime e saturazione, quindi saranno loro ad assorbire e la maggior parte della potenza.

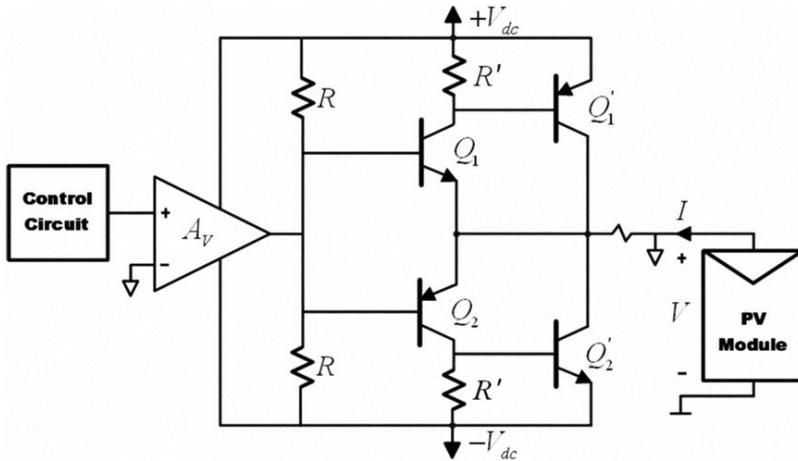


FIGURA 20. AMPLIFICATORE BIPOLARE DI POTENZA.

### Four-Quadrant power supply

Questo circuito può assorbire o generare corrente con tensioni sia positive che negative, permettendo di misurare la curva I-V in tutti e quattro i quadranti. In figura si ha un esempio (funzionale) di tale circuito; la tensione del generatore viene cambiata ed agendo sugli interruttori si dà alla cella una tensione positiva o negativa. Il costo è elevato rispetto agli altri metodi.

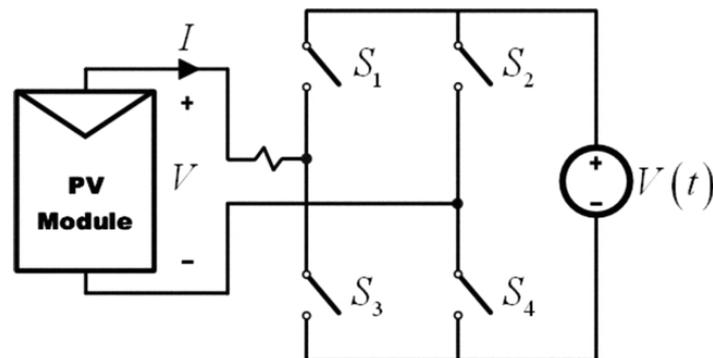


FIGURA 21. FOUR-QUADRANT POWER SUPPLY

## Convertitore DC-DC

I convertitori DC-DC sono in grado di agire come emulatori di resistori; essi possono essere controllati elettronicamente, ad esempio cambiando la frequenza il duty-cycle del convertitore, ed in questo modo variando il carico. Un inconveniente di questo sistema è l'ondulazione del segnale di corrente, dovuto all'induttore presente per creare lo switch. A seconda del tipo di convertitore scelto si può avere più o meno ondulazione della corrente e presenza o meno di zone della curva non possibili da misurare.

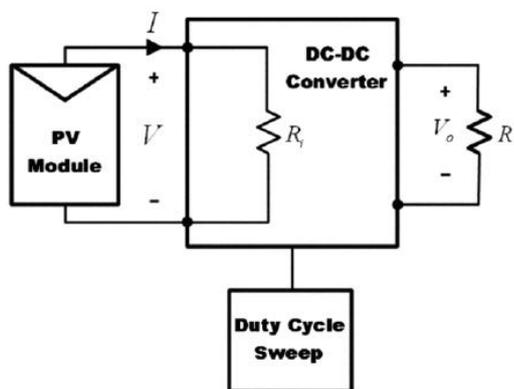


FIGURA 22. CONVERTITORE DC-DC

## Apparato sperimentale

### Strumenti di misura utilizzati

Si è scelto di creare un adattamento dell'amplificatore bipolare di potenza, per la precisione della misura e la sua modularità. È stato realizzato internamente perché in commercio si trovano strumenti tipicamente progettati per misurare moduli interi e non singole celle come desiderato, risultando quindi non adatto alle nostre esigenze.

Sono stati realizzati due circuiti separati, uno per controllare la cella in corrente (d'ora in poi chiamato "impulsatore") e l'altro per controllare in tensione (d'ora in poi "carico variabile") che descrivo nel seguito.

Per generare ed acquisire segnali sono stati usati rispettivamente un modulo NI9263 che è un DAC (Digital to Analog Converter) di tensione ed un modulo NI9215 che è un ADC (Analog to Digital Converter) di tensione (Figura 24). Entrambi sono stati montati su un NI-CompcatDAQ-9172, uno chassis che permette di controllare questi moduli da PC e tenerli allo stesso riferimento di tensione.

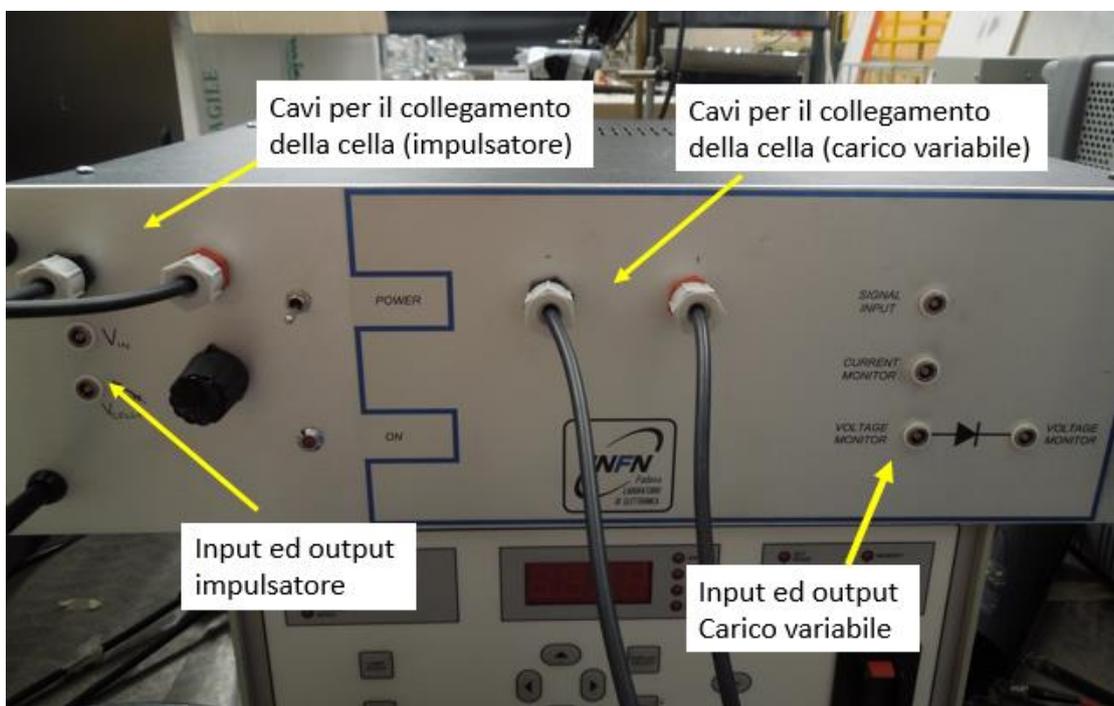


FIGURA 23. IL CASE CONTENENTE I CIRCUITI, IN MOSTRA I TERMINALI DI INPUT E OUTPUT

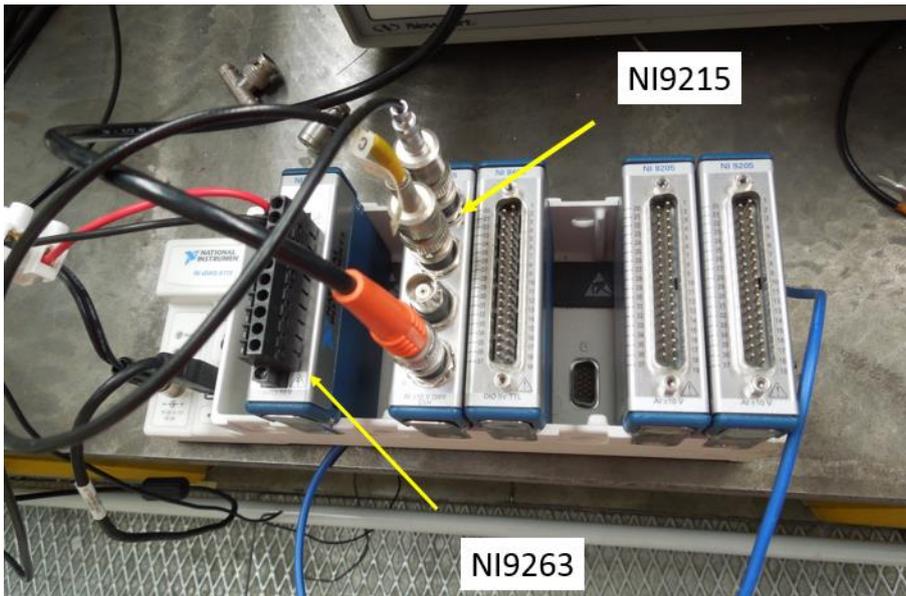


FIGURA 24. NI9215 E NI9263 NELL'APPOSITO CHASSIS, INSIEME AD ALTRI STRUMENTI. LO CHASSIS COMUNICA VIA USB CON IL PC

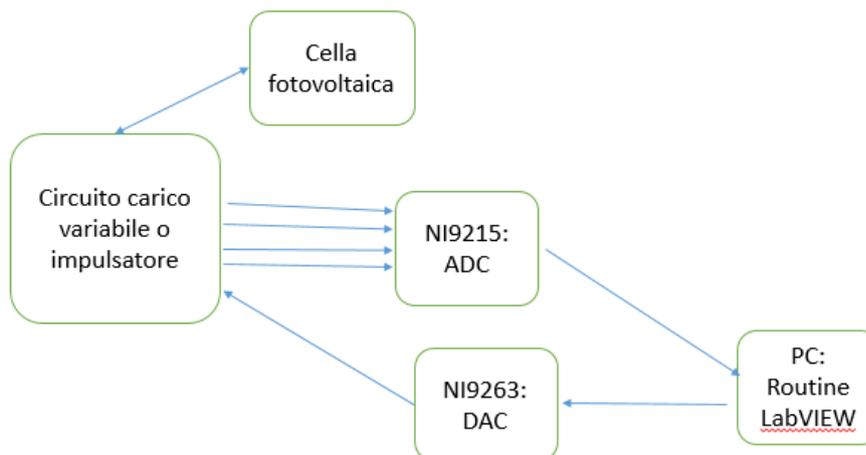


FIGURA 25. SCHEMA DEL SISTEMA DI MISURA

### Caratteristiche NI9263

DAC resolution: 16 bit

Impedenza d'uscita: 2  $\Omega$

Accuracy		
Measurement condition	Percent of reading (Gain Error)	Percent of range* (offset error)
Uncalibrated, max (-40 to 70°C)	2.2%	1.7%
Uncalibrated, typ (25°C +/- 5° C)	0.3%	0.25%

\*Range: +/- 10.7 V

### Caratteristiche NI9215

#### Input Characteristics

ADC resolution.....16 bits  
 Input range .....±10.0 V

**Conversion time**

Channel 0 only .....4.4 µs  
 Channels 0 and 1 .....6 µs  
 Channels 0, 1, and 2 .....8 µs  
 Channels 0, 1, 2, and 3 .....10 µs

Accuracy		
Measurement condition	Percent of reading (Gain Error)	Percent of range* (offset error)
Uncalibrated, max (-40 to 70°C)	1.05%	0.82%
Uncalibrated, typ (25°C +- 5° C)	0.6%	0.38%

\*Range: 10.4V

Circuito impulsatore

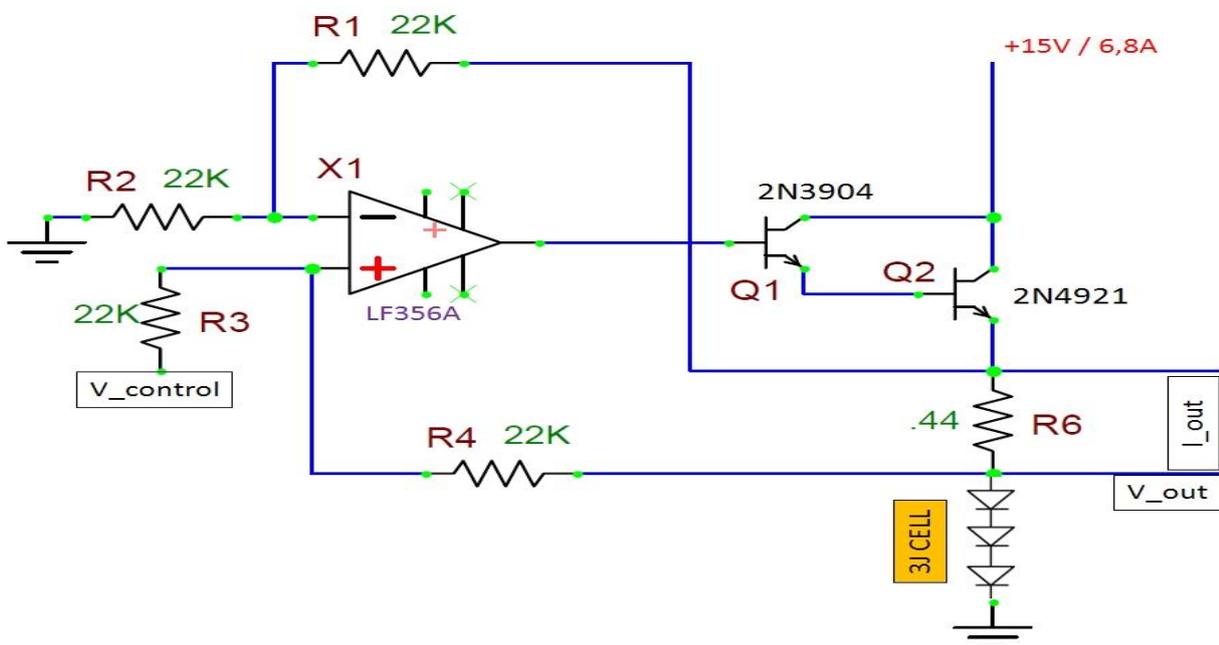


FIGURA 26. SCHEMA DEL CIRCUITO IMPULSATORE

Il circuito richiede una tensione in ingresso V\_control, che viene amplificata di un fattore  $R4/R3 = 1$  ai capi di una resistenza R6 con dissipatore.

All'uscita dell'amplificatore è posto un darlington (ovvero due transistor Q1 e Q2 in serie) chiuso sulla resistenza R6, la cui funzione è produrre la corrente necessaria a mantenere sulla resistenza la differenza di potenziale richiesta.

Dall'altra parte della resistenza viene posizionata la cella, che poi è collegata a massa; in questo modo tutta la corrente passante sulla resistenza passa anche sulla cella.

Quindi con questo circuito è possibile controllare la quantità di corrente che fluisce nella cella.

La corrente può variare da un minimo di 7 mA (soglia di accensione del darlington) fino al valore massimo sopportabile dal sistema darlington-amplificatore, nel nostro caso 4 A. Tale limite è legato al particolare tipo di BJT utilizzati: se si esce dalla zona di lavoro per cui sono stati progettati, il guadagno diventa basso e richiedono all'operazionale una corrente maggiore di quella che può dare in uscita.

Si può ovviare a questo problema scegliendo accuratamente i BJT per il tipo di correnti richieste oppure sostituendo il darlington con un MOSFET, che non richiede corrente all'operazionale.

In uscita vengono trasmesse la tensione ai capi della resistenza I\_out, ottenendo quindi la corrente, e la tensione ai capi della cella V\_out e si può ricostruire la curva I-V.

### Risposta del circuito a potenziale nullo in ingresso

Per poter stimare un eventuale rumore o problemi del circuito si è cortocircuitato l'ingresso, lasciato il circuito aperto (non chiuso su una cella) e si sono acquisiti i segnali di uscita. L'acquisizione è stata svolta con un Agilent 34972 A con le seguenti caratteristiche:

Sensibilità su V cella	5 digit e ½, 100 mV range
Sensibilità su V res	5 digit e ½, 100 mV range
Interval scan	0.2 s
Tempo di misura	12 m 43,389 s

Di seguito i grafici delle acquisizioni

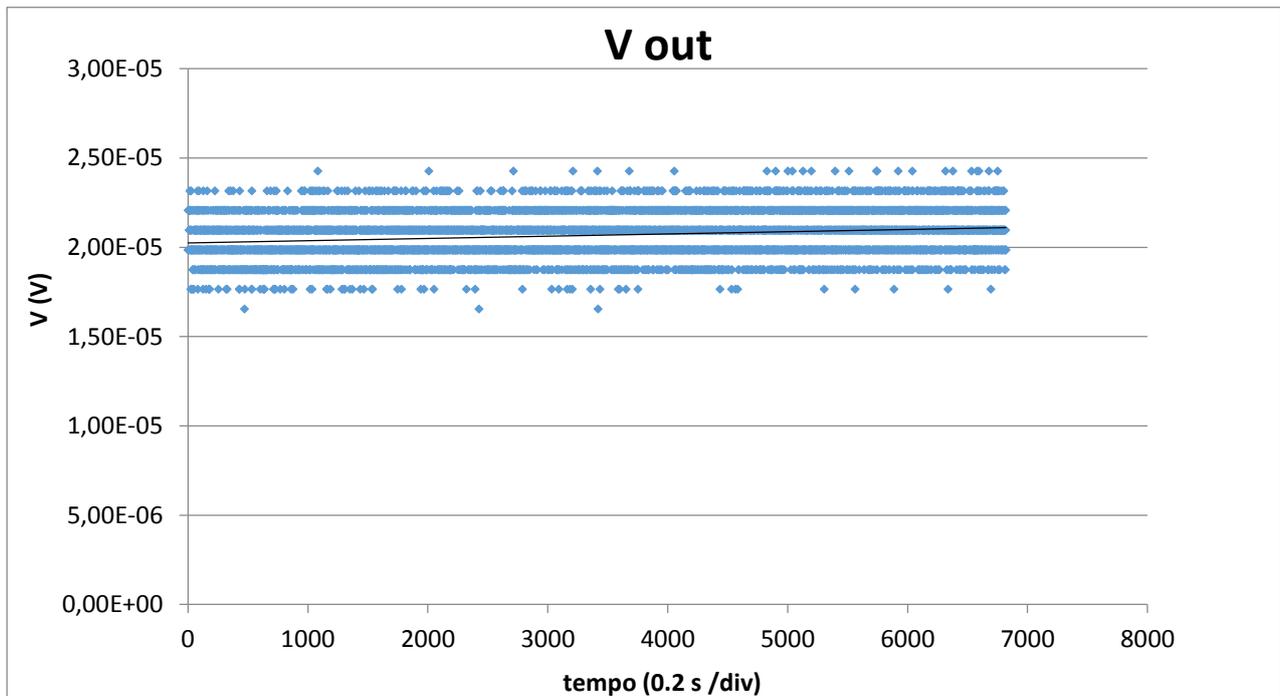


Figura 27. Risposta di V\_out ad un cortocircuito in ingresso. Risultati fit lineare:  $V = 1,25 \cdot 10^{-10} x + 2,02 \cdot 10^{-5}$ .

Media:  $(3.3 \pm 12.1) \cdot 10^{-7} V$

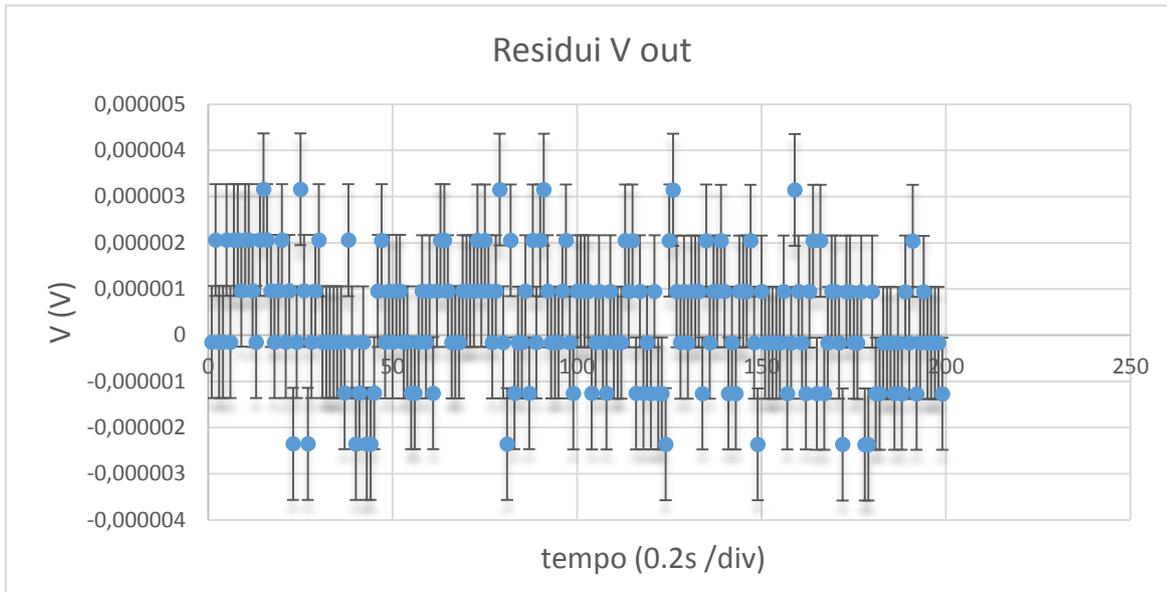


FIGURA 28. GRAFICO DEI RESIDUI DI  $V_{OUT}$  IN RISPOSTA A SEGNALE NULLO IN INGRESSO.

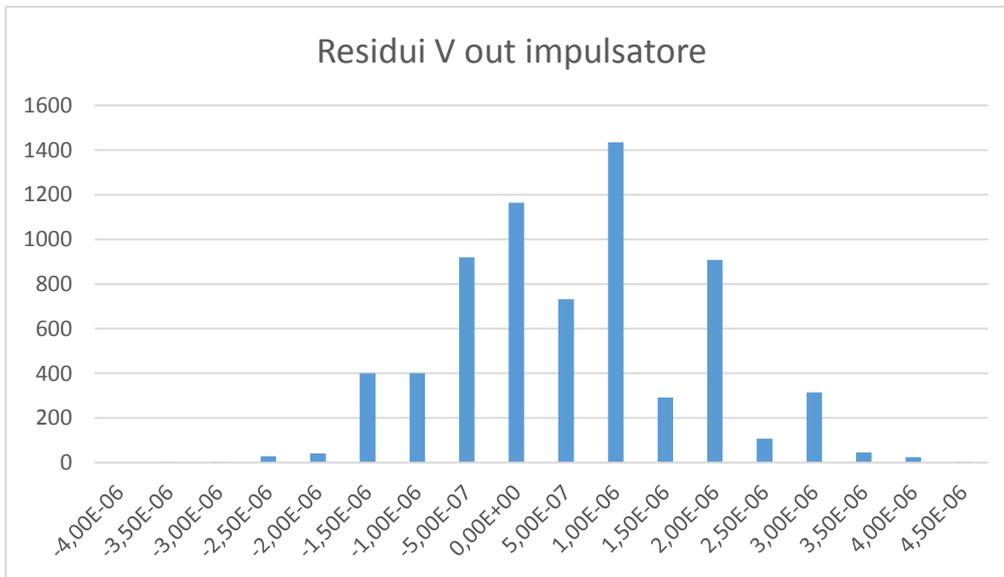


FIGURA 29. DSITRIBUZIONE DEI RESIDUI DI  $V_{OUT}$ .

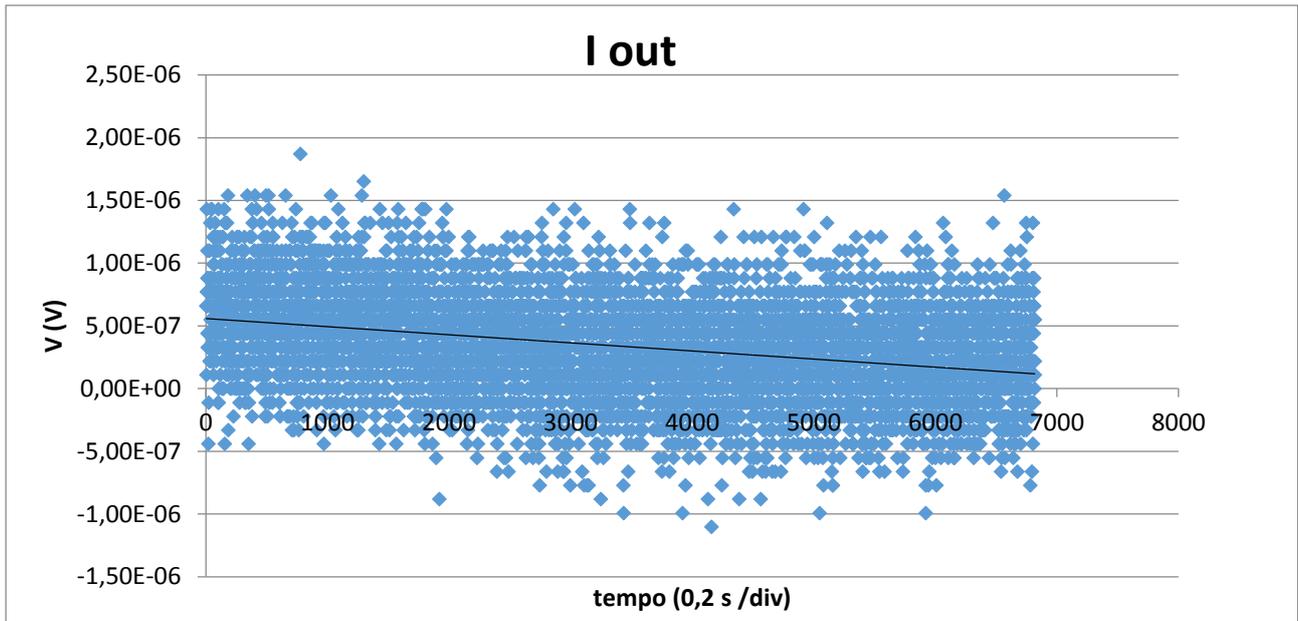


Figura 30. Risposta ad input nullo della tensione ai capi della resistenza nel circuito impulsatore. Risultati fit lineare:  $V = -6.46 * 10^{-7} x + 5.59 * 10^{-7}$ . media=  $(3.38 \pm 3.93) * 10^{-7} V$

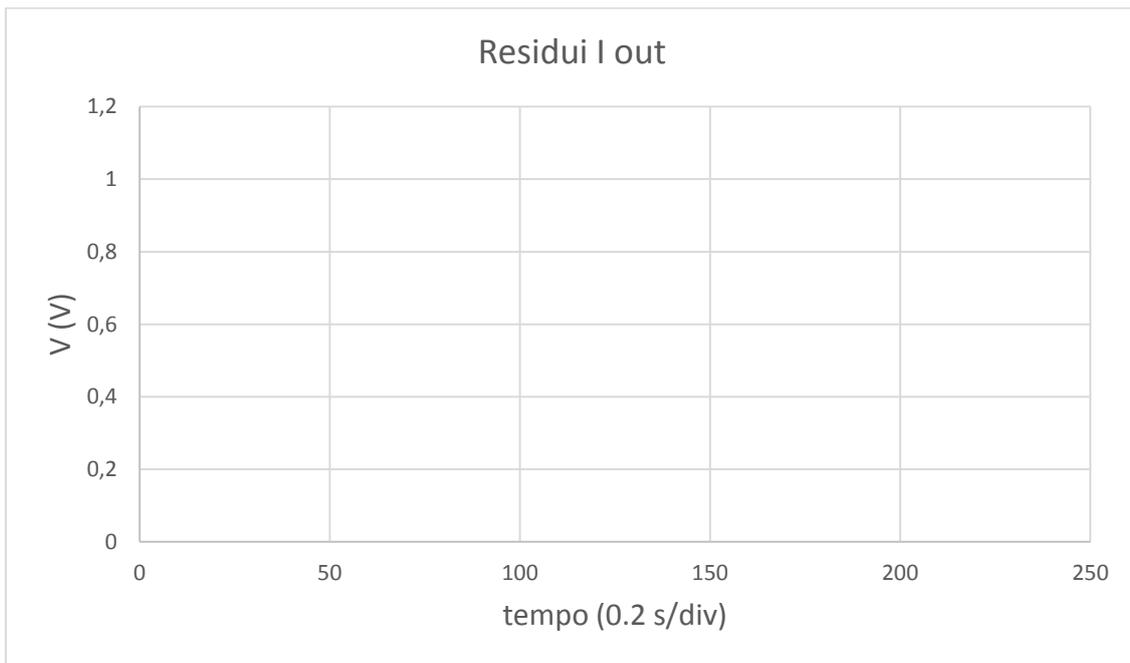
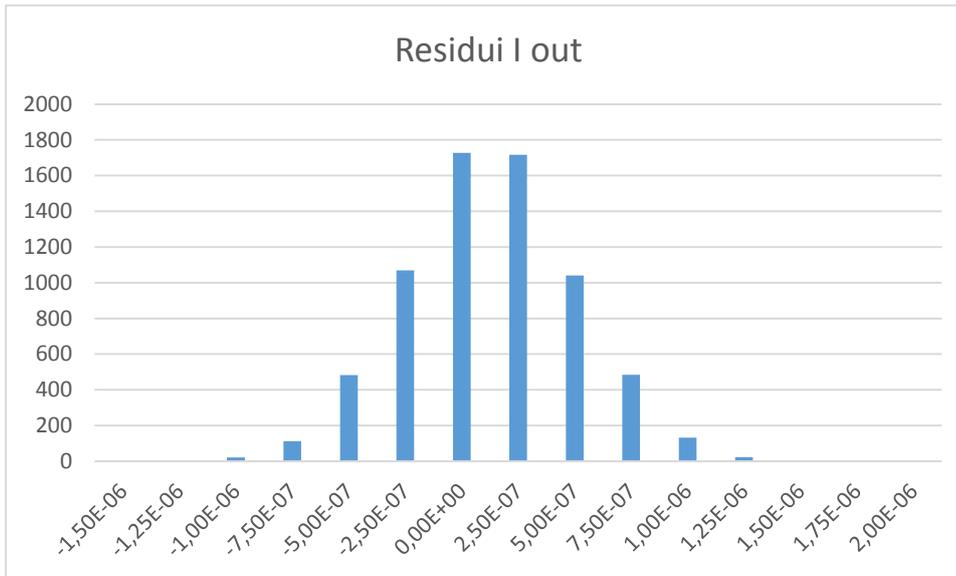


FIGURA 31. RESIDUI DEL FIT IN FIGURA 29.



**FIGURA 32. DISTRIBUZIONE DEI RESIDUI DEL FIT IN FIGURA 29.**

In uscita si misurano tensioni dell'ordine di 20  $\mu\text{V}$  sulla cella e di  $\mu\text{V}$  sulla resistenza, non osservabili con NI9215, quindi ad ingresso nullo corrisponde uscita nulla. Le oscillazioni massime sono dell'ordine dei  $\mu\text{V}$ , ancora una volta grandezze inferiori a quanto possiamo misurare, quindi il rumore non è apprezzabile. Non ci sono state anomalie di funzionamento.

Nei grafici dei residui sono presenti solo una parte dei dati per favorire la leggibilità.

La distribuzione dei residui è simile ad una gaussiana centrata in zero, verifica della bontà del fit.

Carico variabile

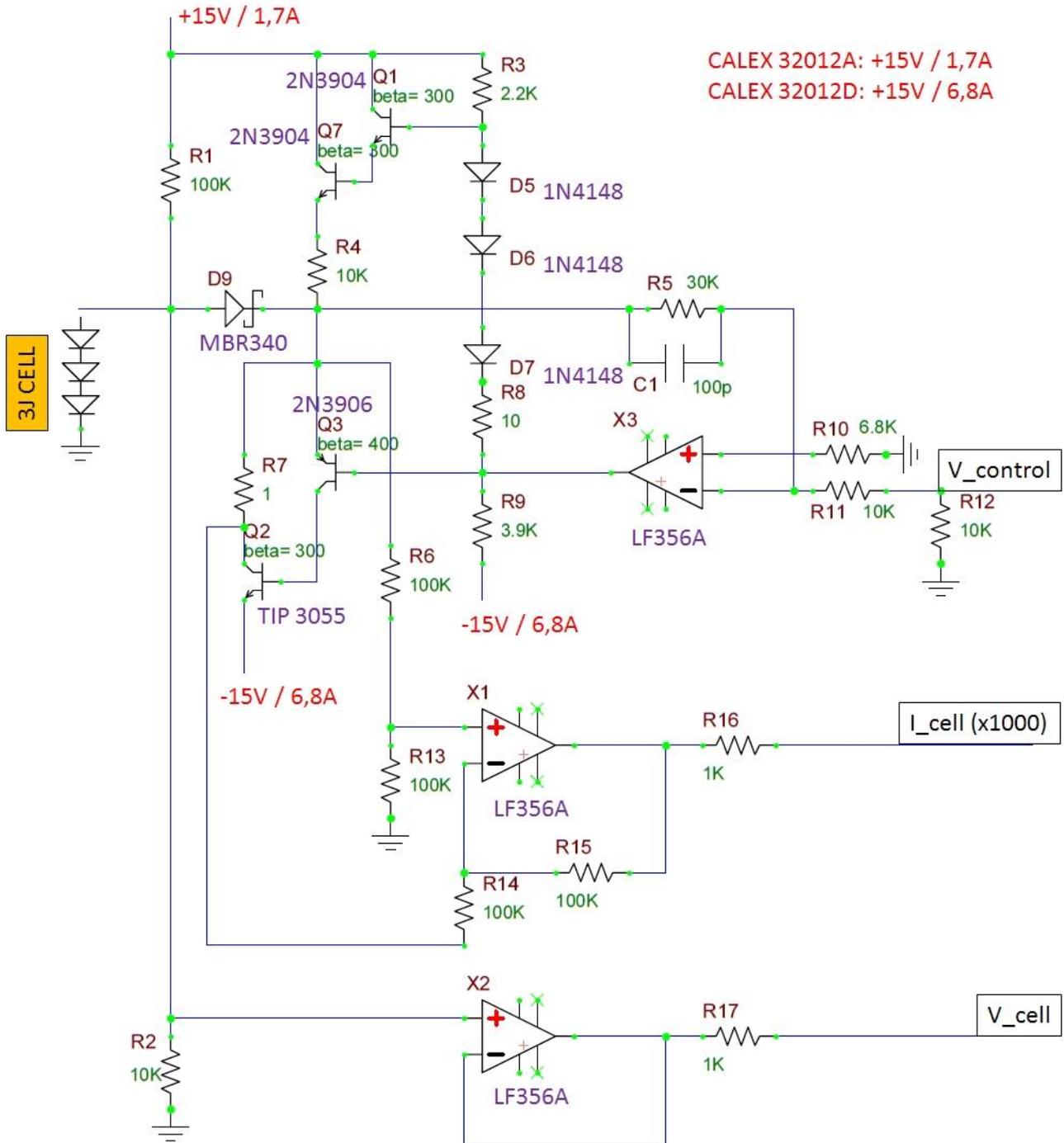


FIGURA 33. SCHEMA DEL CIRCUITO CARICO VARIABILE

### Principio di funzionamento

In ingresso ( $V_{control}$ ) viene fornita una tensione che viene amplificata tramite un amplificatore invertente di un fattore  $-R5/R11 = -3$  nel punto B.

In parallelo a R5 è posta una capacità C1= 100 pF in modo da impostare la frequenza di taglio del circuito, pari a  $1/(R5 * C1) = 333$  kHz. (Figura 34)

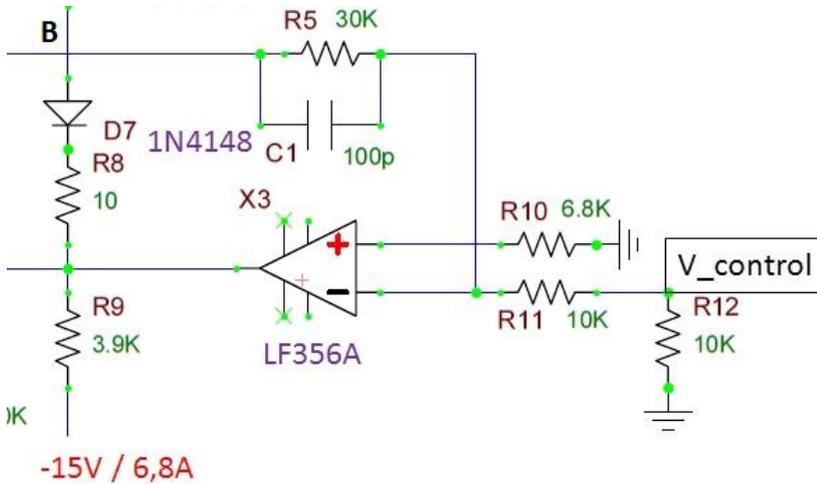


FIGURA 34. INGRESSO DEL CIRCUITO.

Il punto B e il punto A, ovvero il riferimento in tensione della cella, sono separati da un diodo Schottky, D9, che fissa la differenza di potenziale tra A e B ad un valore quasi costante di 0.3 V quando lavora in polarizzazione diretta.

La corrente prodotta dalla cella fluisce attraverso la resistenza R7, dotata di dissipatore, per poi finire nel riferimento negativo di tensione (Figura 35).

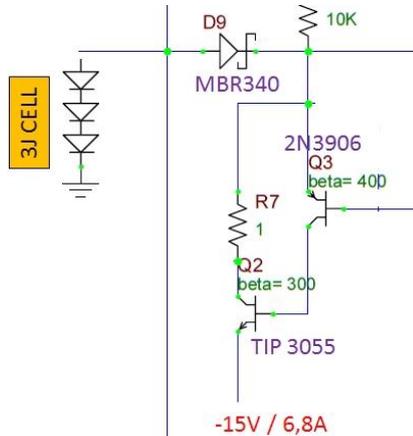


FIGURA 35. CARICO SULLA CELLA E LETTURA DELLA CORRENTE.

In uscita (Figura 36) vengono date le tensioni ai capi di R7 e nel punto A, entrambe amplificate da amplificatori non invertenti a guadagno unitario per avere una piccola impedenza di uscita. Come controllo per eventuali problemi viene data in uscita anche la tensione del punto B, ma senza trattare il segnale con l'amplificatore.

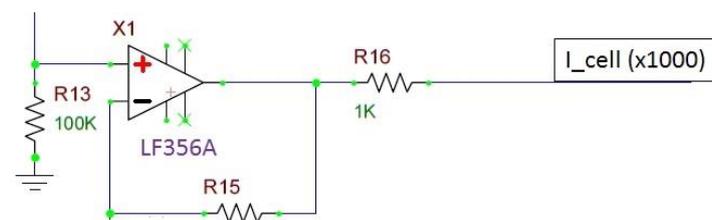


FIGURA 36. USCITA PER LA LETTURA DELLA CORRENTE.

Con questo circuito è possibile leggere la curva I-V della cella in funzionamento controllandone il valore di tensione, partendo da qualunque valore si desideri.

### Limiti di funzionamento

E' presente una corrente di offset dovuta al darlington che finisce nel punto B: esso è sempre tenuto acceso anche a segnale nullo in ingresso; abbiamo misurato questa corrente nella caratterizzazione dello strumento.

Il diodo posto tra A e B deve funzionare in regime di polarizzazione diretta, quindi tra questi due punti deve esservi una tensione di 0.3 V; di conseguenza una cella deve fornire almeno una tensione di 0.3 V per poter misurare un punto. Sotto tale soglia non avremo alcuna misura affidabile dei punti di lavoro.

Il punto A è in un partitore di tensione e la tensione massima che può raggiungere è pari a  $15 V * \frac{100}{110} = 13.63 V$ , il che limita la possibilità di presa dati a 3 celle in serie. Per misurare interi moduli (24 celle) si può ovviare al problema cambiando tipo di partitore.

Inoltre il flusso di corrente finisce nel riferimento negativo di tensione, quindi la corrente massima che può essere rilevata è pari alla corrente massima del generatore del riferimento negativo (nel nostro caso 6.8 A).

Come nel caso del circuito impulsatore, scelte diverse di generatori e transistor possono far superare questi limiti.

### Risposta a segnale nullo in ingresso

Similmente a quanto fatto per il circuito impulsatore, si è cortocircuitato l'ingresso ed acquisito con Agilent 34972 A i tre segnali di uscita (corrente,  $V_A$ ,  $V_B$ ).

Sensibilità su $V_A$	5 digit e ½, 1 V range
Sensibilità su $V_B$	5 digit e ½, 100 mV range
Sensibilità su $V_{RESISTENZA}$	5 digit e ½, 100 mV range
Interval scan	0.3 s
Tempo di misura	20 min 15,896 s

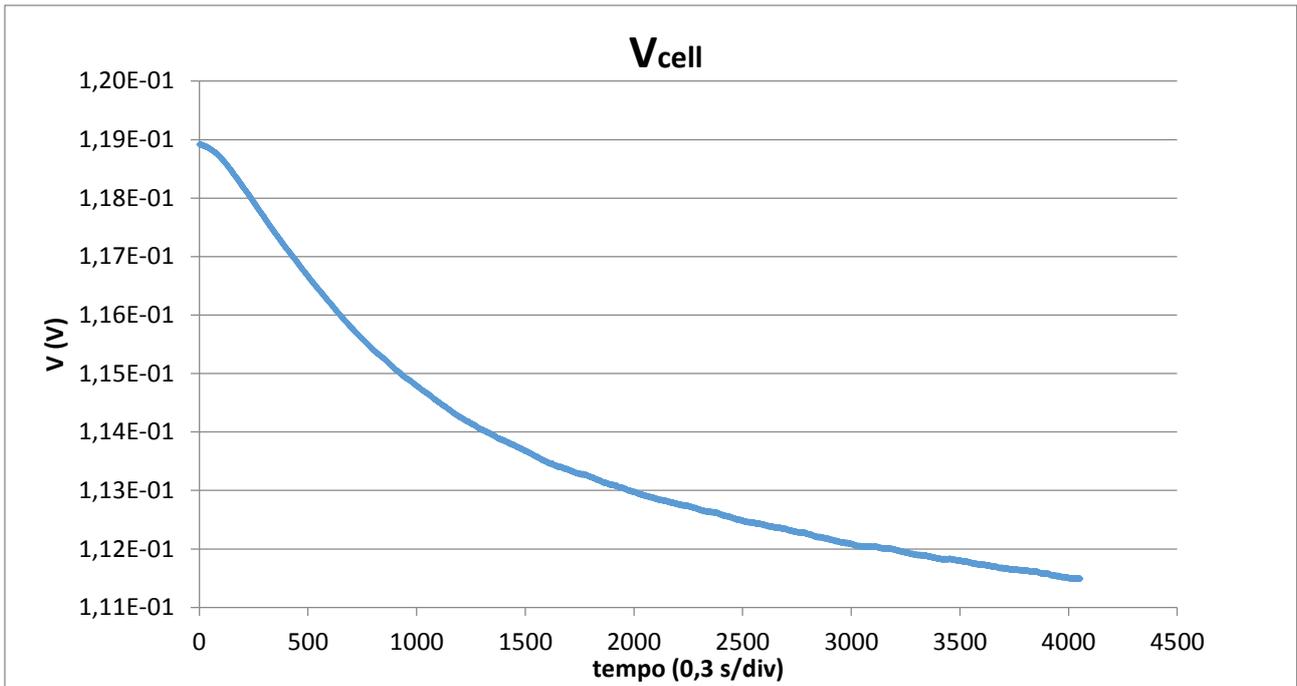


FIGURA 38. TENSIONE NEL PUNTO A IN RISPOSTA A SEGNALE NULLO IN INGRESSO.

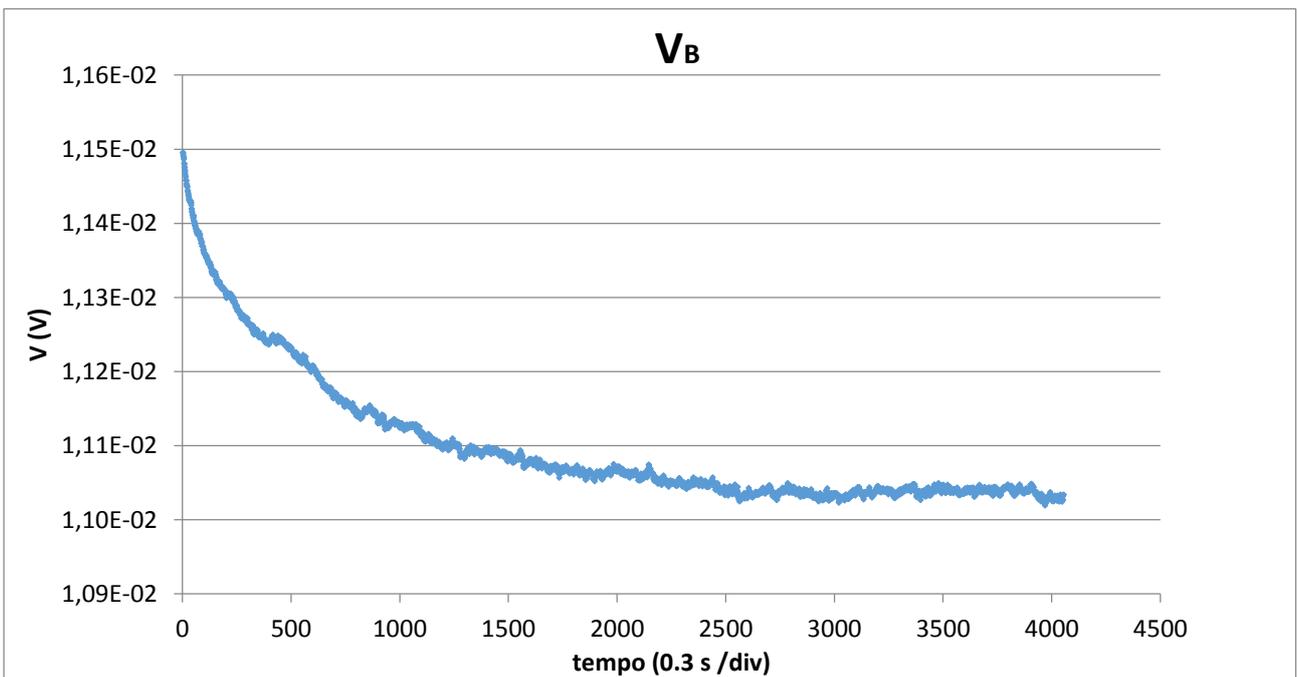


FIGURA 37. TENSIONE NEL PUNTO B IN RISPOSTA A SEGNALE NULLO IN INGRESSO.

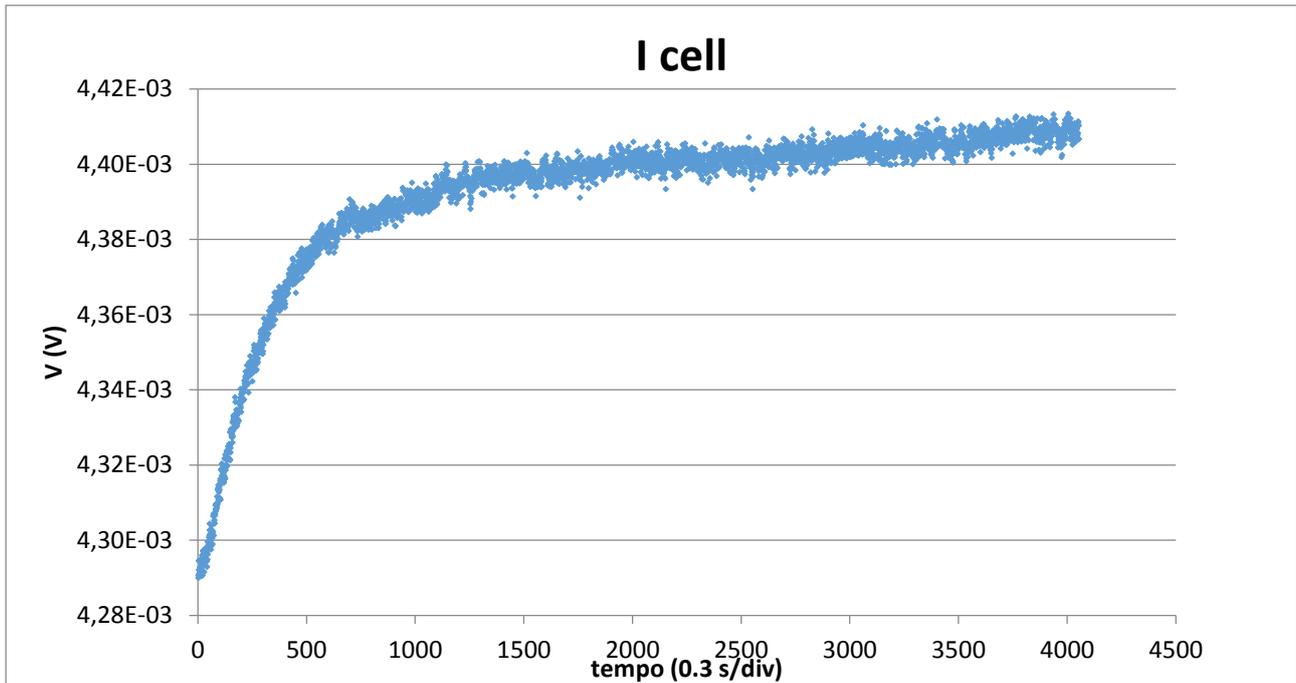


FIGURA 39. TENSIONE AI CAPI DELLA RESISTENZA DA 1 OHM IN RISPOSTA A SEGNALE NULLO IN INGRESSO.

La risposta al cortocircuito presenta andamenti decrescenti nel tempo per  $V_{cell}$  e  $V_B$ , mentre crescenti sulla resistenza. La tensione nei punti A e B si seguono e ciò conferma che il circuito funziona come previsto. I valori di tensione non interessano perché questi saranno governati dalla cella fotovoltaica.

Sulla resistenza vi è una corrente crescente che si attesta su circa 4.40 mA. Questo è un offset dovuto allo stadio di potenza formato dal darlington Q1-Q7 e dovrà essere sottratto ad ogni misurazione di corrente.

## Programma di controllo e acquisizione dati

È stato necessario creare un software che controllasse tutto il sistema e permettesse di:

- impostare i valori di corrente e tensione
- impostare la frequenza di acquisizione e di generazione dei segnali
- visualizzare on line le misure su interfacce grafiche
- estrapolare dalle misure i valori di  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$  e FF
- salvare i dati su file per una successiva analisi dati
- essere portabile su altre macchine e modificabile in futuro

Per fare questo è stato usato il linguaggio di programmazione LabVIEW creando due routine, una per ogni circuito descritto.

La prima routine crea un treno di impulsi che verranno mandati in ingresso al circuito impulsatore; l'utente deve specificare:

- la corrente massima da raggiungere nella cella
- il numero di step intermedi in cui raggiungere la corrente massima (supposti costanti)
- duty-cycle
- lunghezza (in punti) dell'impulso
- frequenza di generazione del segnale (numero di punti generati al secondo)

In funzione di questi parametri la routine crea il segnale, adattando la lunghezza del segnale stesso e la frequenza di campionamento in modo da acquisire solo un punto per ogni impulso, precisamente quello a metà dello stesso. Si è scelto di generare un treno di impulsi e non una rampa per creare tra un impulso e l'altro degli intervalli di raffreddamento della cella, e quindi essere il più vicino possibile a misurare tutti i punti alla stessa temperatura.

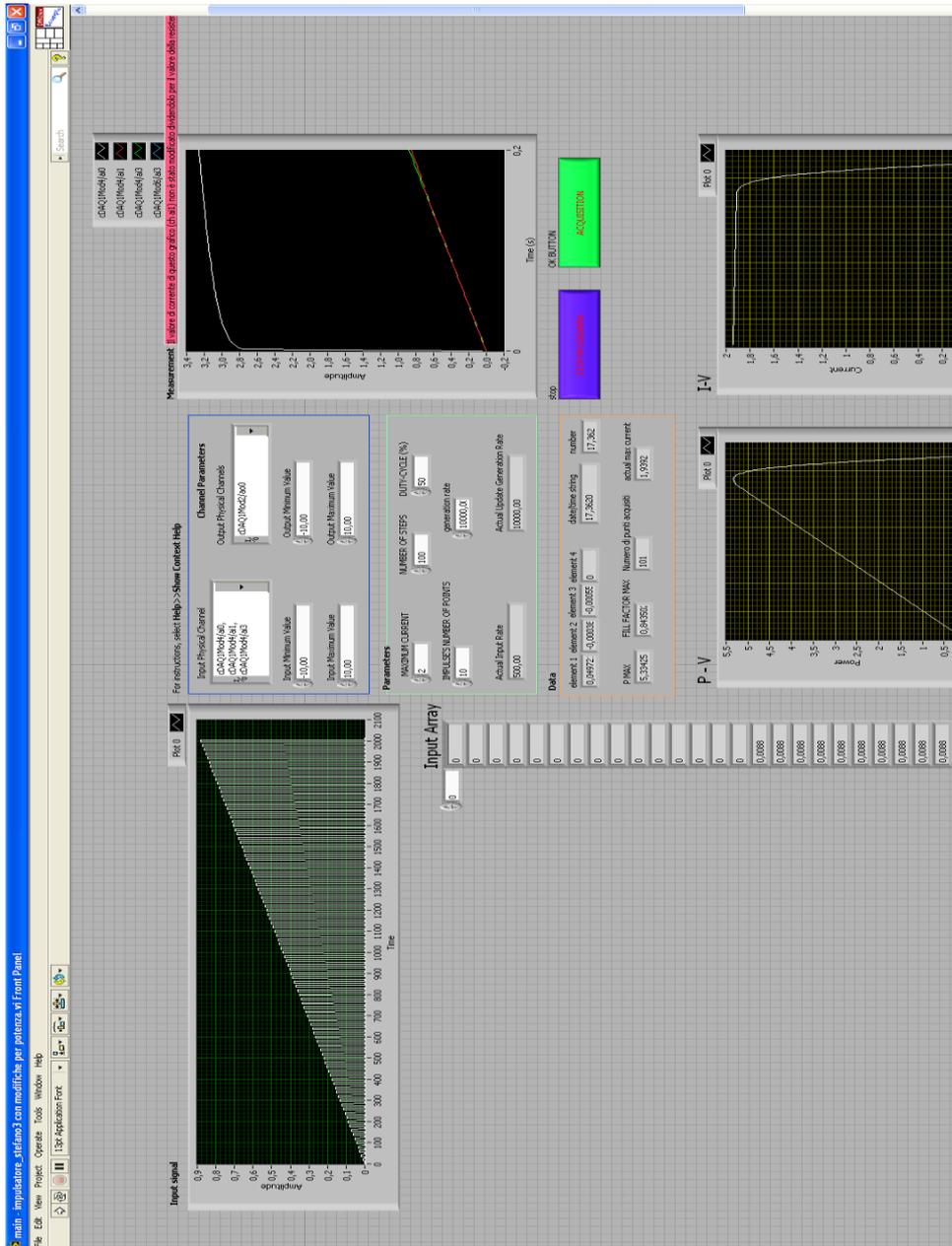
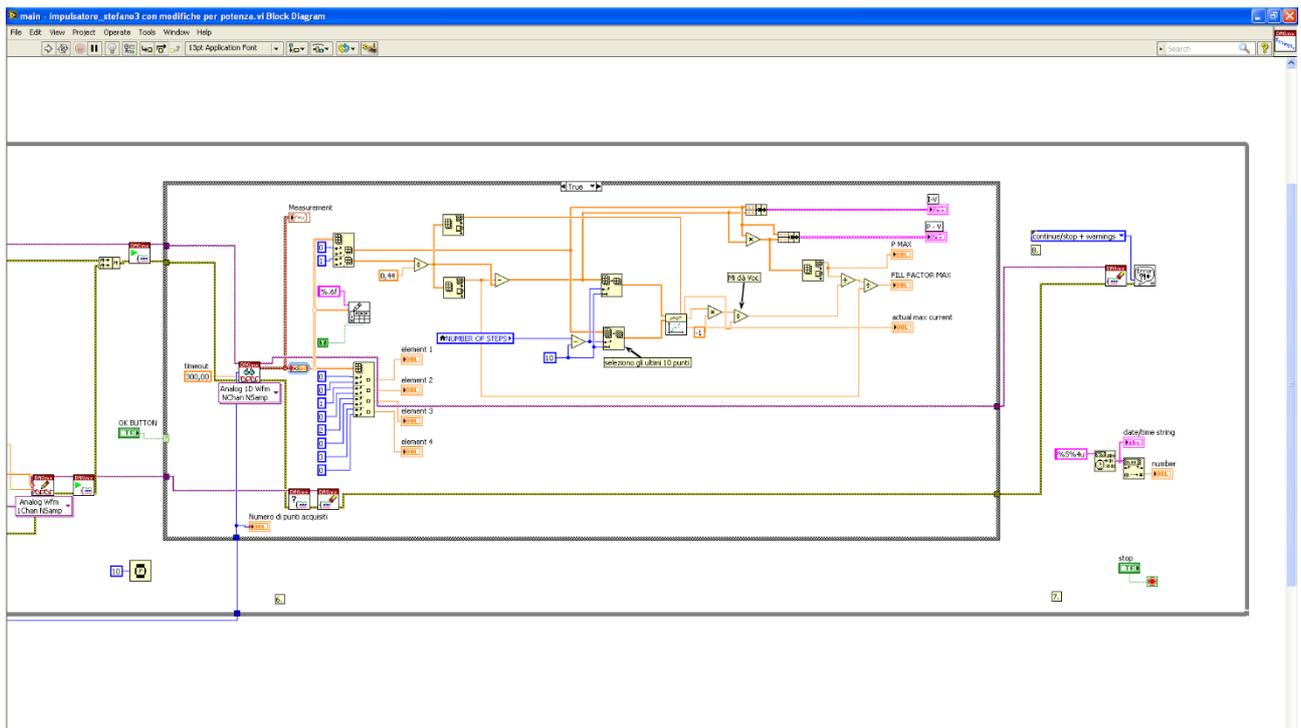


FIGURA 40. SCREENSHOT DELLA ROUTINE LabVIEW PER IL CONTROLLO DEL CIRCUITO IMPULSATORE. IN ALTO A SINISTRA È VISIBILE IL TRENO DI IMPULSI CHE È MANDATO IN INGRESSO. AL CENTRO I CONTROLLI PER LA CONFIGURAZIONE DEI PARAMETRI QUALI FREQUENZA DI GENERAZIONE, CORRENTE MASSIMA, DUTY-CYCLE, LUNGHEZZA DELL'IMPULSO. IN ALTO A DESTRA LA VISUALIZZAZIONE DELLA MISURA. IN BASSO LA CURVA P-V E LA CURVA I-V DELLA CELLA OTTENUTA DALLA TRASFORMAZIONE  $I \rightarrow I$





La seconda routine realizzata crea una rampa di tensione che viene mandati in ingresso al circuito carico variabile; l'utente deve specificare:

- la tensione massima da raggiungere ai capi della cella
- il numero di step intermedi in cui raggiungere la tensione massima (supposti costanti)
- frequenza di generazione del segnale (numero di punti generati al secondo)
- frequenza di lettura di segnale
- una soglia di trigger

La routine continua a mandare una rampa di tensione in ingresso, leggendo i valori; quando la tensione supera la soglia di trigger impostata, l'acquisizione viene salvata automaticamente in una cartella preimpostata con nome la data e l'ora. In questo modo si possono acquisire solo i dati di celle abbastanza illuminate da generare una tensione significativa.

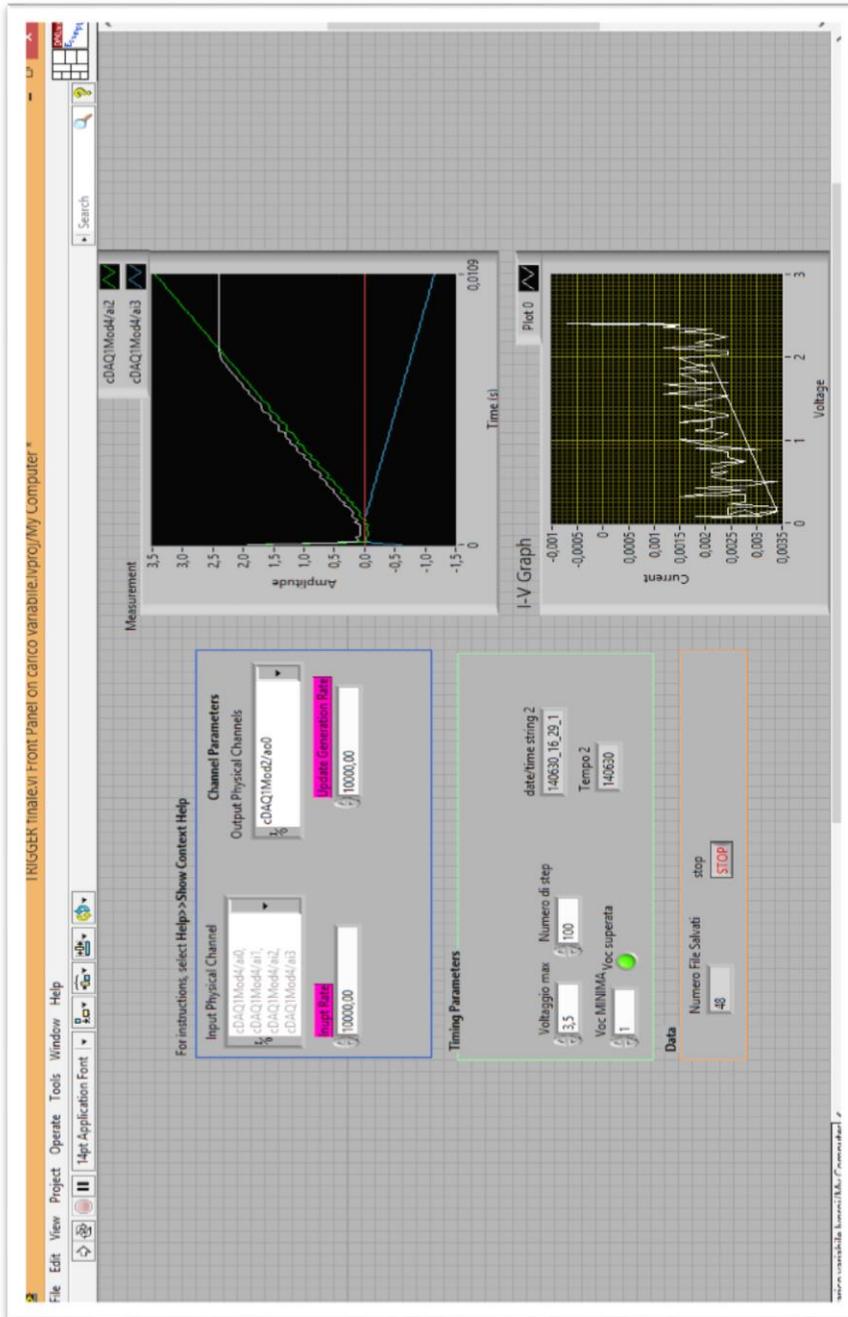
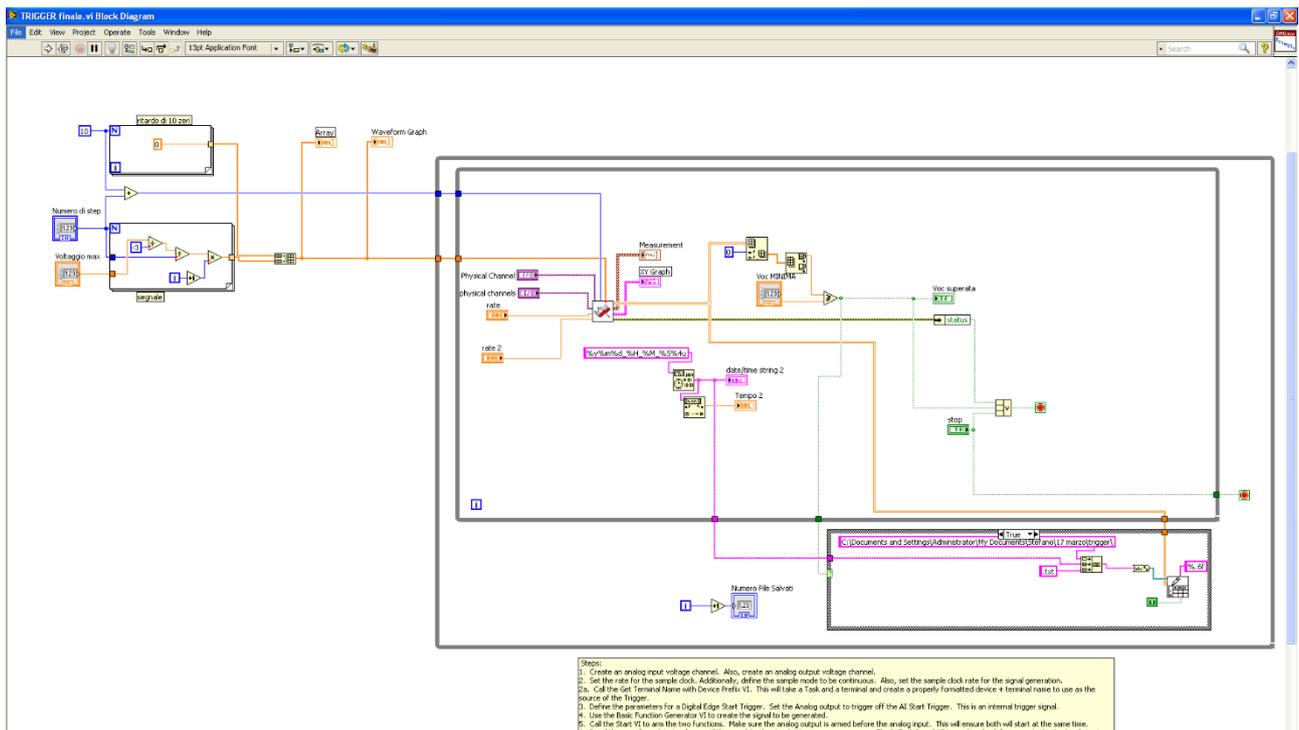


FIGURA 42. SCREENSHOT DELLA ROUTINE CHE CONTROLLA IL CIRCUITO CARICO VARIABILE. A SINISTRA I CONTROLLI PER SCEGLIERE FREQUENZA DI GENERAZIONE E CAMPIONAMENTO, LA TENSIONE MASSIMA DA RAGGIUNGERE, LA SOGLIA DI TRIGGER, IL NUMERO DI PUNTI DELLA RAMPA. A SINISTRA IL GRAFICO DEGLI OUTPUT E LA CURVA I-V DELLA CELLA.



**FIGURA 43. SCREENSHOT DEL BLOCK DIAGRAMA DELLA ROUTINE CHE CONTROLLA IL CARICO VARIABILE. LA COMPLESSITÀ È NASCOSTA DALL'UTILIZZO DI SUBROUTINE.**

In entrambe le routine i dati vengono salvati in un file txt mentre a schermo si possono visualizzare i grafici del segnale d'ingresso, segnali in uscita, curva IV della cella e curva di potenza. Vengono inoltre visualizzate la potenza massima, la Voc e la I<sub>sc</sub> calcolate tramite fit lineare dei 10 punti più vicini a tali valori.

Dato che i moduli NI9215 e NI9263 non sono calibrati, per poter migliorare la stima dell'errore si è ripetuta 29 volte la stessa misura su una sola cella. Ogni punto delle 29 misure è stato mediato con gli altri e si è ricavato l'errore per ogni punto, studiandone l'andamento.

Nel caso dell'impulsatore si è posto  $I_{MAX} = 1$  A, 100 step, duty-cycle 20%, generation rate 1000 Hz, una lunghezza dell'impulso 10 punti quindi lungo 10 ms.

Per il carico variabile invece si sono acquisite 30 curve di 110 punti l'una alla frequenza di 10000 Hz (durata singola misura 11 ms) di una cella Spectrolab montata sul modulo concentratore in fase di studio ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

Dal campione, supponendo una distribuzione gaussiana, si è ottenuto (si guardino i grafici come riferimento).

**IMPULSATORE:**

$\sigma_{rel}(V\ out) < 0.2\%$  (tranne nel punto iniziale, quando  $V_{input}=0$ ). Intervallo delle tensioni misurate: 2.7 – 3.19 V

$\sigma_{rel}(I_{out})$  decrescente, partendo da circa 4 % a  $V= 10,5$  mV fino ad essere minore di 0.6% da  $V= 80$  mV in poi ed assestandosi sotto lo 0.2% da  $V = 230$  mV.

$\sigma_{rel}(V_{input})$  lo stesso andamento di  $\sigma(I_{out})$ .

Da questi dati assegniamo alle nostre misure una  $\sigma = 0.2$  % per misure da 0.230 V in su, mentre usiamo le specifiche non calibrate per misure inferiori, ovvero  $\sigma = 0.6$  %

CARICO VARIABILE:

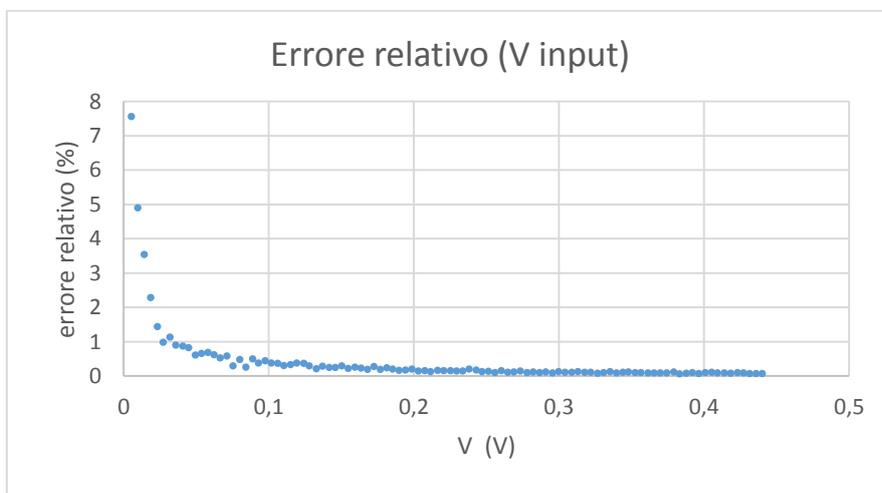
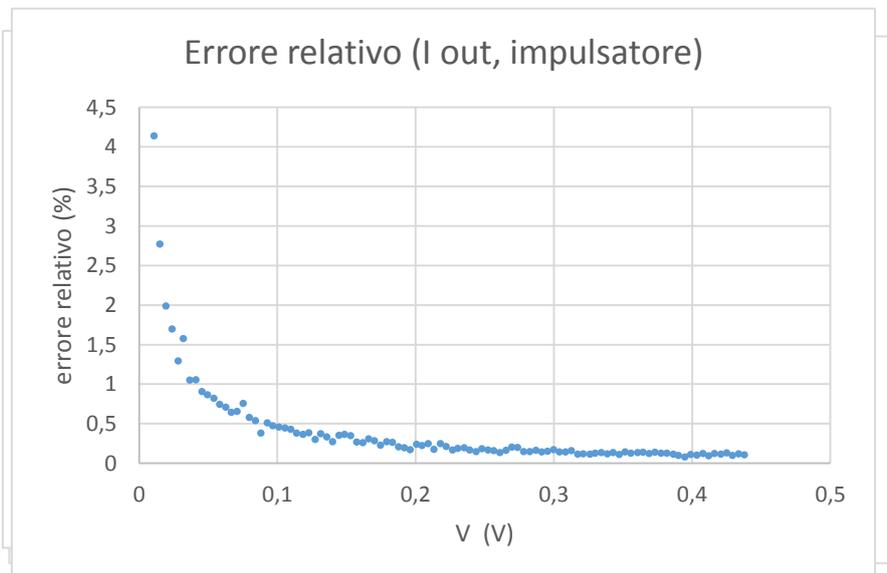
$\sigma_{rel}(V_{cell}) < 0.6\%$  da 0.5 V e minore di 0.4% da 1 V in su.

$\sigma_{rel}(I_{cell})$  sempre minore di 0,6%, abbiamo quasi tutti i punti vicino alla  $I_{sc}$ .

$\sigma_{rel}(V_{input})$  non c'è stato bisogno di rifarlo perché non cambia nulla rispetto all'altro circuito, non essendo modificato da questo.

Per prudenza assegniamo un errore relativo dello 0,6% a tutte le misure di  $V_{cell}$  e  $I_{cell}$ .

Anche per l'errore sul fill-factor invece di propagare gli errori si è usato lo stesso metodo, ottenendo una  $\sigma(FF) = 0.0015$



## Giunzioni Tunnel

Nello sviluppo dei sistemi a concentrazione si tende ad aumentare sempre di più la concentrazione di radiazione solare su ogni singola cella, così da ottenere una maggiore potenza da ognuna di esse. Per realizzare un impianto di una determinata potenza servirebbero dunque meno celle, che sono una delle componenti che più influiscono sul costo totale.

Andare ad altissime concentrazioni (2000-3000 X) comporta problemi di raffreddamento e precisione ottica che potrebbero fare lievitare i costi, ma prima di tutto bisogna indagare i limiti delle celle attualmente a disposizione; questi non sono noti perché i produttori divulgano informazioni solamente sul range di concentrazioni per cui è ottimizzata la cella. In particolare non ci è noto se a concentrazioni molto più alte di quelle attualmente utilizzate la cella dia ancora risultati soddisfacenti.

Sicuramente uno dei limiti strutturali della cella è dato dalle caratteristiche delle giunzioni tunnel che permettono il passaggio di corrente da una sottocella all'altra. Queste giunzioni hanno un valore limite di densità di corrente oltre il quale provocano significative perdite di tensione; tali perdite diminuiscono la tensione massima esprimibile dalla cella, producendo perdite di potenza.

La giunzione tunnel (TJ, tunnel junction) è una giunzione pn in cui il drogaggio è così elevato da fare in modo che i livelli energetici degli elettroni in banda di conduzione nel lato n siano circa alla stessa energia delle buche in banda di valenza nel lato p. La curva I-V in polarizzazione diretta (Figura 44) è composta da tre zone. A basse tensioni si ha la zona tunnel, a pendenza positiva, in cui i livelli energetici di elettroni e buche sono ben allineati. Aumentando la tensione si ha la zona a resistenza negativa in cui i livelli energetici si disallineano e la corrente trasmessa cala. Infine si ha la zona a diffusione termica in cui la tensione è abbastanza alta da far oltrepassare la barriera di potenziale ai portatori di carica e l'andamento è quello del classico diodo secondo la legge di Shockley  $I = I_0 e^{\frac{V}{V_T}}$ .

Sotto polarizzazione inversa la TJ conduce facilmente molta corrente con piccole cadute di potenziale e senza zone a resistenza negativa.

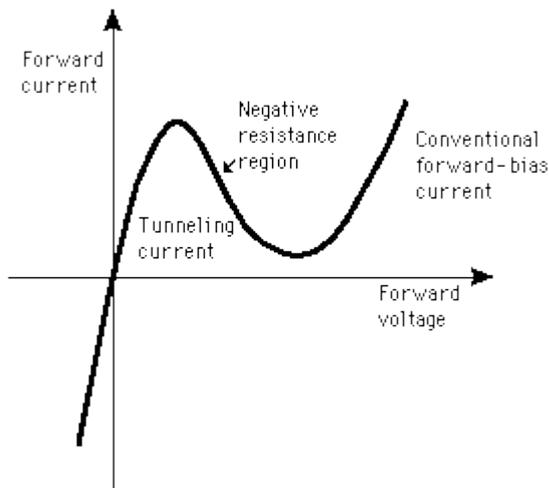


FIGURA 44. CURVA IV DI UN DIODO TUNNEL TIPO. È BEN VISIBILE IL FLESSO CHE È LA ZONA DI CUI SI CERCA L'EFFETTO NELLE NOSTRE MISURE.

Come già osservato, queste giunzioni sono fondamentali nelle celle MJ per permettere il passaggio di corrente; esse devono possedere un'elevata trasmittanza ottica (non sono loro a dover assorbire i fotoni) e devono essere capaci di far passare un'elevata corrente con una piccola caduta di potenziale (ovvero avere una piccola resistenza in serie). Buoni risultati si ottengono con materiali a bassa band gap che favoriscono l'effetto tunnel. Attualmente valori record si attestano intorno ai 2000 A/cm<sup>2</sup> e 50 mV di caduta sotto una concentrazione di 6000 soli<sup>1</sup>.

Le TJ sono spesso modellizzate come cortocircuiti o resistori, ma questo approccio non è soddisfacente ad alte densità di corrente, poiché si esce dalla zona tunnel e si hanno discontinuità nella tensione ai suoi capi.<sup>1</sup>

La curva caratteristica della densità di corrente in funzione della tensione (figura 1) è caratterizzata da un picco  $J_p$  dove il diodo passa dalla zona tunnel alla zona a resistenza inversa.

Misurando la curva JV solo del diodo tunnel con uno sweep di tensione, con un sistema simile a quello in Figura 45, i punti di lavoro sono determinati dagli incroci tra la curva e le rette di pendenza  $-1/R_{s,ext}$ , dove  $R_{s,ext}$  è la resistenza in serie alla misura (somma della resistenza di misura,  $R_{meas}$ , e della resistenze interne alla cella dovuta ai cavi e alle perdite resistive per la non idealità dei componenti quali bus e fingers, comprese in  $R_s$ )<sup>2</sup>. Con riferimento alla Figura 46, piccole resistenze (linea a puntini) danno un solo punto di lavoro per ogni tensione, mentre resistenze maggiori generano 2 o 3 punti di lavoro. Ciò genera una discontinuità nella curva di acquisizione: facendo crescere la tensione (forward sweep) si genererà un passaggio diretto da A ad A', mentre facendola diminuire (backward sweep) ci sarà un salto da B a B'. Un esempio di tale comportamento è visibile in Figura 47.

Nelle nostre celle sono presenti due diodi tunnel; per semplificare consideriamo ora solamente una cella in serie ad un diodo tunnel.

Approssimando la cella fotovoltaica ad un diodo e generatore di corrente, il diodo tunnel è polarizzato in senso inverso rispetto al diodo della cella. La curva JV è quindi la somma delle due curve.

In Figura 48 è mostrato il grafico di una cella non illuminata (dark-curve) (linea tratteggiata), del diodo tunnel (linea a puntini) e la loro somma (linea piena).

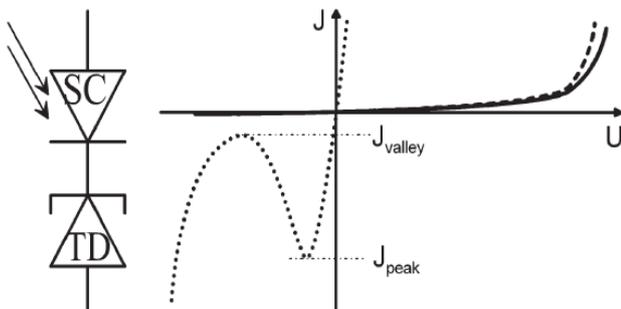


FIGURA 48. CURVA I-V RISULTANTE DALL'INSIEME DI CELLA FOTOVOLTAICA E GIUNZIONE TUNNEL

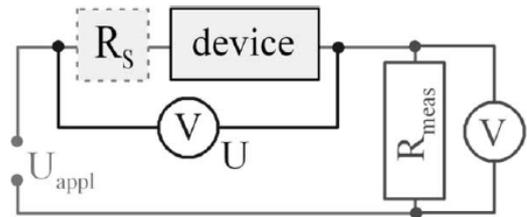


FIGURA 45. MISURA DI UN DIODO TUNNEL TRAMITE SWEEP DI TENSIONE U APPL. I DUE VOLTMETRI PERMETTONO DI MISURARE LA TENSIONE AI CAPI DEL DIODO E, CONOSCENDO  $R_{MEAS}$ , LA CORRENTE.

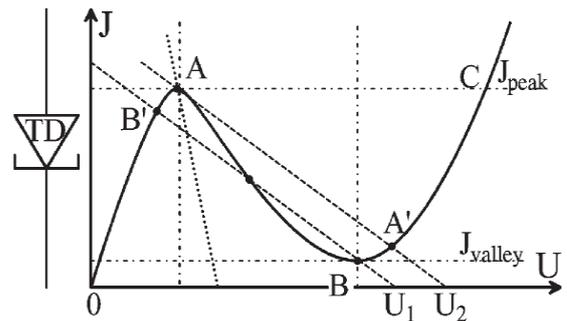


FIGURA 46

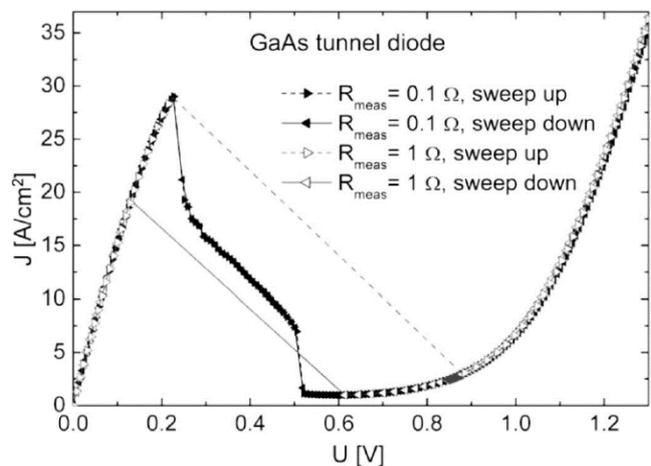


FIGURA 47. EFFETTO DI  $R_{MEAS}$  SULLA MISURA DELLA CURVA I-V DEL DIODO TUNNEL

Illuminando la cella, questa crea una corrente negativa; convenzionalmente si riflette la curva nel primo quadrante e si ottengono le curve in Figura 49.

In 6 a) è rappresentato il caso in cui  $J < J_P$ : il diodo lavora sempre per effetto tunnel.

In 6 b) invece  $J > J_P$  e il diodo tunnel lavora in zona di resistenza termica, provocando un abbassamento di tensione lunga la curva.

Se  $J < J_P$  esistono tre diverse tensioni a cui il diodo può lavorare; è noto che la giunzione tende a rimanere nella stessa regione di funzionamento fino a quando è possibile, quindi partendo da cella spenta ( $J=0$ ) il diodo lavora in zona tunnel e la caduta di potenziale è piccola.

Se  $J > J_P$  invece la curva è fortemente deformata dalle tensioni negative del diodo tunnel e lungo la curva JV la corrente cala sotto il valore di soglia, per poi risalire fino ad esso e poi riscendere fino a  $V_{oc}$ . Questo andamento può provocare grosse perdite di potenza.

La cella fissa la densità di corrente  $J$  di lavoro. Fissata  $J$ , come nella discussione per un singolo diodo tunnel, la caduta di potenziale è determinata dalle rette di pendenza  $-1/R_{s,ext}$ .

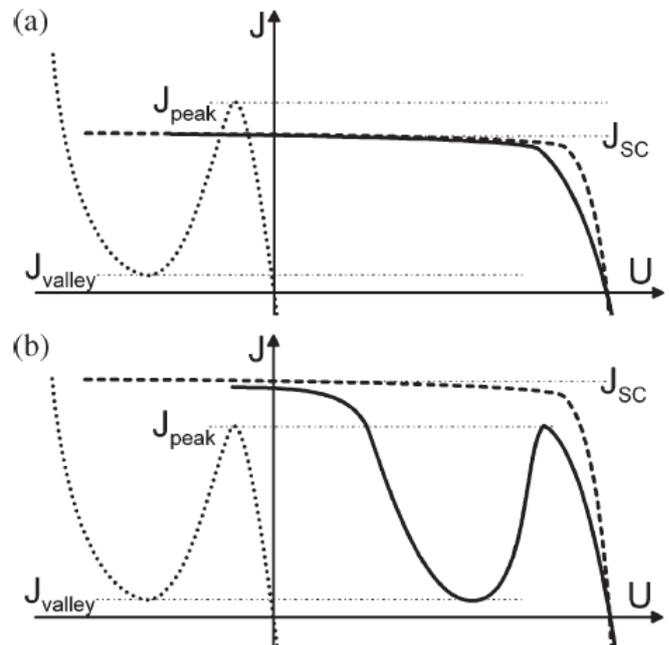


FIGURA 49. A) CURVA CARATTERISTICA IN CASO  $J_{SC} < J_{PEAK}$ . B) CURVA CARATTERISTICA IN CASO  $J_{SC} > J_{PEAK}$

Quindi, operativamente, misurando la curva dell'insieme cella/diodo tunnel con una ineliminabile  $R_s$  dovuta a non-idealità e allo stesso carico di misura seguiremo le curve in Figura 50. Con un forward sweep si avrà la transizione da A ad A', mentre in backward sweep da B a B'. La differenza tra i due sweep si elimina se la  $R_s$  è abbastanza piccola da permettere un solo punto di lavoro per una determinata tensione (retta a puntini).

Nel nostro caso di cella a multigiunzione il ragionamento è esattamente lo stesso, semplicemente si aggiungono altre sottocelle e diodi tunnel che possono generare il fenomeno.

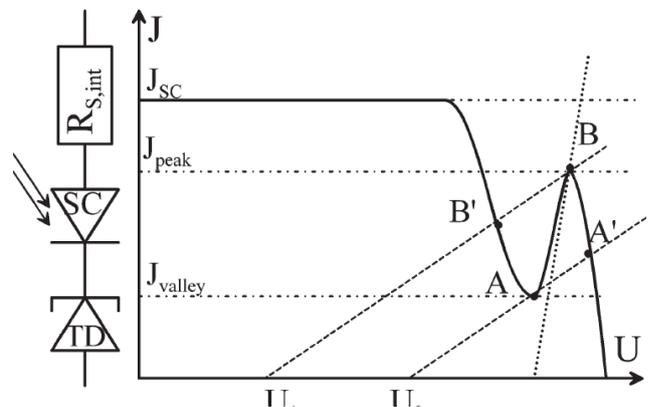


FIGURA 50. I PUNTI DI LAVORO DEL SISTEMA A SINISTRA SONO DETERMINATI DALLE RETTE DI PENDENZA  $1/R_{INT}$

Recentemente Braun et al. hanno osservato la discontinuità dovuta al superamento della corrente di soglia  $J_p$ , vicino al punto di massima potenza<sup>3</sup>. Grazie ad una fibra ottica hanno concentrato la luce su una superficie minore di quella della cella osservando la discontinuità ad una concentrazione minima di 838 soli (Figura 52).

Il fatto che la concentrazione sia localizzata su una zona più piccola della cella intera non dà problemi nell'insorgenza della discontinuità perché questa dipende dalla densità di corrente sulla giunzione tunnel.

Detto questo si è però osservato come il diminuire della zona illuminata porti ad un aumento della minima  $J_p$  a cui si presenta l'effetto; la causa proposta dagli autori è lo spread laterale dei portatori di carica maggioritari dovuto a drift e a diffusione che permette di far passare queste cariche attraverso una superficie più grande di quella direttamente illuminata. Così viene osservata una densità di corrente limite più elevata di quella caratteristica del diodo (Figura 51).

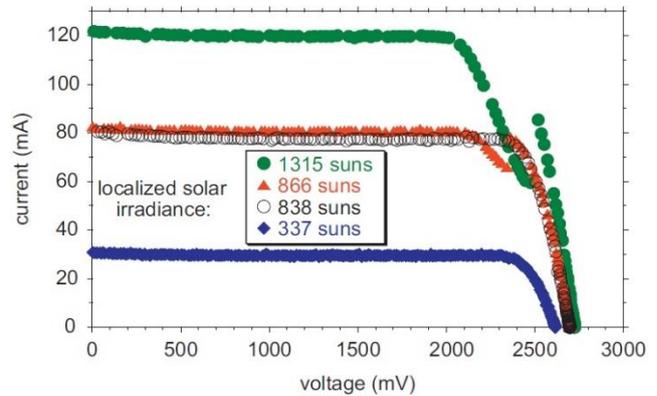


Figura 52. Curva I-V di una cella a multigiunzione. Fonte: Braun et al.<sup>3</sup>. Nelle curve rossa e verde è presente una discontinuità dovuta al superamento della densità di corrente limite dei diodi tunnel

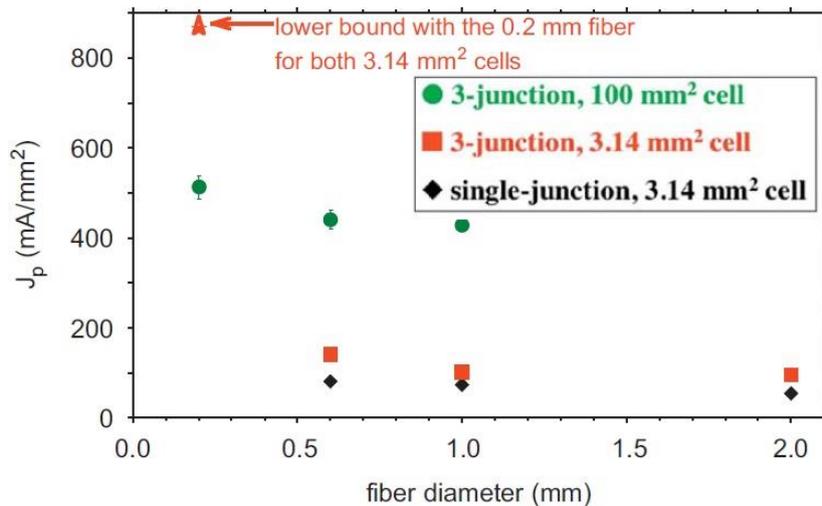


FIGURA 51. DIPENDENZA DELL'INSORGERE DI DISCONTINUITÀ DELLA CURVA I-V DAL RAPPORTO DIMENSIONI DELLA ZONA ILLUMINATA/DIMENSIONI CELLA. AL CRESCERE DEL DIAMETRO DELLA FIBRA OTTICA, LA CUI SEZIONE CORRISPONDENTE ALLA ZONA DI ILLUMINAZIONE, L'INSORGERE DELLA DISCONTINUITÀ È A DENSITÀ DI CORRENTE PIÙ BASSE, FINO AL VALORE LIMITE DETERMINATO DALLE GIUNZIONI TUNNEL (SI GUARDI L'ANDAMENTO DELLE TRE SERIE DI PUNTI). A PARITÀ DI ZONA ILLUMINATA, UNA CELLA PIÙ GRANDE PRESENTA DISCONTINUITÀ A DENSITÀ DI CORRENTE MAGGIORI (SI CONFRONTINO I PUNTI VERDI E I ROSSI)

## Ricerca dell'effetto dei diodi tunnel ad alte densità di corrente

Il nostro obiettivo era aumentare la concentrazione sulla cella a tripla giunzione (3J) in nostro possesso fino a quando non avessimo osservato una discontinuità nella curva I-V dovuta ai diodi tunnel.

Per raggiungere alte concentrazioni di luce abbiamo utilizzato una lente di Fresnel in PMMA, piana e rettangolare di 130 cm X 100 cm di lato, di tipo sferico.

Per prima cosa abbiamo misurato la distanza di fuoco pari a (117.1+-1) cm.

Dato che il Sole visto dalla Terra ha un angolo di vista di 0.52°, abbiamo simulato tale angolo ponendo a 30 m di distanza dalla lente un paio di lampadine distanziate tra loro di 27 cm. La distanza minima misurata tra i due spot luminosi focalizzati dalla lente è risultata di (14+-1) mm.

La massima concentrazione (geometrica) possibile è quindi, considerando una maschera circolare di diametro 1000

mm, pari a  $C_{geom,max} = \frac{(D/2)^2 \pi}{(d/2)^2 \pi} = \left(\frac{1000}{14}\right)^2 \sim 5102 \text{ soli}$

Questo però è un valore irraggiungibile a causa delle aberrazioni della lente.

Dato il rapporto focale quasi uguale ad 1, queste saranno particolarmente importanti e rischiano di limitare in corrente una delle tre giunzioni, rendendo inutile la concentrazione. Prime misure hanno evidenziato che la concentrazione solare effettiva sulla cella, anche considerando le perdite per riflessione, era 3 volte inferiore a quanto atteso, evidentemente per effetto delle aberrazioni cromatica e sferica.

Si è quindi reso necessario ridurre la superficie della lente utilizzata in modo da diminuire tali aberrazioni e contemporaneamente costruire un sistema ottico secondario che concentrasse ulteriormente la luce.

La soluzione è stata una guida di luce in due stadi.

Il primo stadio è una tramoggia in alluminio; essa sfrutta le proprietà di riflessione dell'alluminio (Figura 53) che ad angoli di incidenza maggiori di 70° è quasi totale. La tramoggia è stata quindi dimensionata per verificare la condizione di riflessione totale per qualunque maschera utilizzassimo.

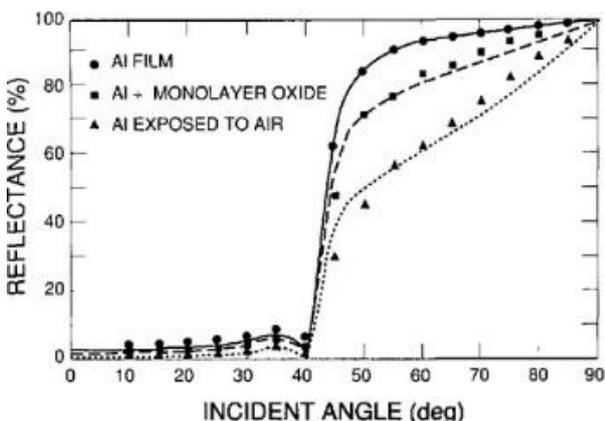


FIGURA 53. RIFLETTANZA DELL'ALLUMINIO IN FUNZIONE DELL'ANGOLO DI INCIDENZA.

Il secondo stadio è un prisma di quarzo a forma di tronco di piramide incollato sulla cella (visualizzata in Figura 54), con duplice funzione: concentrare ulteriormente la luce ed uniformare il profilo di illuminazione. È noto infatti che profili non uniformi diminuiscono la corrente massima e ritardano la comparsa degli effetti della giunzione tunnel<sup>1,3</sup>.

La cella è costruita per lavorare sotto i 100° C, quindi è stato necessario prevedere un sistema di raffreddamento costituito da un blocco di alluminio di 3.60 kg e dimensioni 50.2 cm X 5.0 cm X 5.0 cm, su cui è stato ricavato un apposito alloggiamento. E' importante raggiungere una situazione di equilibrio termodinamico perché solo in tal caso valgono le relazioni di reciprocità. Uno zoom del sistema è visibile in Figura 55



FIGURA 55. SISTEMA COMPOSTO DA TRAMOGGIA IN ALLUMINIO, PRISMA, CELLA, BLOCCO DI ALLUMINIO PER DISSIPAZIONE.

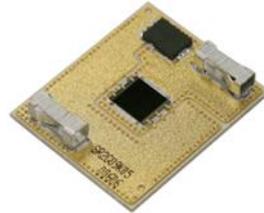


FIGURA 54. CELLA 3J EMCORE UTILIZZATA.

Per poter misurare la temperatura utilizziamo  $V_{OC}$ ; infatti, ricordiamo che  $V_{OC} = \frac{\eta k T}{q} \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1\right)$

E anche  $I_{SC}$  e  $I_0$  dipendono dalla temperatura, precisamente si ha  $I_0 \propto T^{3+\gamma/2} e^{-\frac{E_g}{kT}}$

con  $E_g$  energy gap e  $\gamma$  parametro da determinare. Da queste due equazioni si dimostra che <sup>4</sup>

$$\frac{\partial V_{OC}}{\partial T} = -\frac{1}{T} \left( \frac{n}{q} E_g - V_{OC} + \frac{n k T}{q} \left( 3 + \frac{\gamma}{2} \right) \right) + \frac{n k T}{q} \frac{1}{I_{SC}} \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} + \frac{n}{q} \frac{\partial E_g}{\partial T}$$

Questa equazione è complessa ma esperimenti hanno provato che a parità di concentrazione la variazione di  $V_{OC}$  è lineare<sup>5,6</sup> (Figura 56). Da  $V_{OC}$  possiamo allora determinare la temperatura della cella.

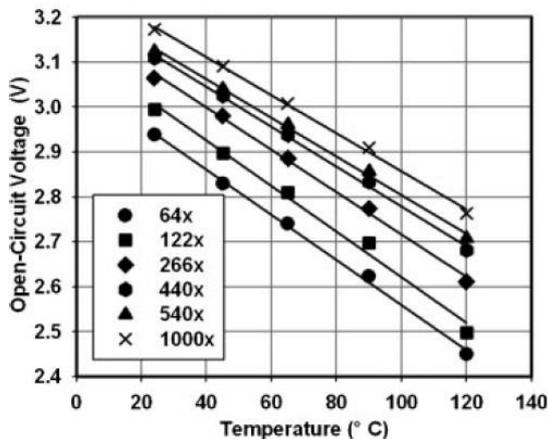


Figura 56. Linearità tra  $V_{OC}$  e temperatura. Fonte: Kinsey et al.<sup>5</sup>

L'equazione di conduzione del calore è

$$\dot{Q}/k = \frac{1}{\alpha} \dot{T} - \nabla^2 T$$

dove Q è il calore e  $\alpha$  è la diffusività termica, k la conduttività termica, entrambe caratteristiche di ogni materiale. Nel nostro caso la cella è saldata su una scheda multistrato formata da rame-allumina-rame. Infine tra la base della scheda e l'alluminio si è inserito uno strato di pasta termica. È molto complesso risolvere l'equazione con un così alto numero di strati, quindi ricorriamo ad un metodo empirico.

Prima di raggiungere uno stato stazionario il calore dovrà iniziare a diffondere attraverso tutti questi strati. Da precedenti esperimenti<sup>7</sup> in cui una cella posizionata su materiale multistrato (del tutto simile a quello da noi utilizzato) veniva eccitata da brevi flash di luce grazie all'utilizzo di un chopper ottico, sappiamo che ogni strato provoca un gradino nella misura di  $V_{oc}$  (Figura 57, Figura 58). Il gradino è dovuto al raggiungimento della stessa temperatura tra strato superiore e strato inferiore; lo strato inferiore non riesce più a estrarre calore e la temperatura della cella aumenta, diminuendo  $V_{oc}$ . Il tempo caratteristico di raggiungimento dell'equilibrio da parte di tutto il sistema è dell'ordine dei decimi di secondo, come si vede dal grafico in alto a destra in Figura 58. Si faccia attenzione al fatto che quello che interessa è il tempo in cui si ha la variazione  $\Delta V_{oc}$  nel grafico. La salita e la discesa sono dovute ai momenti in cui il chopper permette il passaggio di luce. Per essere certi di avere raggiunto una situazione stazionaria abbiamo fatto partire l'acquisizione dati 2 secondi dopo l'inizio dell'illuminazione.

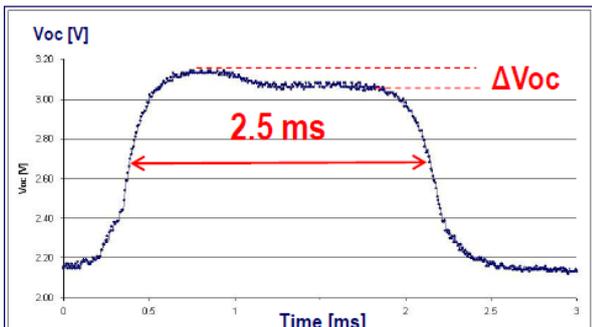


FIGURA 57. VARIAZIONE DI  $V_{oc}$  DOVUTA ALLO SCAMBIO TERMICO TRA LA CELLA E IL SOTTOSTRATO DI Sn. SALITA INIZIALE E DISCESA FINALE SONO DOVUTE ALL'ARRIVO DI LUCE

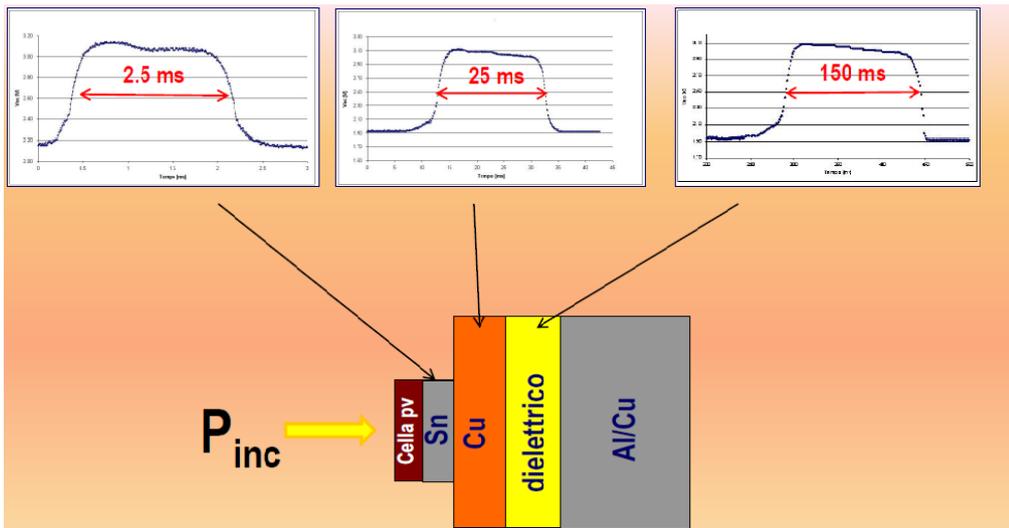


FIGURA 58. ANDAMENTO DI  $V_{oc}$  DI UNA CELLA FOTOVOLTAICA MONTATA SU MATERIALE MULTISTRATO. I GRAFICI IN ALTO MOSTRANO COME APPENA CHE I VARI STRATI SI SCALDANO COMPLETAMENTE LA TENSIONE SCENDE DI UN GRADINO

La lente è stata montata su un inseguitore solare biassiale così da avere sempre i raggi perpendicolari al piano della lente, e nel fuoco abbiamo posizionato la nostra cella.

La concentrazione solare è stata cambiata sovrapponendo alla lente maschere con al centro buchi circolari di diametri diversi.

Le incertezze sul posizionamento delle maschere, sul loro profilo e sul preciso posizionamento di cella, prisma e tramoggia ci impediscono di stimare a priori la concentrazione solare sulla cella.

Idealmente tutta la luce solare incidente su una superficie S viene convogliata sulla superficie della cella e ricordando che il rapporto di concentrazione geometrica è  $C_{geom} = \frac{Superficie\ S}{Superficie\ cella}$

Si ha

$$\phi_{conc}(E_\gamma) = C_{geom} \phi_{sun}(E_\gamma)$$

Considerato che

$$I_{SC,1\ sun} = q \int_0^\infty EQE(E_\gamma) \phi_{sun}(E_\gamma) dE_\gamma$$

dalla la linearità dell'integrale si ha

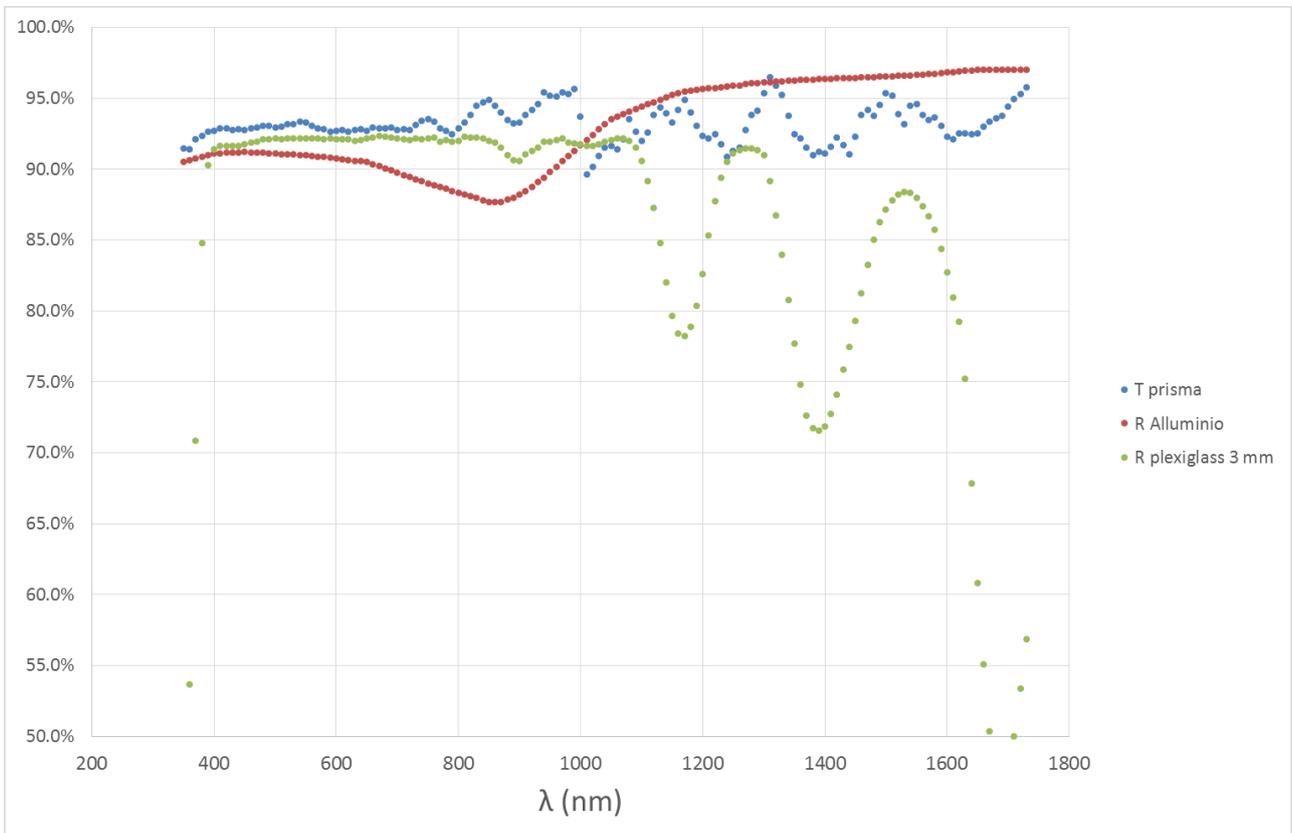
$$I_{SC,conc} = C_{geom} q \int_0^\infty EQE(E_\gamma) \phi_{sun}(E_\gamma) dE_\gamma$$

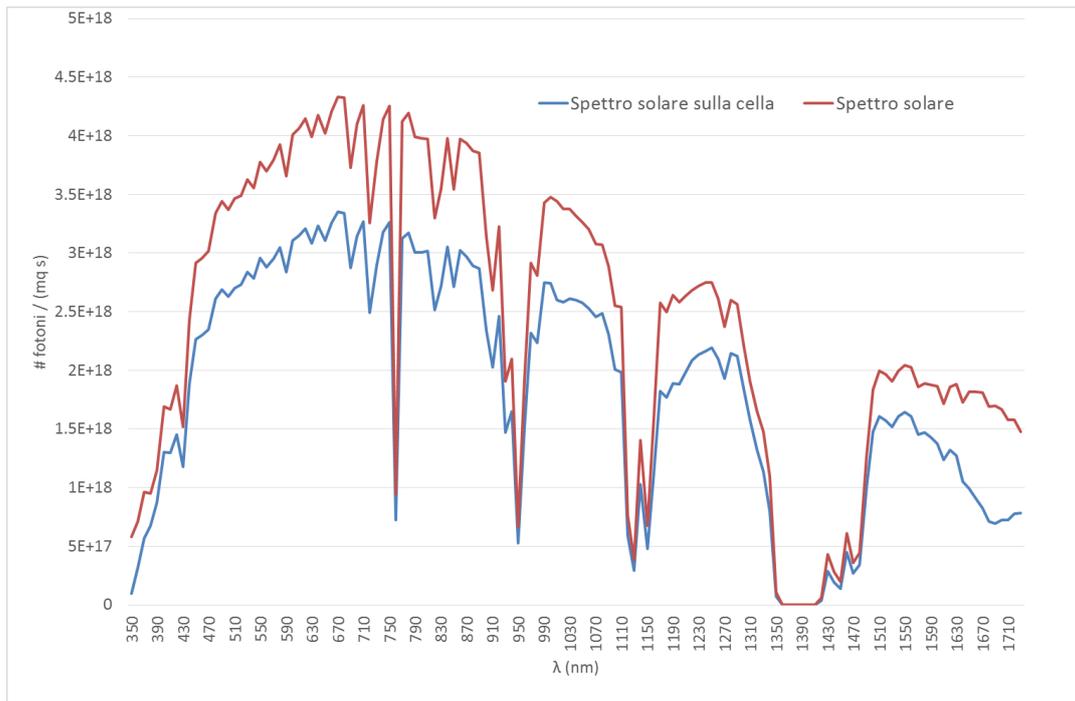
Nella pratica la riflessione e l'assorbimento delle diverse superfici (lente, prisma e alluminio) modificano lo spettro solare e la formula corretta è

$$I_{SC,conc} = C_{GEOM} Q \int_0^\infty R_{AL}(E_\gamma) T_{PRISMA}(E_\gamma) T_{LENTE}(E_\gamma) \Phi_{SUN}(E_\gamma) EQE(E_\gamma) dE_\gamma$$

CON

$R_{AL}(E_\gamma)$  RIFLETTIVITÀ DELL'ALLUMINIO,  $T_{PRISMA}(E_\gamma)$  TRASMITTANZA DEL PRISMA E  $T_{LENTE}(E_\gamma)$  TRASMITTANZA DELLALENTE (ERRORE. L'ORIGINE RIFERIMENTO NON È STATA TROVATA. ) . I MATERIALI SONO STATI SCELTI APPPOSITAMENTE PER NON TAGLIARE ZONE DELLO SPETTRO UTILI, MA SOLO AD ATTENUARLO; SI PUÒ VEDERE LO SPETTRO FINALE IN ERRORE. L'ORIGINE RIFERIMENTO NON È STATA TROVATA.. **FIGURA 59. RIFLETTIVITÀ E TRASMITTANZA DI ALLUMINIO, PMMA, QUARZO**





**FIGURA 60** SPETTRO SOLARE PRIMA (ARANCIONE) E DOPO IL PASSAGGIO ATTRAVERSO IL SISTEMA OTTICO (AZZURRO)

Imprecisioni nel posizionamento di prisma, tramoggia e maschere possono far perdere parte della luce raccolta e di conseguenza perdere la proporzionalità diretta tra  $I_{sc}$  e concentrazione geometrica. Per valutare se questo fosse il caso questi effetti si è disegnata la  $I_{sc}$  in funzione della concentrazione geometrica (Figura 61).

In Tabella 1 sono presenti i diametri delle maschere e le relative concentrazioni geometriche, calcolate considerando che tutta la radiazione finisse sulla superficie della cella.

Diametro maschera (mm ± 0.1mm)	C geom
4.9	62
7.5	146
10	260
11.4	337
15	584
20	1039
24.4	1546
29.3	2229
39.2	3990

**TABELLA 1**

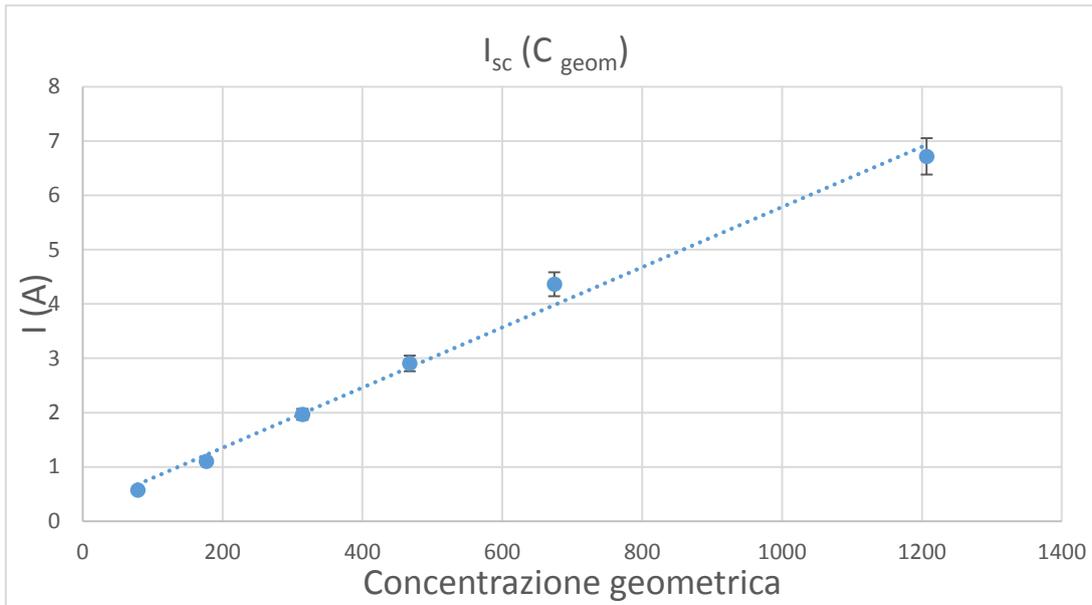


FIGURA 61. ANDAMENTO DELLA CORRENTE DI CORTOCIRCUITO IN FUNZIONE DELLA CONCENTRAZIONE GEOMETRICA

L'andamento lineare è ottimamente verificato ( $R^2=0.995$ ), quindi possiamo stimare la concentrazione solare dalla  $I_{sc}$ .

Dalle equazioni precedenti si evince che nel nostro caso

$$C_{solare} = C_{geom} \int_0^{\infty} R_{Al}(E_{\gamma}) T_{prisma}(E_{\gamma}) T_{lente}(E_{\gamma}) \phi_{sun}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}$$

e quindi  $C_{solare} = I_{sc}/I_{sc,1\ sun}$ .

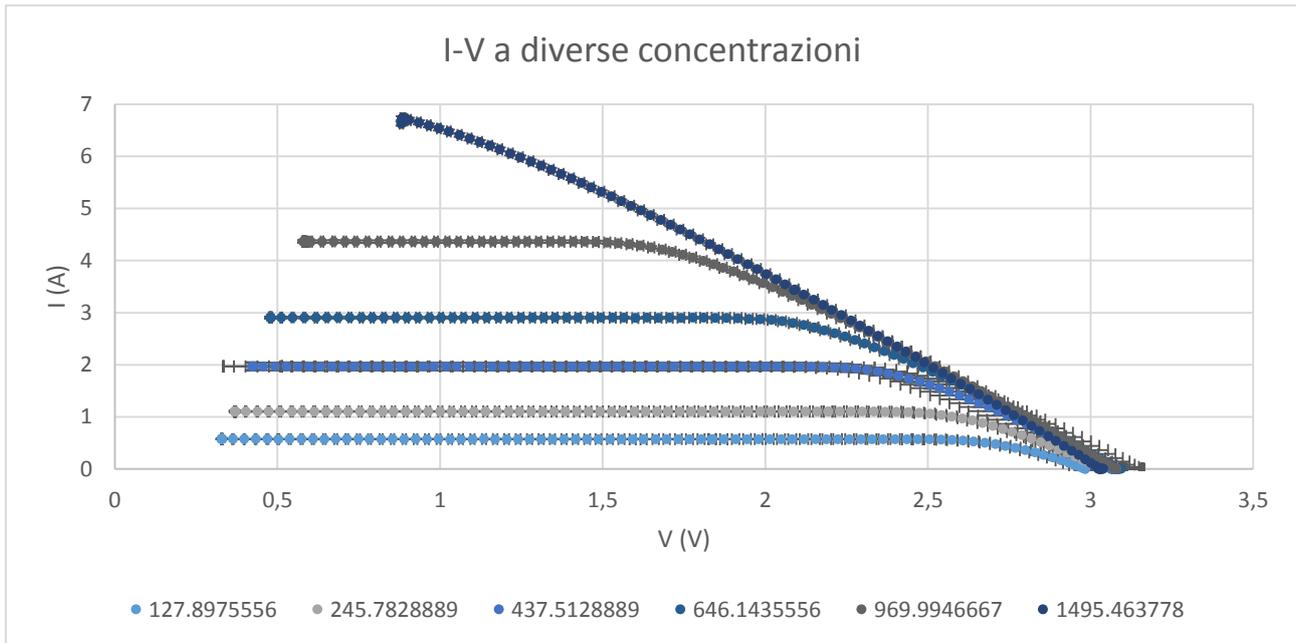
Useremo questa relazione per calcolare la  $C_{solare}$  di ogni misura a partire dal valore di  $I_{sc}$ .

Una misura con simulatore solare a  $1000\ W/m^2$  ha dato come risultato  $I_{sc} \left(0.1 \frac{W}{cm^2}\right) = 5mA$ , ovvero  $I_{sc}(1\ sun) = 4.5\ mA$

In condizioni di DNI  $830\ W/m^2$  approssimativamente costante, sono stati ottenuti i dati in Tabella 2, graficati in Figura 62.

Diametro	Isc	Voc	Pmax	FF	Concentrazione solare
10	0.575	2.985	1.44	83.66	145
15	1.105	3.034	2.67	79.62	279
20	1.968	3.068	4.40	72.86	497
24.4	2.907	3.088	5.85	65.15	734
29.3	4.364	3.076	7.23	53.89	1102
39.2	6.718	3.032	8.03	39.41	1696

TABELLA 2



**FIGURA 62. CURVE I-V DI UNA CELLA A TRIPLA GIUNZIONE A DIVERSE CONCENTRAZIONI SOLARI. LE BARRE DI ERRORE NON SONO RIPORTATE PER NON APPESANTIRE IL GRAFICO, MA SONO COMPARABILI ALLA GRANDEZZA DEI PUNTI.**

La discontinuità caratteristica del superamento della  $J_P$  dei diodi tunnel non è visibile.

Si nota come al crescere della corrente la curva si appiattisca sempre di più fino a sembrare una retta; questo è segno che la cella non sta lavorando in condizioni ottimali, e infatti il Fill Factor è crollato al 39 %

Due possibili cause sono l'aumento della temperatura, che porta un aumento della probabilità di ricombinazione e quindi, a parità di corrente, una diminuzione di tensione ai capi della cella, oppure ad un effetto ineliminabile dovuto alla resistenza in serie della cella. Come descritto nel primo capitolo, questa resistenza può essere stimata dall'inverso della pendenza delle curve IV nelle vicinanze di  $V_{oc}$ . Ribadiamo che idealmente la cella è un generatore ideale di corrente, e la sua curva IV è un gradino; la presenza della  $R_s$  inclina il lato destro del gradino, e più la corrente è alta, minore sarà la lunghezza del lato superiore. Per verificare questa ipotesi calcoliamo la  $R_s$  come l'inverso del

coefficiente angolare delle rette IV intorno al punto ( $V_{oc,0}$ ), riportati in tabella. L'ordine di grandezza delle resistenze trovate è compatibile con un normale modello di cella.

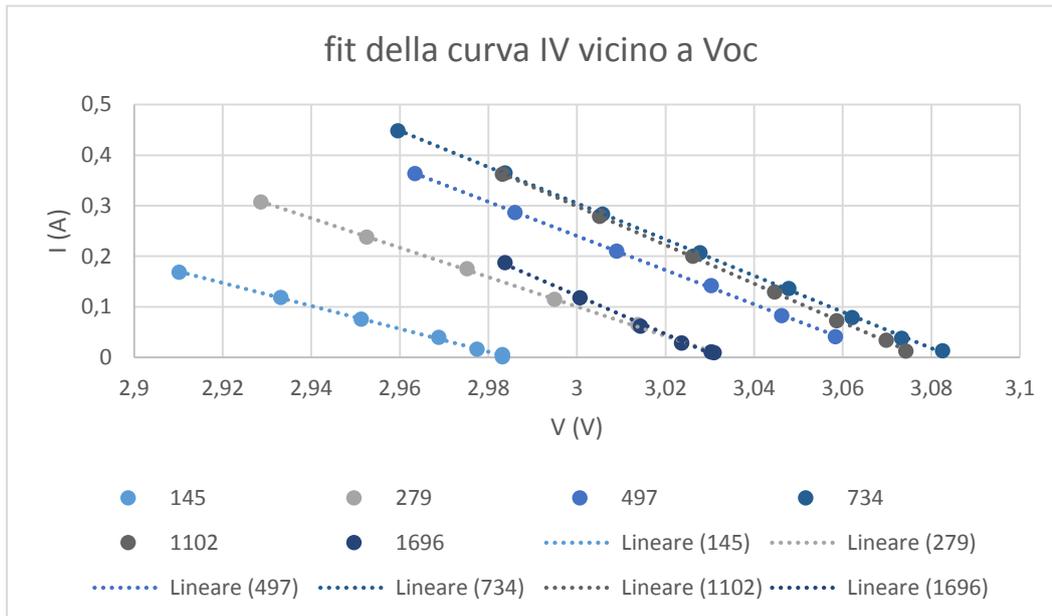


FIGURA 63. FIT VICINO A  $V_{oc}$  PER UNA STIMA DELLA RESISTENZA IN SERIE.

concentrazione	$R_s$ ( $\Omega$ )	$V_{oc}$ (V)
145	0.44	2.985
279	0.34	3.035
497	0.30	3.071
734	0.28	3.085
1102	0.26	3.078
1696	0.26	3.032

TABELLA 3

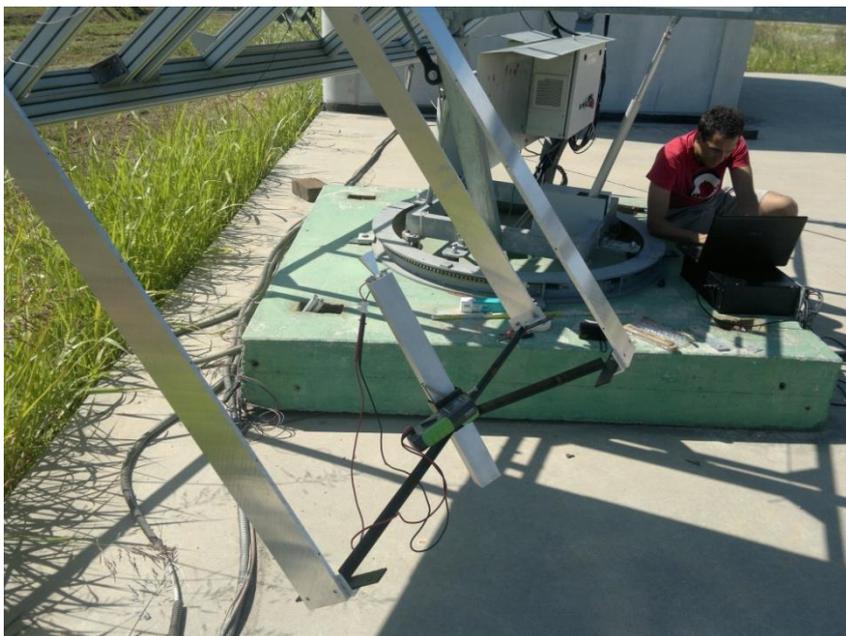


FIGURA 64. UNA FOTO DEL SISTEMA IN POSIZIONE. IN ALTO A SINISTRA, FUORI DALL'IMMAGINE, C'È LALENTE.

In prima approssimazione vale la formula

$$FF \approx 1 - \frac{I_{sc}}{2 R_s V_{oc}}$$

Fittiamo linearmente i FF in funzione di  $I_{sc}$ , e dal coefficiente angolare calcoliamo  $R_s$  prevista. Si ottengono i risultati in Tabella 4.

TABELLA 4

FF	$R_s$ da fit
0.8366	0.44
0.7962	0.44
0.7286	0.45
0.6515	0.45
0.5389	0.45
0.3941	0.44

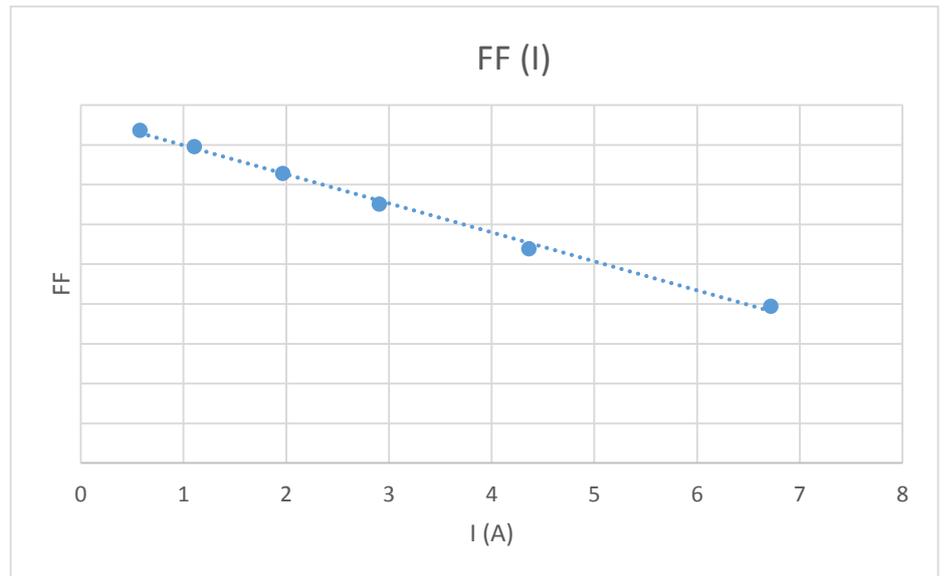


FIGURA 65. FIT DEI FILL FACTOR IN FUNZIONE DELLA CORRENTE

Come si vede l'ordine di grandezza delle resistenze in serie è compatibile con quelle già calcolate e quindi è possibile che l'aspetto del grafico sia dovuto alla resistenza in serie delle celle. Anche supponendo questo però la discontinuità si sarebbe dovuta vedere, eventualmente lungo la retta invece che nei punti di massima potenza.

Controlliamo poi l'effetto della temperatura; conoscendo l'andamento della  $V_{oc}$  con la temperatura (Figura 56), e sapendo da datasheet<sup>8</sup> che ad una concentrazione di 1000X a 25°C si ha una  $V_{oc} = 3.2$  V, si sono calcolate le temperature di esercizio per ogni concentrazione (Tabella 5)

concentrazione	$V_{oc}$	T
145	2.985	45
279	3.035	45
497	3.071	50
734	3.085	45
1102	3.078	55
1696	3.032	70

TABELLA 5

La temperatura non supera mai i 70° C, quindi la cella non è mai uscita dalla temperatura di esercizio ottimale. L'ipotesi di surriscaldamento è allora da scartare.

La discussione precedente porta a supporre che non è stata superata la  $J_p$  soglia del diodo tunnel della nostra cella. Ciò sembra una proposta ragionevole poiché è ottimizzata per lavorare a 4,4 A. Non ci si aspettava che fosse stata ingegnerizzata per correnti di oltre il 50% più grandi.

## Verifica delle relazioni di reciprocità

Per verificare le relazioni di reciprocità sono stati confrontati i fill-factor di una cella a tripla giunzione Emcore di dimensioni  $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$  in due situazioni, fotovoltaico con concentrazione della luce tramite lente di Fresnel ed in elettroluminescenza. Operativamente si sono acquisite prima le curve IV in funzionamento fotovoltaico, utilizzando lo stesso apparato del capitolo precedente ma con maschere più piccole per sondare meglio l'intervallo 0 - 3.5 A (pari alla massima corrente che possiamo avere in elettroluminescenza). Poi in laboratorio per ogni valore di corrente massima acquisito all'esterno grazie il circuito impulsatore si è eccitata la cella in elettroluminescenza con impulsi di corrente via via crescenti fino al valore massimo, registrando la curva IV poi opportunamente ruotata per il confronto.

Per entrambe le acquisizioni la frequenza di campionamento è stata di 10 kHz e il segnale lungo 100 punti, quindi ogni misura è durata 0.1 s.

Nelle figure sono visibili le curve acquisite per ogni intensità di corrente.

Come già scritto nel capitolo precedente, le relazioni di reciprocità valgono in condizioni di equilibrio termodinamico. Un metodo affidabile per controllare la temperatura di una cella è basato sulla misura di  $V_{oc}$ ; essa infatti, a parità di concentrazione, decresce linearmente con l'aumentare della temperatura. Il fattore di decrescita, variabile a seconda della concentrazione, è compreso nel range  $-4: -5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . In Figura 66 è rappresentato l'andamento nel tempo della  $V_{oc}$  per le diverse concentrazioni. In tutti i casi la tensione si mantiene costante con variazioni massime di 10 mV su un intervallo di 5 s (e anche oltre, ma non è riportato nel grafico), corrispondenti a circa  $2^\circ\text{C}$ .

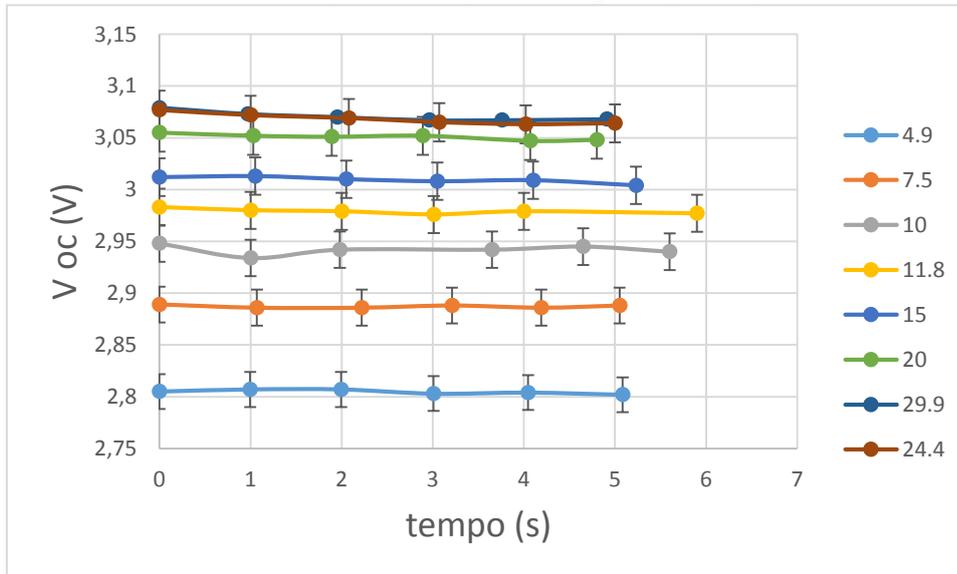


FIGURA 66. ANDAMENTO DI  $V_{oc}$  NEL TEMPO PER DIVERSE CONCENTRAZIONI SOLARI. IN LEGENDA È PRESENTE IL DIAMETRO IN CM DELLE MASCHERE USATE

Vista la rapidità della misura di elettroluminescenza non viene raggiunto un equilibrio termico tra cella e scheda di supporto, eliminando la possibilità di misurare la temperatura direttamente. Inoltre, anche potendo appoggiare il termometro direttamente sulla cella, la dimensione del termometro più piccolo a noi disponibile, una resistenza Pt100, è paragonabile a quella della cella e quindi si altererebbe il risultato della misura.

Si può tuttavia stimare un limite superiore alla variazione di temperatura. Si sovrastima l'energia assorbita dalla cella come la potenza massima immessa moltiplicata per il tempo di misura; dal peso e dal calore specifico, si calcola la variazione massima di temperatura.

Come calore specifico mediamo quello dei tre componenti della cella

	Calore specifico
Germanio	320 J/kg K
InGaAs	300 J/kg K

InGaP	360 J/kg K
Media	327 J/kg K

Tempo di misura: 0.1s

Potenza max: 5.98 W

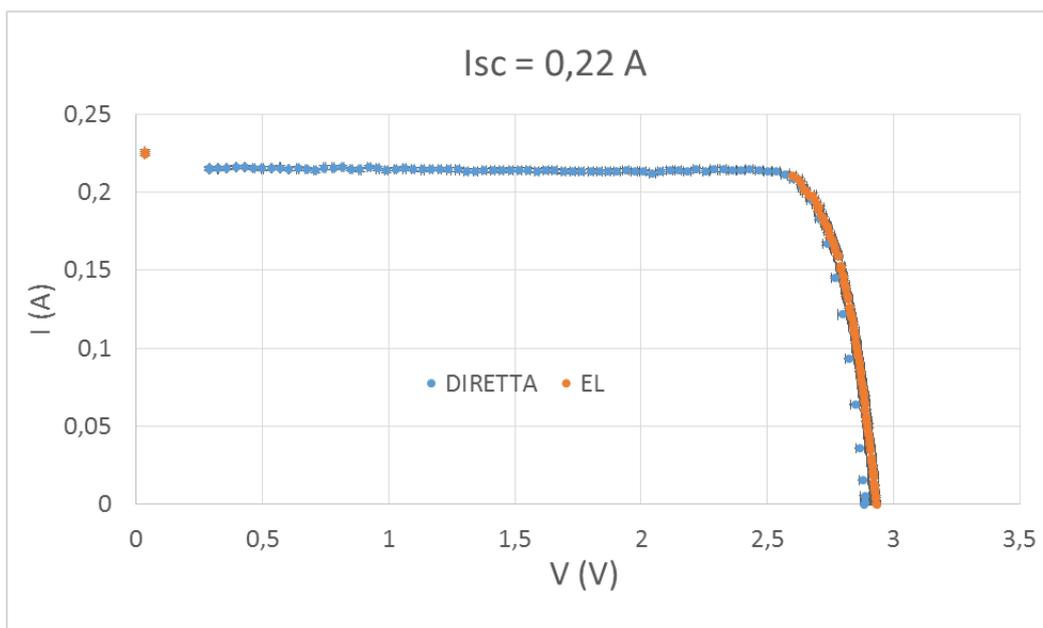
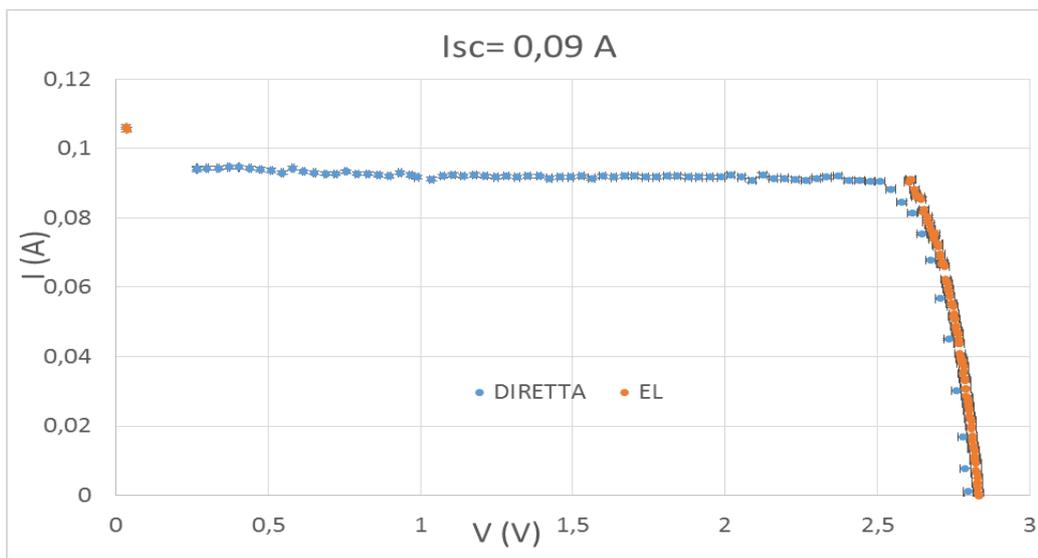
Peso cella: 1 g (sottostima)

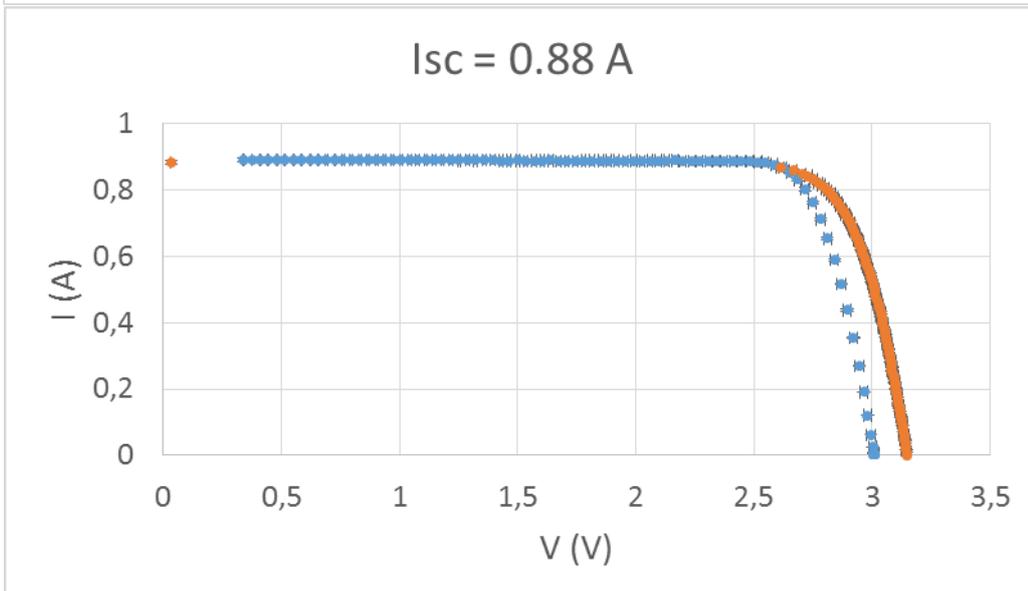
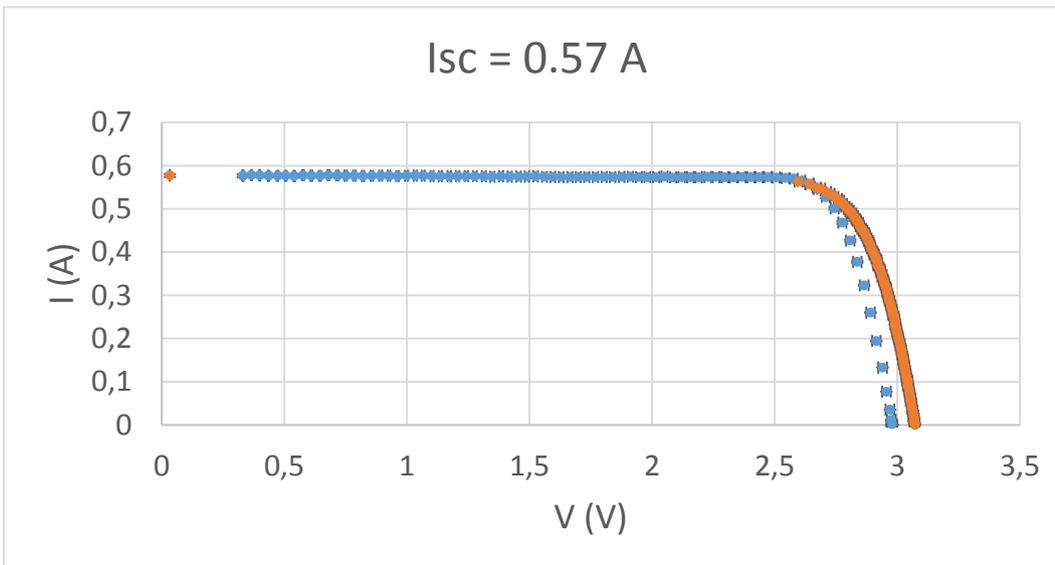
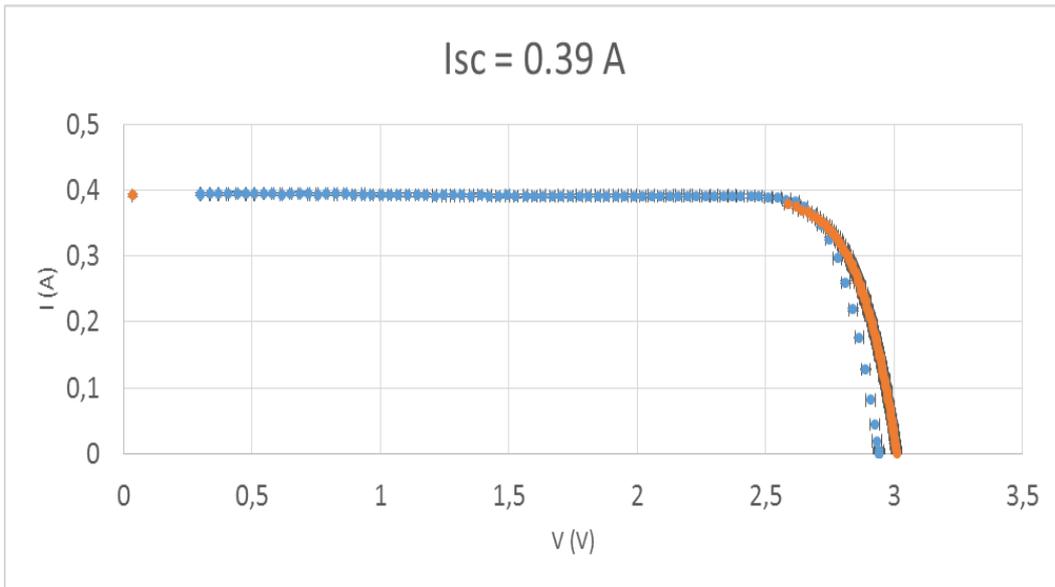
$$\Delta T = \frac{P \Delta t}{C_{termica} m} \sim 1.83 \text{ } ^\circ\text{C}$$

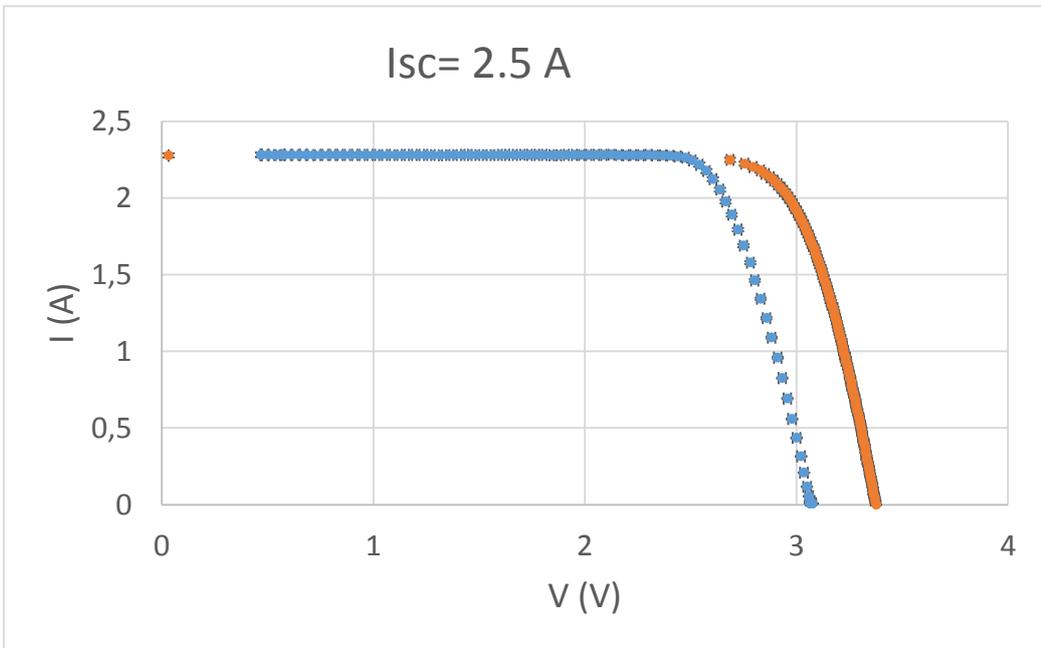
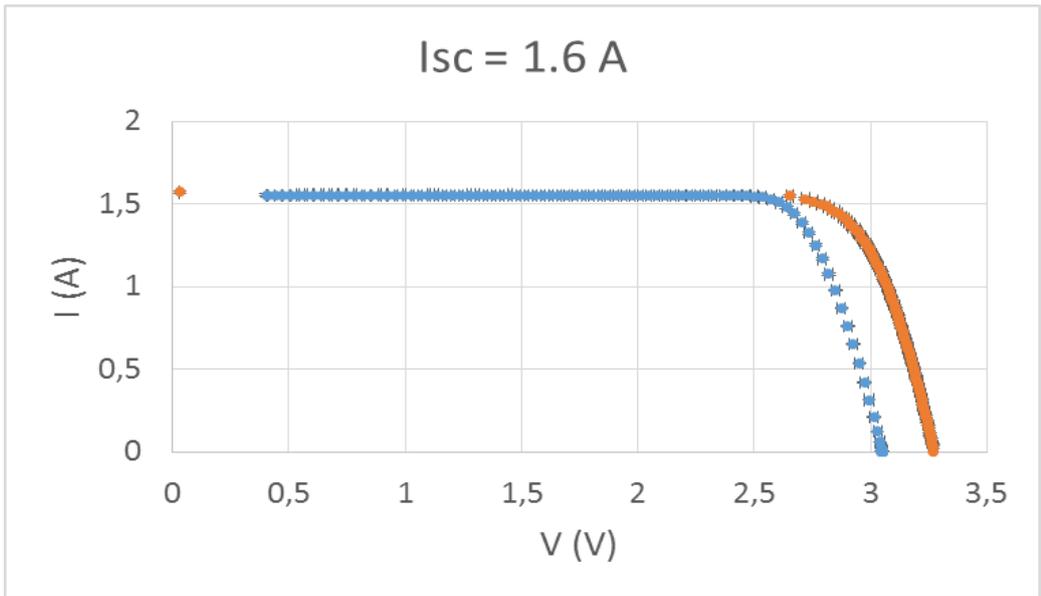
A tale differenza corrisponde una variazione di  $V_{oc}$  di circa 9 mV, dell'ordine dell'errore di misura. L'aumento di temperatura della cella in elettroluminescenza è pertanto trascurabile e consideriamo la temperatura costante ed uguale alla temperatura ambiente (26°C).

Si può quindi affermare che in entrambi i casi la cella è in equilibrio termico e che le condizioni per la validità delle relazioni di reciprocità sono soddisfatte.

Di seguito le curve IV delle misure, in blu prese in funzionamento fotovoltaico ed in arancione in elettroluminescenza.







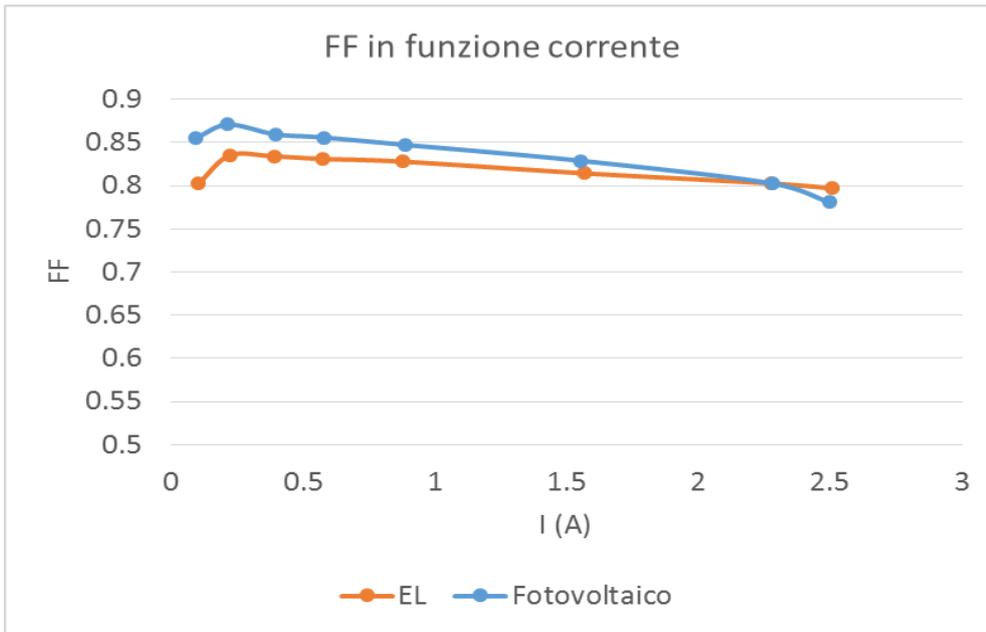


FIGURA 67. ANDAMENTO DEL FILL FACTOR IN FUNZIONE DELLA CORRENTE

Possiamo fare qualche considerazione.

Il grafico del FF in funzione della corrente presenta un andamento inaspettato: innanzi tutto è maggiore il FF calcolato in FV, cosa che non ci saremmo aspettati, poiché è la misura con più variabili che lo possono far diminuire quali ad esempio temperatura più elevata e disomogeneità di illuminazione. Secondariamente la differenza cala al crescere della corrente fino a invertirsi dai 2.3 A in poi. Anche questo comportamento risulta difficile da comprendere.

Inoltre ad una determinata corrente si nota che la  $V_{OC}$  in elettroluminescenza è sempre maggiore di quella in fotovoltaico e la differenza cresce all'aumentare della corrente (Figura 68)

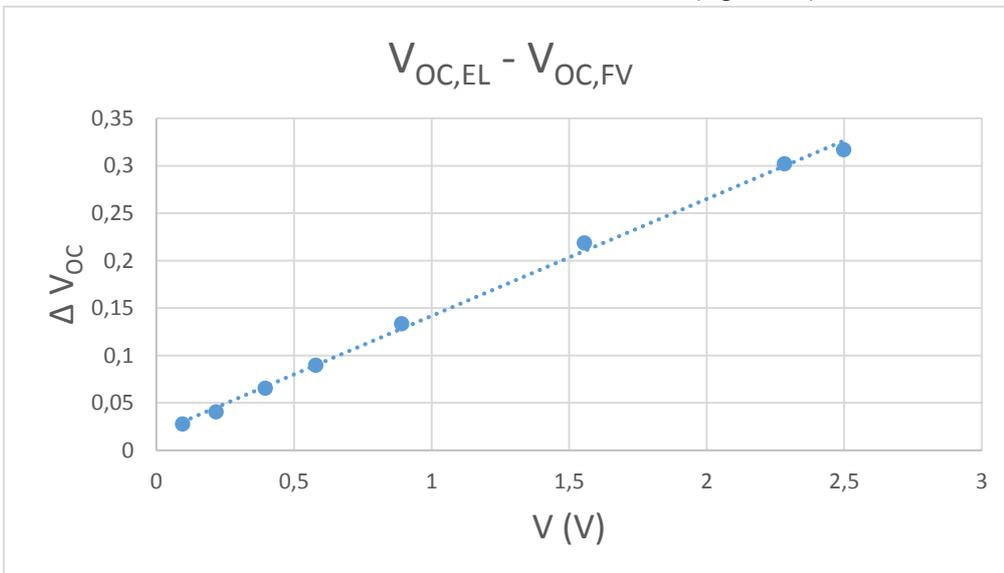


FIGURA 68

In una situazione ideale questo non dovrebbe accadere perché, in un modello ad un diodo (ignoriamo  $R_s$  ed  $R_p$ ) e considerando per comodità una sola sottocella, la corrente è

$$\text{Fotovoltaico: } I_{PV} = I_{L,PV} - I_D = I_{L,PV} - I_0 \left( \exp\left(\frac{qV_{FV}}{\eta k T}\right) - 1 \right)$$

$$\text{Elettroluminescenza: } I_{EL} = I_D - I_{L,DARK} \sim I_0 \left( \exp\left(\frac{qV_{EL}}{\eta k T}\right) - 1 \right)$$

Ed essendo per costruzione  $I_{PV} = -I_{EL}$ , si ha  $I_{L,PV} - I_0 \left( \exp\left(\frac{qV_{FV}}{\eta k T}\right) - 1 \right) \sim -I_0 \left( \exp\left(\frac{qV_{EL}}{\eta k T}\right) - 1 \right)$

Quindi  $V_{FV} > V_{EL}$ , il contrario di quanto osservato.

Questo fatto può avere diverse cause:

- 1) La differenza di temperatura tra la cella in PV ed in EL
- 2) La presenza delle resistenze in serie equivalenti
- 3) Illuminazione disomogenea della cella
- 4) Presenza dei diodi tunnel

Temperatura: come già scritto,  $V_{oc}$  cala linearmente con la temperatura. Sicuramente in misura fotovoltaica, data la lunga esposizione alla luce concentrata, si raggiungono temperature più alte che in EL.

Per testare se la temperatura fosse la causa principale si è scaldata la cella con un forno, raggiungendo temperature di 70-80°C. Nonostante tali temperature fossero maggiori di quelle raggiunte realmente dalle celle in FV, la  $V_{oc}$  in EL non è diventata paragonabile a quella in fotovoltaico. Se ne deduce che la temperatura non provoca l'effetto maggiore.

Per quanto riguarda la resistenza in serie, con riferimento al semplice modello in figura, e considerando infinita  $R_p$ , la  $R_s$  cambia la tensione misurata. Infatti

$$V_{PV} = V_{cella} - I R_s$$

$$V_{EL} = V_{cella} + I R_s$$

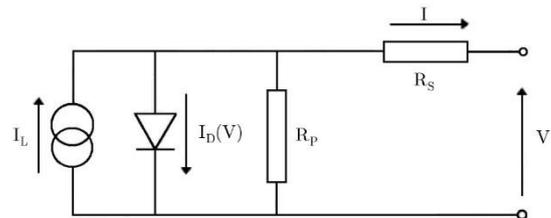


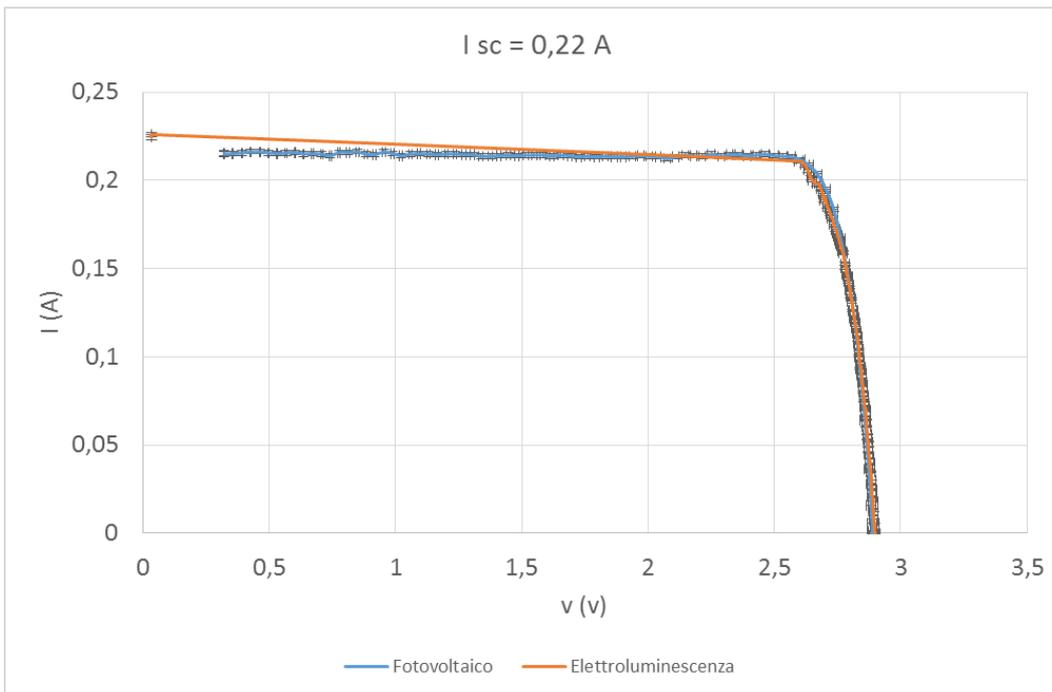
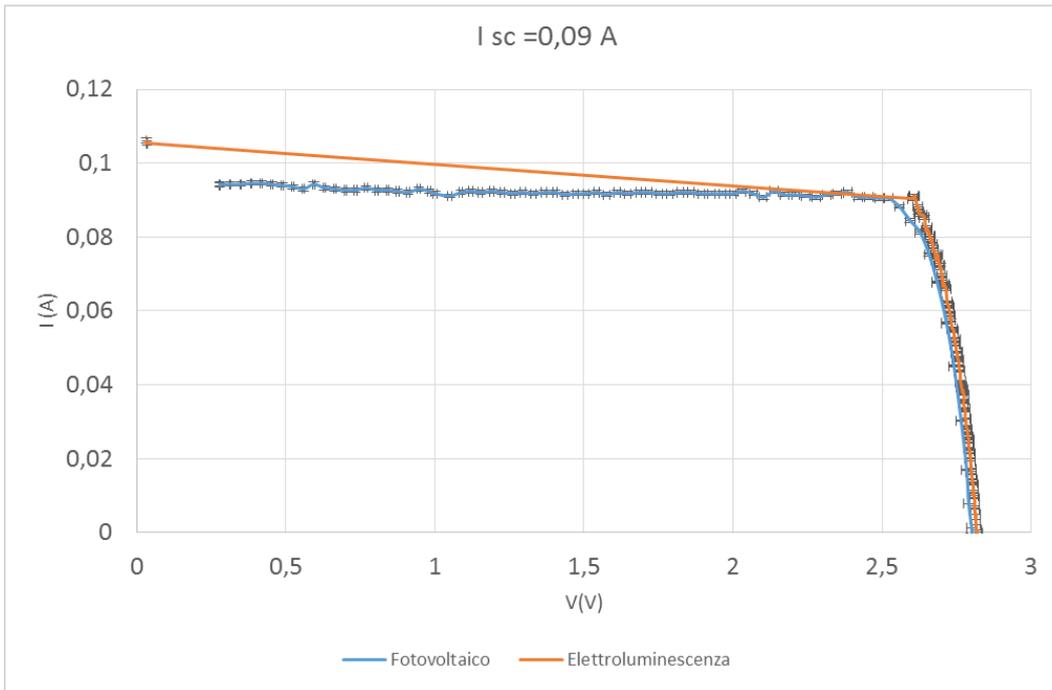
FIGURA 69

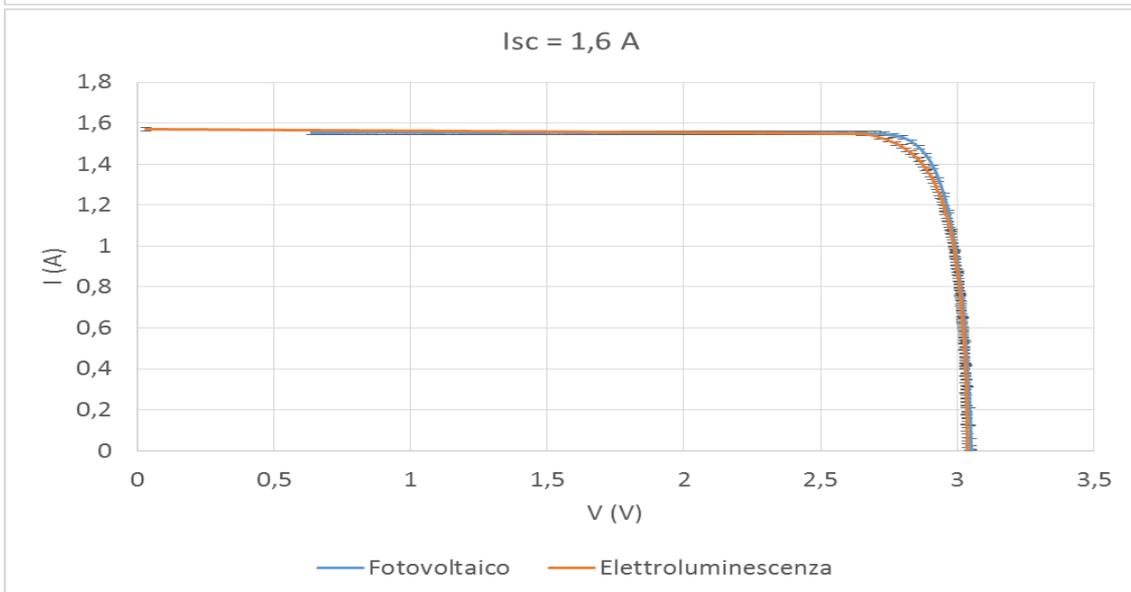
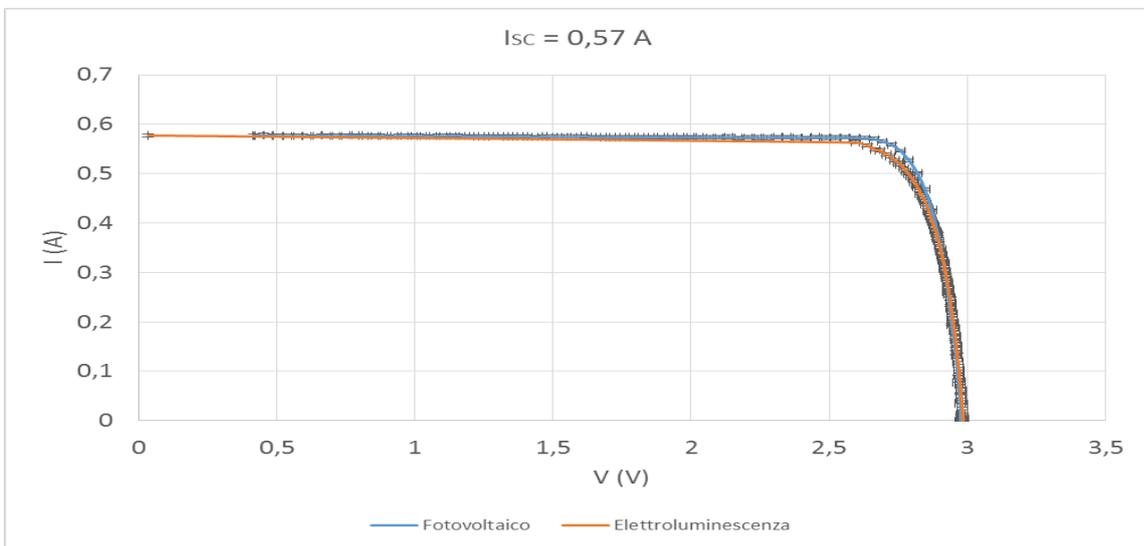
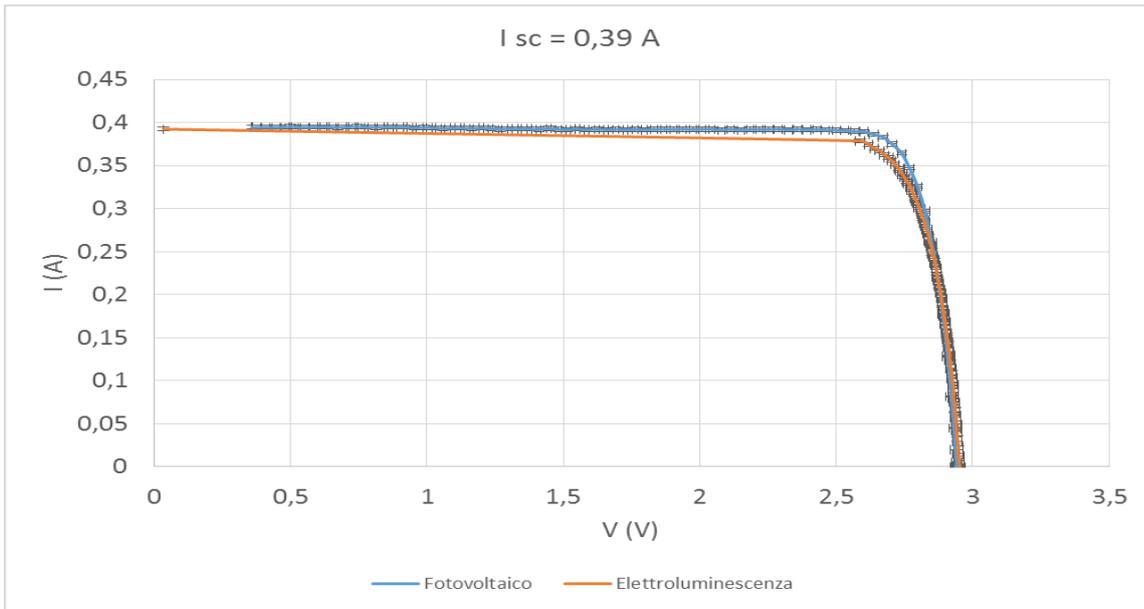
È possibile allora riscaldare i valori di tensione a valori più vicini a quelli reali, conoscendo  $R_s$ . Come anticipato nel primo capitolo una stima può essere l'inverso della pendenza della curva vicino al punto  $(V_{oc}, 0)$  nel caso fotovoltaico, ed intorno a  $(0, I_{sc})$  in elettroluminescenza. In Tabella i risultati

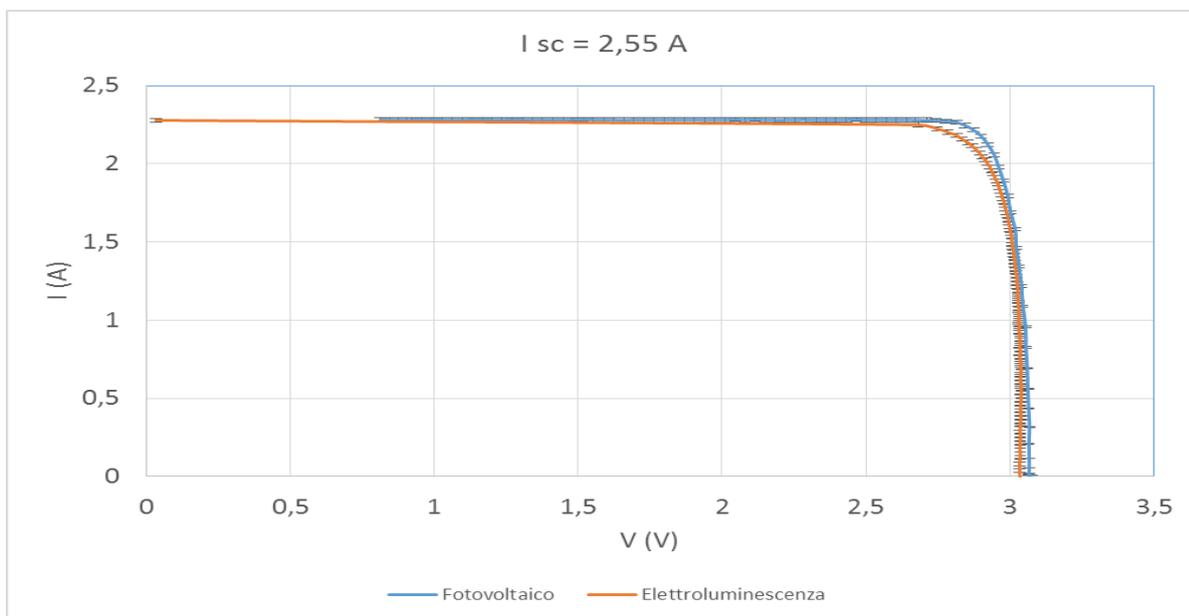
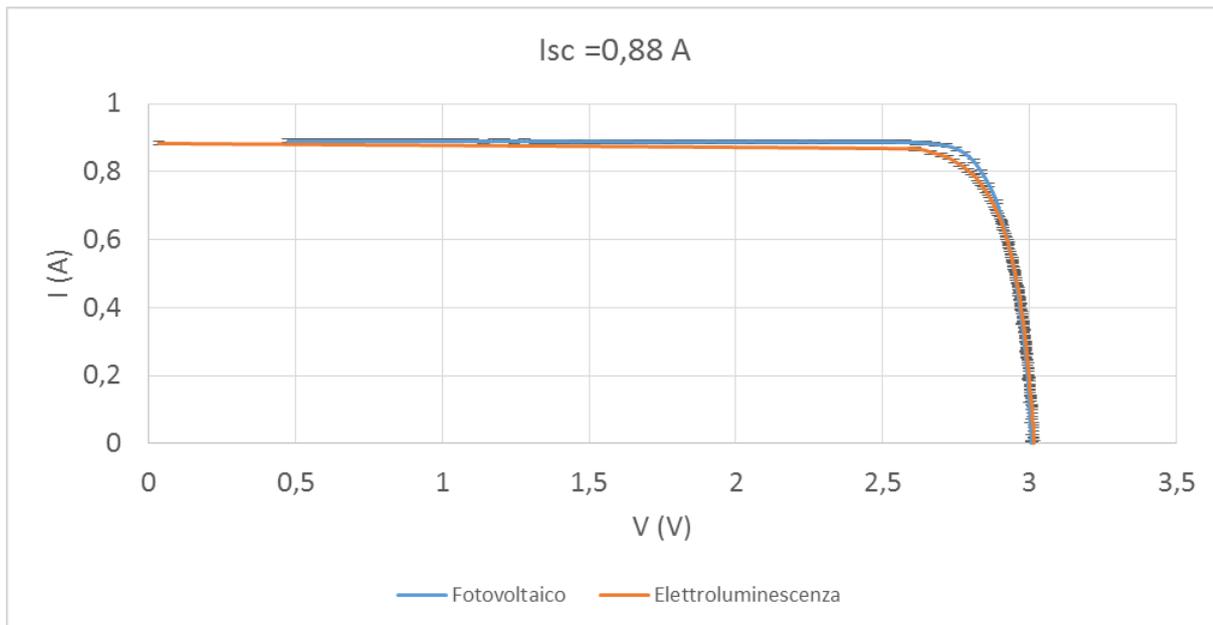
Isc (A)	Rs PV (Ω)	Rs EL (Ω)
0.104	1.70	1.15
0.224	1.00	0.97
0.391	0.41	0.54
0.576	0.33	0.34
0.881	0.23	0.20
1.569	0.18	0.13
2.276	0.16	0.17
2.510	0.15	0.14

Si nota che le resistenze calano all'aumentare della corrente. La curva IV in prossimità di  $V_{oc}$  è in realtà un'iperbole e la migliore approssimazione ad una retta si ottiene quando la curva è il più verticale possibile, ossia a correnti maggiori. Inoltre, visto che la resistenza in serie è dovuta principalmente alla resistenza dei componenti di contatto (cavi, fingers, bus) questa deve avere un valore costante a parità di temperatura. Questo è sicuramente il caso per le misure in elettroluminescenza, mentre in fotovoltaico abbiamo temperature diverse. Tuttavia i valori di resistenza tendono a convergere in entrambi i casi, e si è quindi deciso di utilizzare il valore costante 0.15 Ω.

Riscaldando le tensioni si ottengono i grafici riportati sotto, in cui è disegnata una linea continua invece dei punti per non compromettere la leggibilità.

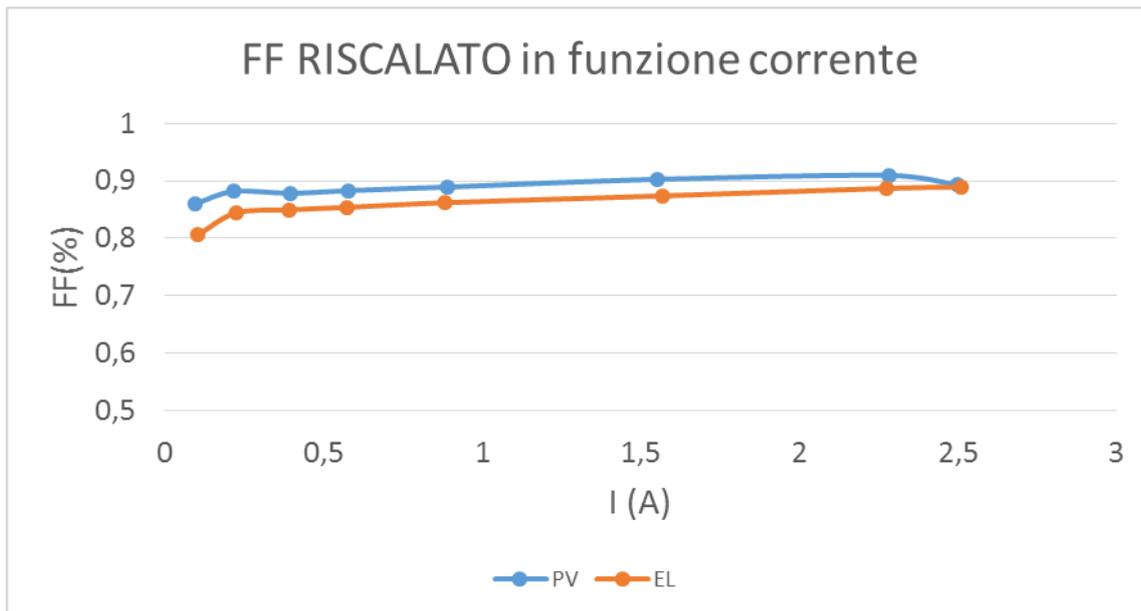






L'accordo tra le curve è decisamente migliorato e quindi possiamo imputare la maggior parte delle differenze di  $V_{oc}$  alla resistenza serie.

- Giunzioni tunnel: in caso di funzionamento fotovoltaico l'effetto è quello di ridurre la tensione letta ai capi della cella. In caso di elettroluminescenza invece la polarizzazione è inversa e l'effetto è di aumentare la tensione letta. Tuttavia non conoscendo le caratteristiche delle giunzioni non possiamo fare alcuna stima quantitativa. Come supposizione ragionevole, viste le caratteristiche di una giunzione tunnel che sono progettate per avere una piccola caduta di potenziale (le migliori anche sotto i 30 mV) riteniamo che questo effetto sia minore di quello dovuto alla temperatura.
- Disomogeneità dell'illuminazione. Questa può provocare una riduzione della  $V_{oc}$  e quindi un calo del FF.



Qualitativamente l'andamento del FF sia in caso fotovoltaico che elettroluminescenza è lo stesso, convergendo ad una corrente di 2.5 A. Come in precedenza contrariamente a quanto atteso il FF è costantemente maggiore in effetto fotovoltaico.

Dopo la correzione, a parte il punto finale, il FF cresce all'aumentare della corrente; ciò è quanto atteso perché i dati del costruttore indicano l'efficienza massima della cella, e quindi anche il FF, ad una corrente prodotta di circa 4 A.

Tali comportamenti andrebbero ulteriormente approfonditi innanzi tutto esplorando la parte di curva a correnti ancora maggiori, e successivamente modellando meglio le resistenze in serie con modelli più raffinati quali quelli a parametri distribuiti.

Infine bisogna considerare l'effetto della disuniformità d'illuminazione. Esperimenti tuttora in corso all'interno del gruppo indicano possibili variazioni di Fill Factor dell'ordine del 3-4 % in caso di illuminazioni non omogenee, sia in eccesso che in difetto. Una disomogeneità di illuminazione è altamente probabile nel nostro sistema, quindi una parte delle discrepanze potrebbero essere attribuite a ciò.

Una seconda verifica è stata cercata nel seguente modo: si sono prese le curve I-V in elettroluminescenza di diverse celle Spectrolab, sempre di 5.5 X 5.5 mm<sup>2</sup>, alle correnti di 0.5, 1, 1.5, 2 e 2.5 A.

Per ognuna è stato calcolato il Fill Factor e plottato in funzione della corrente (Figura 70).

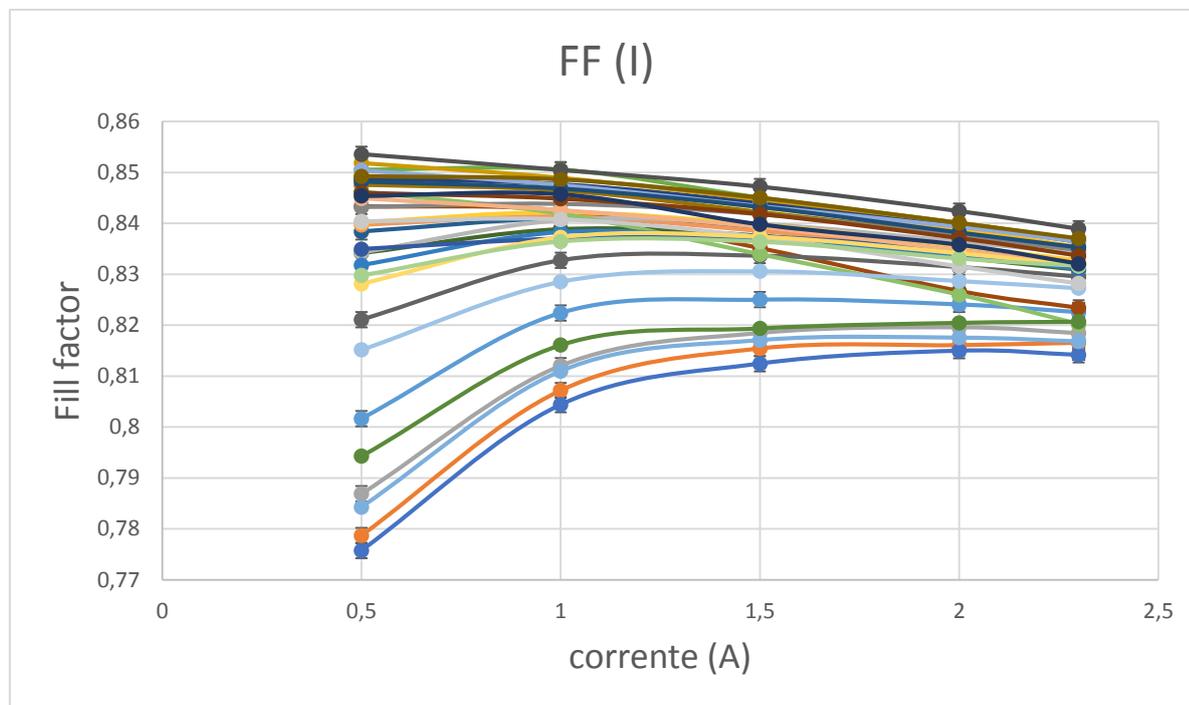


FIGURA 70. ANDAMENTO DEL FILL FACTOR IN ELETTROLUMINESCENZA IN FUNZIONE DELLA CORRENTE. OGNI CURVA RAPPRESENTA UNA CELLA.

Di queste celle le migliori 24 sono state inserite in un modulo concentratore in sviluppo presso i Laboratori di Legnaro. Esso è costituito da 4 settori parabolici che concentrano la luce su un prisma di quarzo montato sulla cella, la cui funzione è convogliare la luce uniformandone il profilo di illuminazione. Il tutto è progettato per concentrare la luce a 760 X (geometrici) e in modo da far lavorare le celle a correnti di circa 2 A.



FIGURA 71- MODULO E FIGURA 72. ZOOM

Una volta montato il modulo su un inseguitore si è presa la curva I-V di ogni cella. Anche in questo caso la differenza tra le Voc in elettroluminescenza e in fotovoltaico è dell'ordine dei 200 mV. La correzione per le resistenze in serie questa volta non riesce a correggere la differenza.

Se le relazioni di reciprocità continuano a valere, ci aspettiamo che a Fill Factor minori in elettroluminescenza corrispondano Fill Factor minori in fotovoltaico.

Una volta ordinate le celle in ordine crescente di Fill Factor in fotovoltaico, è stato creato un grafico a dispersione dei fill factor (Figura 75). Ci saremmo aspettati un andamento crescente, ma non è così. Da differenze massime dell'1% in EL si passa a differenze del 7% in FV. I valori inoltre passano dall'intervallo 83-84% all'intervallo 71.5% - 74.5%. Faremo ora delle ipotesi per spiegare il fenomeno.

Come nella discussione precedente, una possibile spiegazione è la disuniformità di illuminazione.

Il profilo di illuminazione dato dal prisma perfettamente illuminato è noto perché è stato appositamente progettato tramite simulazioni con software Zemax. Sono stati condotti esperimenti in cui è stato variato leggermente il profilo di illuminazione rispetto alla condizione ideale con l'ausilio di maschere con motivi disomogenei (Figura 74). Tutto ciò per simulare variazioni nella posizione del prisma o nella riflessione della luce. Per ogni profilo è stata acquisita la curva I-V e calcolato il Fill Factor. Dai risultati in si evince che una disomogeneità può portare a variazioni di Fill Factor dell'ordine del 4%.

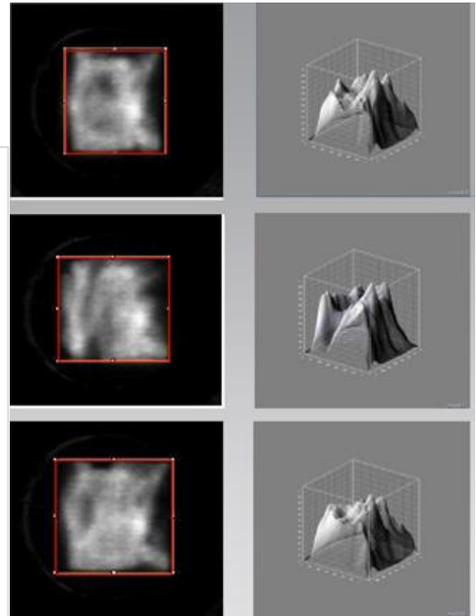
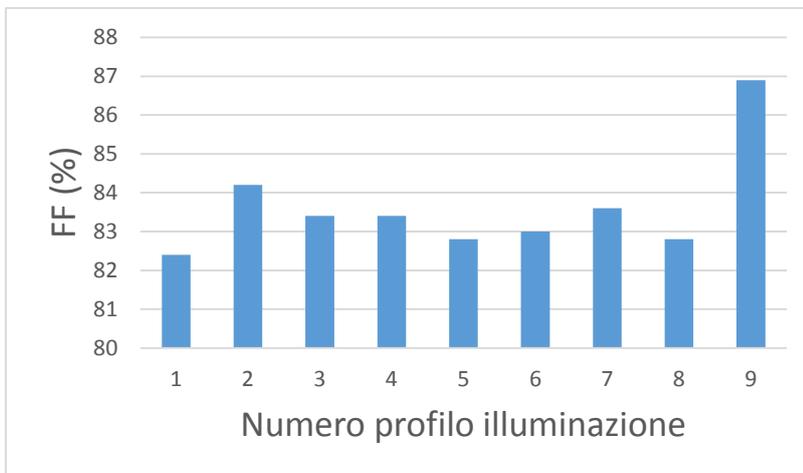


FIGURA 73 FILL FACTOR. OGNI NUMERO CORRISPONDE AD UN DIVERSO PROFILO DI ILLUMINAZIONE.

FIGURA 74. ALCUNI DEI PROFILI DI ILLUMINAZIONE UTILIZZATI.

Una parte della differenza può venire quindi da profili meno omogenei di quelli tovati.

Un'altra parte è sicuramente dovuta alla temperatura delle celle, intorno ai 70° C (si ricorda che lavorano continuamente e non per piccoli flash come nel test precedente).

Infine consideriamo importante la presenza di resistenze in serie e parallelo che diminuiscono il fill factor.

Queste situazioni andrebbero indagate ulteriormente.

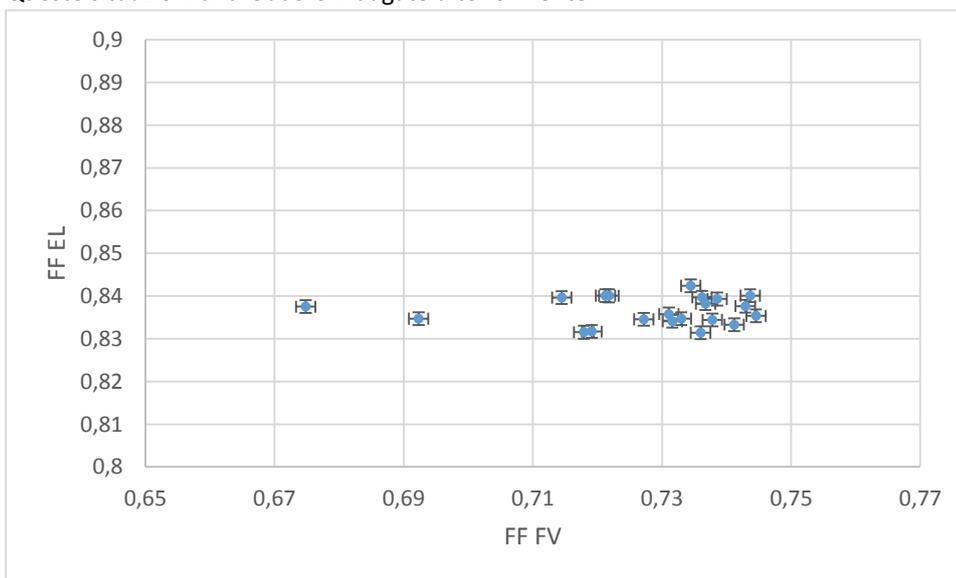


FIGURA 75. CONFRONTO FRA I FILL FACTOR IN ELETTROLUMINESCENZA E IN FOTOVOLTAICO, ALLA STESSA ISC DI 2 A

## Conclusioni

Gli scopi di questo lavoro di tesi sono:

- la costruzione e il test di un apparato di misura per la caratterizzazione delle celle fotovoltaiche
- l'uso di questo strumento per l'acquisizione delle curve I-V delle celle fotovoltaiche
- La creazione di un programma in LabVIEW per il controllo del sistema di misura, l'acquisizione delle misure e la visualizzazione delle stesse durante la misura
- Una verifica della validità delle condizioni base del teorema di reciprocità ad alte densità di corrente
- La ricerca dell'effetto nella curva della presenza di diodi tunnel presenti tra le singole giunzioni di una cella a multigiunzione.

Per quanto riguarda la costruzione ed il test, il risultato è stato positivo. Sono stati creati due circuiti, che sono in grado rispettivamente di:

- 1) far lavorare la cella in elettroluminescenza pilotandola in corrente, con errori relativi sui segnali di tensione di input ed output dello 0.2%.
- 2) acquisire la curva I-V di una cella illuminata pilotandola in tensione. Gli errori relativi sono inferiori o uguali allo 0.6% sia in input che in output.

L'esito positivo dei test ha portato a progettare e realizzare una successiva versione dello stesso strumento capace di misurare le curve I-V di un intero modulo del sistema a concentrazione, che essendo formato da 24 celle e lavorando a concentrazioni di 760 soli, in condizioni di utilizzo raggiunge circa 70 V e 2 A di corrente.

Il software di acquisizione creato in LabVIEW potrà essere riutilizzato con il nuovo strumento per acquisizioni di curve I-V di moduli interi ed è già in corso di implementazione per nuovi esperimenti, nei quali è necessario controllare durata e intensità dell'impulso di corrente e sincronizzarlo con l'acquisizione di immagini della cella con il prisma incollato, in modo da individuare dei difetti di posizionamento o anche difetti della cella stessa.

Ricordiamo che i diodi tunnel sono giunzioni presenti nelle celle a multigiunzione necessari a permettere il passaggio di corrente da una sottocella all'altra. Hanno un valore limite di densità di corrente oltre il quale presentano il classico andamento termico dei diodi provocando cadute di potenziale e quindi perdite di efficienza della cella. Non è stato possibile osservare il superamento della soglia di corrente dei diodi tunnel nelle celle in nostro possesso. Tali giunzioni sono certamente presenti e si supponeva che fossero ingegnerizzate in modo da sopportare una corrente massima non molto superiore a quella corrispondente alla massima efficienza (4.4 A, corrispondente a  $J = 14.5 \text{ A/cm}^2$ ), ma evidentemente non è così. Tale affermazione è corroborata dalle caratteristiche record di alcune giunzioni tunnel [cit.].

Il non aver oltrepassato i limiti delle giunzioni tunnel fino a correnti di 6.8 A permette di pensare sistemi ad altissima concentrazione anche con le celle già esistenti, tenendo in adeguata considerazione le perdite di efficienza dovute alle resistenze in serie, che diventano importanti ad alte correnti come visibile nella figura [] del capitolo 3.

Sull'intervallo in cui sono valide le condizioni alla base delle relazioni di reciprocità, il paragone dei Fill Factor delle celle in condizione di elettroluminescenza e in funzionamento fotovoltaico mostra un andamento simile nei due casi. Ciò indica che le condizioni valgono approssimativamente anche quando le densità di corrente sono più elevate di un ordine di grandezza rispetto agli esperimenti finora effettuati.

Resta ancora molto da indagare per poter spiegare in modo soddisfacente le differenze riscontrate nelle curve in fotovoltaico e in elettroluminescenza. Sicuramente il primo passo dovrebbe essere quello di stimare al meglio e ridurre il più possibile le resistenze in serie.

Inoltre si dovrebbero svolgere esperimenti in condizioni maggiormente controllate; si pensa in particolare alla temperatura della cella, che andrebbe mantenuta sempre allo stesso valore. Per poterlo fare si propone di progettare un sistema di raffreddamento più efficiente; una possibile soluzione è rappresentata da un raffreddamento attivo a liquido. Il flusso di liquido dovrebbe essere regolato in modo da ottenere la stessa temperatura a tutte le concentrazioni. Contemporaneamente, si dovrebbe poter portare la cella alle stesse temperature in laboratorio per le

misure in elettroluminescenza. A questo riguardo il sistema costituito dal circuito impulsatore è già sufficiente a produrre minime variazioni di temperatura nella cella.

Un altro fattore da controllare in modo più preciso dovrebbe essere l'omogeneità dell'illuminazione. Un potente simulatore solare a flash test permetterebbe di avere un flusso di radiazione costante e aumenterebbe l'uniformità del profilo di illuminazione.

In alternativa al simulatore sostituire la lente con un sistema di specchi ridurrebbe l'aberrazione cromatica e di conseguenza migliorerebbe il profilo di illuminazione, che non avrebbe disuniformità cromatiche.

Controllati questi parametri, si dovrebbe infine passare alla verifica delle relazioni di reciprocità propriamente dette misurando l'output ottico della cella in elettroluminescenza tramite l'uso di spettrometri. Viste le alte correnti in gioco sarà fondamentale avere un sistema attivo di controllo della temperatura della cella.

## Bibliografía

1. Shockley W, Queisser HJ. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J Appl Phys.* 1961;32(3):510-519. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1736034>.
2. Rau U. Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells. *Phys.Rev.B.* 2007;76(8):085303.
3. Kirchartz T, Rau U, Kurth M, Mattheis J, Werner JH. Comparative study of electroluminescence from cu(in,ga)Se<sub>2</sub> and si solar cells. *Thin Solid Films.* 2007;515(15):6238-6242.
4. Kirchartz T, Rau U, Hermle M, Bett AW, Helbig A, Werner JH. Internal voltages in GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells determined by electroluminescence measurements. *Appl Phys Lett.* 2008;92(12). doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2903101>.
5. MIDC Solar position and intensity calculator. <http://www.nrel.gov/midc/solpos/solpos.html>.
6. Einstein A. Über einen die erzeugung und verwandlung des lichtes betreffenden heuristischen gesichtspunkt. *Annalen der Physik.* 1905;322(6):132-148.
7. *Next generation of photovoltaics. new concepts.* Universidad Politecnica de Madrid, Instituto di Energia SOLar. E.T.S.I. Telecomunicacion, Madrid, Spain: Springer; 2012.
8. García I, Espinet-González P, Rey-Stolle I, Algora C. Analysis of chromatic aberration effects in triple-junction solar cells using advanced distributed models. *Photovoltaics, IEEE Journal of.* 2011;1(2):219-224.
9. Kirchartz T, Rau U. Detailed balance and reciprocity in solar cells. *physica status solidi (a).* 2008;205(12):2737-2751.
10. Duran E, Piliouguine M, Sidrach-de-Cardona M, Galán J, Andujar JM. Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review. *Photovoltaic Specialists Conference, 2008 PVSC '08 33rd IEEE.* 2008:1-6.

11. Mahmoud MM. Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I–V characteristics. *Renewable Energy*. 2006;31(13):2198-2206.
12. Guter W, Bett AW. – Characterization of tunnel diodes and multijunction solar cells. *Electron Devices, IEEE Transactions on*. 2006;53(9):2216-2222.
13. Braun A, Hirsch B, Katz EA, Gordon JM, Guter W, Bett AW. Localized irradiation effects on tunnel diode transitions in multi-junction concentrator solar cells. *Solar Energy Mater Solar Cells*. 2009;93(9):1692-1695.
14. Nishioka K, Takamoto T, Agui T, Kaneiwa M, Uraoka Y, Fuyuki T. Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/ge triple-junction solar cells based on experimental solar cell's characteristics and field-test meteorological data. *Solar Energy Mater Solar Cells*. 2006;90(1):57-67.
15. Kinsey GS, Hebert P, Barbour KE, Krut DD, Cotal HL, Sherif RA. Concentrator multijunction solar cell characteristics under variable intensity and temperature. *Prog Photovoltaics Res Appl*. 2008;16(6):503-508.
16. Bagiński W, Kinsey GS, Liu M, Nayak A, Garboushian V. Open circuit voltage temperature coefficients vs. concentration: Theory, indoor measurements, and outdoor measurements. *AIP Conference Proceedings*. 2012;1477(1):148-151. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4753855>.
17. Golfetto A, Saccà A, Antonini P, Centro S. Caratterizzazione termica di materiali multistrato mediante chopper ottico. . 2013.
18. Emcore terrestrial solar cell web page. <http://www.emcore.com/terrestrial-photovoltaics/terrestrial-solar-cells/>.
19. NREL. Latest solar cells efficiency chart. [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg).