

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

Dipartimento di Energia



**ANALISI DEL DIFETTO “SNAIL TRAILS”
SULLE PRESTAZIONI DI MODULI FOTOVOLTAICI**

Relatore: Prof. Alberto Dolara

Tesi di Laurea Magistrale di: Marco Belotti

Matricola: 799954

A.A. 2014/2015

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il professor Alberto Dolara per il tempo che mi ha dedicato durante l'attività sperimentale, di rielaborazione dei risultati ottenuti e di stesura della tesi. La sua disponibilità mi ha permesso di approfondire diversi argomenti e di apprendere nuove metodologie di lavoro, che mi saranno certamente utili anche nel futuro. Un sentito ringraziamento va anche alla professoressa Sonia Leva, che mi ha fornito gli strumenti necessari per la realizzazione della tesi e ha coordinato, insieme al professor Dolara, le attività svolte al laboratorio SolarTechLab.

Ringrazio Manuel, con cui ho collaborato nell'acquisizione delle misure presso il laboratorio, e tutti gli amici che ho incontrato in questi anni di studio al Politecnico, tra cui Pio, Federico, Filippo, Cosimo.

Vorrei ringraziare con affetto i miei genitori per il sostegno e il grande aiuto che mi hanno dato durante gli studi, soprattutto nei momenti difficili, e per avermi permesso, con grandi sacrifici, di studiare ciò che desideravo. Senza il loro aiuto non avrei raggiunto questo risultato.

Ringrazio Mariarita per avermi ospitato durante il periodo di studi e per il suo generoso supporto.

Desidero ringraziare la mia ragazza Giulia, che mi ha sostenuto con amore in ogni momento. Ringrazio infine i miei fratelli per la vicinanza e l'interesse che mi hanno sempre dimostrato, le mie cognate, le mie nonne, i miei amici e tutti coloro che mi sono stati vicini, anche solo con una parola o un gesto.

Sommario

1	Introduzione	1
2	Il fenomeno delle snail trails	3
2.1	Tipologie di snail trails.....	4
2.2	Struttura di un modulo fotovoltaico	5
2.3	Possibili cause di sviluppo delle snail trails	7
3	Descrizione del laboratorio SolarTechLab.....	11
4	Scopo dell'attività sperimentale e metodologie	15
5	Analisi dei moduli presso il laboratorio Kiwa Cermet Italia.....	17
6	Caratteristiche I-V e P-V.....	23
6.1	Procedura di misura delle caratteristiche I-V e strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati.....	23
6.2	Elaborazione dei dati e generazione delle caratteristiche I-V e P-V medie	29
6.2.1	Elaborazione delle misure elettriche e generazione delle curve I-V e P-V medie ...	29
6.2.2	Calcolo dell'irraggiamento globale sul piano dei moduli	30
6.3	Confronto con i valori di riferimento	35
6.3.1	Valori di riferimento da datasheet.....	35
6.3.2	Modello a cinque parametri.....	37
6.4	Confronto tra valori misurati e valori di riferimento in giorni con irraggiamento superiore a 500 W/m^2	43
6.5	Confronto tre valori misurati e valori di riferimento al variare della temperatura del modulo e dell'irraggiamento nella stessa giornata	52
6.5.1	Influenza della componente diretta dell'irraggiamento sulle prestazioni dei moduli nelle diverse ore della stessa giornata	59
7	Energia prodotta e confronto con un modulo di riferimento.....	63
7.1	Calcolo dell'energia prodotta	63
7.2	Confronto in energia con un modulo di riferimento.....	65
7.3	Valutazione dell'influenza di y_r sulla produzione di energia	71
8	Analisi termica dei moduli	77
8.1	Analisi delle disomogeneità termiche	80
9	Conclusioni	83
10	Bibliografia	87

Indice delle figure

Figura 2.1: modulo affetto da snail trails e particolare di una cella affetta	3
Figura 2.2: cella sana, con assenza di snail trails	4
Figura 2.3: cella con snail trails (a sinistra) e cella con framing snail trails (a destra)	5
Figura 2.4: struttura di un modulo fotovoltaico	6
Figura 3.1: pianta del laboratorio SolarTechLab, con i moduli e i rispettivi inverter, al giorno 19/06/2015.....	12
Figura 3.2: piranometro per la misura dell'irraggiamento globale sul piano orizzontale (a sinistra) e piranometro a banda per la misura dell'irraggiamento diffuso (a destra)	13
Figura 3.3: array 4, composto dai quattro moduli con snail trails (A4.1, A4.2, A4.3, A4.4) e dal modulo A4.5.....	14
Figura 5.1: scolorimento e annerimento dei fingers e microfratture	17
Figura 5.2: fingers anneriti, segni di bruciature	18
Figura 5.3: fingers con segni di bruciature lungo una microfrattura	18
Figura 5.4: elettroluminescenza del modulo A4.1 effettuata dal laboratorio Kiwa	19
Figura 5.5: elettroluminescenza del modulo A4.2 effettuata dal laboratorio Kiwa	20
Figura 5.6: elettroluminescenza del modulo A4.3 effettuata dal laboratorio Kiwa	20
Figura 5.7: elettroluminescenza del modulo A4.4 effettuata dal laboratorio Kiwa	21
Figura 6.1: Schema del sistema di misura di corrente e tensione del modulo fotovoltaico	24
Figura 6.2: caratteristica I-V relativa alla prima prova effettuata sul modulo A4.3 il giorno 01/07/15	27
Figura 6.3: caratteristica P-V relativa alla prima prova effettuata sul modulo A4.3 il giorno 01/07/15.....	28
Figura 6.4: caratteristiche medie I-V (a sinistra) e P-V (a destra), relative al modulo A4.3, nel giorno 01/07/15	30
Figura 6.5: angoli caratteristici per determinare la posizione del sole	33
Figura 6.6: circuito elettrico equivalente di una cella fotovoltaica, secondo un modello a cinque parametri	38
Figura 6.7: andamento dell'air mass modifier in funzione dell'angolo zenitale per un modulo al silicio policristallino.....	42
Figura 6.8: andamento dell'energy gap del silicio in funzione della temperatura di cella	43
Figura 6.9: curve caratteristiche I-V e P-V dei moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4, relative alle misure effettuate il giorno 16 Luglio 2015	49

Figura 6.10: curve caratteristiche I-V e P-V dei moduli affetti da snail trails misurate in giorni diversi, confrontate con la curva del modello a cinque parametri.....	51
Figura 6.11: riduzione della corrente di cortocircuito dal valore teorico durante le ore della giornata	55
Figura 6.12: scostamento di V_{oc} dal valore di riferimento calcolato secondo il modello a cinque parametri	56
Figura 6.13: riduzione di potenza rispetto ai valori teorici di riferimento del modello a cinque parametri per i moduli affetti da snail trails, nel giorno 9 settembre 2015	57
Figura 6.14: riduzione di potenza dal valore teorico di riferimento ottenuto dal modello a cinque parametri per i moduli affetti da snail trails, in funzione dell'angolo di incidenza θ , nel giorno 9 Settembre 2015.....	58
Figura 6.15: riduzione di potenza dal valore teorico ottenuto dal modello a cinque parametri in funzione della temperatura di cella	58
Figura 6.16: legame tra le perdite percentuali di potenza ricavate dal modello a cinque parametri e irraggiamento globale, per i moduli affetti da snail trails, nella giornata del 9 Settembre 2015.....	59
Figura 6.17: riduzione di potenza dal valore teorico in funzione della quota di irraggiamento diretto, nel giorno 9 Settembre 2015, per i moduli affetti da snail trails.....	60
Figura 7.1: andamento dell'instantaneous final yield per i moduli A4.1, A4.2, A4.3, A4.4 e A3.3 nel giorno 19 Luglio 2015	64
Figura 7.2: valori di y_{fd} dei moduli A4.1 (a), A4.2 (b), A4.3 (c), A4.4 (d), confrontati con i valori di y_{fd} del modulo A3.3	70
Figura 7.3: andamento di y_{fd} dei moduli affetti da snail trails in funzione di y_{fd} di riferimento	70
Figura 7.4: andamento di y_f in una giornata nuvolosa.....	72
Figura 7.5: andamento di y_f in una giornata soleggiata	73
Figura 7.6: grafici di dispersione di $Err\%$ in funzione di y_r per i moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 nel periodo 14/04/15-30/08/15	74
Figura 8.1: termografia dei moduli A4.1, A4.2 e A4.3	78
Figura 8.2: termografia dei moduli A4.4 (al centro) e A4.5 (a destra).....	79
Figura 8.3: termografia del modulo A4.5.....	79
Figura 8.4: confronto tra elettroluminescenza (in alto a sinistra), termografia (in basso a sinistra) e immagine fotografata nel visibile (in basso a destra) di una parte del modulo A4.2	80
Figura 8.5: temperature in alcuni punti del modulo A4.4	81
Figura 8.6: temperature in alcuni punti dei moduli A4.2 (a sinistra) e A4.3 (a destra).....	82

Indice delle tabelle

Tabella 6.1: accuratezza del network analyzer.....	25
Tabella 6.2: caratteristiche dei piranometri.....	25
Tabella 6.3: scostamenti delle misure di temperatura e irraggiamento dal valor medio, per il modulo A4.3, durante le prove effettuate il giorno 01/07/15	26
Tabella 6.4: valori di datasheet del modulo Helios NA220W-P, riferiti alle STC.....	36
Tabella 6.5: coefficienti di temperatura del modulo Helios NA220W-P.....	36
Tabella 6.6: valori dei parametri del modello valutati alle Standard Test Conditions	40
Tabella 6.7: misure effettuate sui moduli affetti da snail trails e valori teorici ricavati dal datasheet e dal modello a cinque parametri, in giorni differenti con elevato irraggiamento	44
Tabella 6.8: confronto tra i dati misurati e i valori di riferimento ottenuti dal datasheet e dal modello a cinque parametri, in giorni differenti con elevato irraggiamento	45
Tabella 6.9: riduzione della potenza dei moduli dal valore teorico di riferimento secondo i valori di datasheet nei diversi giorni.....	46
Tabella 6.10: riduzione della potenza dei moduli dal valore teorico di riferimento secondo i valori ricavati dal modello a cinque parametri nei diversi giorni	47
Tabella 6.11: valori misurati e valori teorici ricavati dal datasheet e dal modello a cinque parametri, in diverse ore del giorno 9 Settembre 2015.....	53
Tabella 6.12: confronto tra i dati misurati e i valori teorici ottenuti dal datasheet e dal modello a cinque parametri, in diverse ore del giorno 9 settembre 2015	55
Tabella 6.13: irraggiamento diretto nelle diverse ore del giorno 9 settembre 2015, per i moduli A4.1 e A4.2	60
Tabella 6.14: irraggiamento diretto nelle diverse ore del giorno 9 settembre 2015, per i moduli A4.3 e A4.4	61
Tabella 7.1: confronto dei moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 con il modulo A3.3, nel periodo tra il 14/04/15 e il 30/06/15	68
Tabella 7.2: confronto con il modulo di riferimento in una giornata nuvolosa.....	71
Tabella 7.3: confronto con il modulo di riferimento in una giornata soleggiata	71
Tabella 7.4: scostamento di y_{fd} dal valore di riferimento, calcolato sull'intero periodo di monitoraggio (14/04/15-30/08/15).....	73
Tabella 8.1: principali caratteristiche della termocamera FLIR 335	77

1 Introduzione

L'energia prodotta da fonti rinnovabili ha subito negli ultimi anni un importante incremento, grazie alle politiche dei governi volte a ridurre la dipendenza dalle fonti fossili. In particolare, in Italia la produzione di energia da fonti rinnovabili è duplicata dal 2010 ad oggi, soprattutto grazie alla notevole diffusione di impianti fotovoltaici e di sistemi eolici (1), (2). Al 31 Dicembre 2014 le fonti rinnovabili hanno avuto un'incidenza del 43,3% sul totale della produzione elettrica nazionale, con il fotovoltaico che ha contribuito con l'8,7% (1).

Tra le ragioni dello sviluppo degli impianti fotovoltaici, oltre alle politiche di incentivazione, vi sono l'avanzamento tecnologico e la riduzione significativa dei costi di produzione, che ha reso competitivi i costi dell'elettricità prodotta dai sistemi fotovoltaici. Infatti negli impianti di taglia medio-grande il costo totale di produzione dell'energia elettrica ha ormai raggiunto la 'grid parity', ovvero l'energia elettrica prodotta ha lo stesso prezzo dell'energia elettrica acquistabile dalla rete, generalmente prodotta tramite fonti di energia tradizionali (3).

Per lo sviluppo dei sistemi fotovoltaici è necessario, oltre ai costi, migliorare diversi aspetti, come l'affidabilità, l'efficienza e la sicurezza. In quest'ottica, lo studio dei fenomeni di degrado è di fondamentale importanza, poiché essi influenzano le prestazioni dei moduli fotovoltaici ed hanno, di conseguenza, un'incidenza rilevante sulla stima dell'energia prodotta.

Uno dei fenomeni di degrado che è stato particolarmente osservato negli ultimi anni è il cosiddetto "snail trails". Le snail trails possono manifestarsi sia sui moduli al silicio monocristallino che policristallino; esse appaiono come sottili linee scure nella parte frontale delle celle o al loro bordo (4). In genere, esse si manifestano solo dopo alcuni mesi dall'esposizione dei moduli.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è di analizzare l'influenza delle snail trails sulle prestazioni di quattro moduli al silicio policristallino, in termini di potenza e, di conseguenza, di energia prodotta. Pertanto, l'attività sperimentale si è basata su misure elettriche e non sono state effettuate indagini di tipo chimico-fisico. L'attività sperimentale, costituita da due tipologie di campagna di misura, è stata condotta nel periodo tra Aprile e Settembre 2015.

Poiché i moduli presentano il difetto di tipo snail trails sia all'interno della cella sia ai sui bordi, i risultati ottenuti da questa analisi si riferiscono al fenomeno nel suo complesso, non essendo possibile analizzare i moduli separando i due effetti sovrapposti. Le prestazioni dei moduli affetti da snail trails sono state confrontate con i dati forniti nel datasheet del costruttore e con un modello teorico, il modello a cinque parametri.

Nella prima parte di questo lavoro è presentato il fenomeno delle snail trails e sono descritte le cause del loro sviluppo, secondo quanto pubblicato nei maggiori studi sul problema. Nel capitolo 3 viene fornita una descrizione del laboratorio SolarTechLab, situato presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano, dove sono state svolte le campagne di misura sui moduli. Il capitolo 5 riporta i risultati del test di elettroluminescenza, effettuato dal laboratorio Kiwa Cermet Italia per verificare la presenza di fenomeni di degrado sui moduli con snail trails. I capitoli successivi riguardano i risultati ottenuti dall'analisi sperimentale condotta presso il SolarTechLab.

Il capitolo 6 è relativo alle prove di caratterizzazione voltamperometrica dei moduli affetti da snail trails. In esso sono descritte le caratteristiche degli strumenti utilizzati ed il metodo di misura, sono discussi i risultati ottenuti dalle misure in relazione al confronto con i valori teorici forniti dal datasheet e con il modello a cinque parametri. Inoltre viene mostrato come la presenza delle snail trails influisca sull'efficienza di conversione della componente diretta dell'irraggiamento.

Il capitolo 7 è relativo all'analisi della produzione energetica dei moduli affetti da snail trails nel periodo tra il 14 Aprile e il 30 Agosto 2015. In esso viene effettuato il confronto con un modulo non affetto da snail trails che viene preso a riferimento, per determinare se vi è una riduzione dell'energia prodotta rispetto a quanto atteso e quantificare l'entità di questo tipo di perdita.

Infine, il capitolo 8 è relativo all'analisi termografica dei moduli affetti da snail trails. In esso sono mostrati i risultati dell'analisi termica, che è stata svolta al fine di verificare la presenza di eventuali punti caldi che possano influire sulle prestazioni dei moduli stessi. Inoltre, le immagini termiche sono confrontate con le immagini nel visibile e con i risultati delle prove di elettroluminescenza, al fine di ricercare correlazioni tra difetto osservato e comportamento termico ed elettrico del modulo.

2 Il fenomeno delle snail trails

Per rendere competitiva la tecnologia della produzione di energia da fonte solare, oltre ai costi, è di fondamentale importanza migliorare l'affidabilità, le prestazioni e la durata di ogni componente dei sistemi fotovoltaici. Tra i fenomeni di degrado (5) dei moduli fotovoltaici che negli ultimi anni hanno destato maggiore preoccupazione ci sono sicuramente le cosiddette "snail trails" (6), (7), (4). Esse si presentano come un effetto di scolorimento dei moduli fotovoltaici; sono presenti sulla superficie della cella e consistono in sottili e brevi linee scure che si sviluppano all'interno di essa o ai suoi bordi (8), (4). La comparsa di snail trails generalmente si manifesta solo dopo alcuni mesi dall'esposizione dei moduli (4). Le snail trails si possono sviluppare su diversi tipi di celle al silicio. In Figura 2.1 è mostrato un modulo affetto da snail trails ed un dettaglio ingrandito di una cella particolarmente affetta dal medesimo problema.

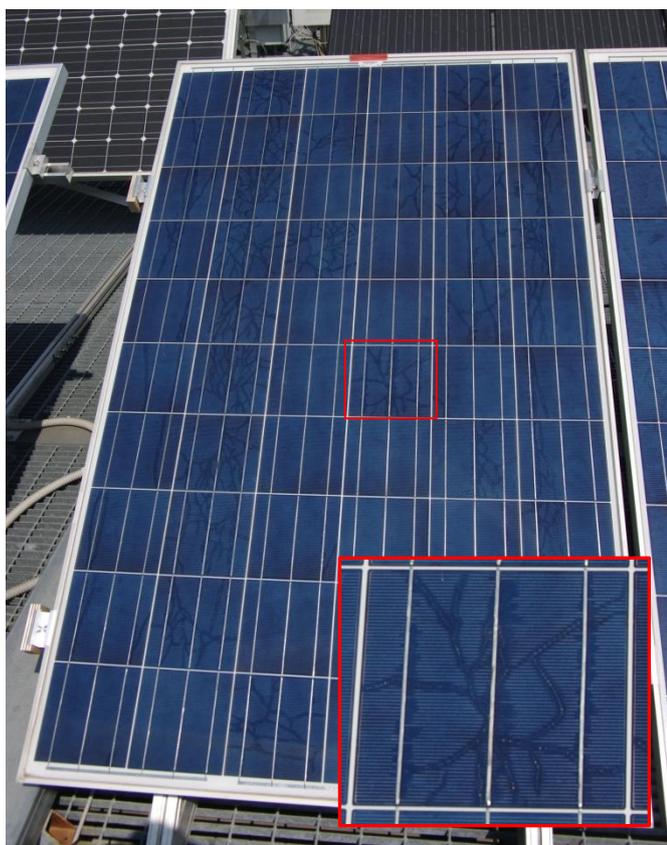


Figura 2.1: modulo affetto da snail trails e particolare di una cella affetta

2.1 Tipologie di snail trails

Si possono distinguere sostanzialmente due tipologie di snail trails (9):

- snail trails che si sviluppano all'interno della cella, in presenza di microfratture;
- snail trails che si sviluppano lungo i bordi della cella, note come framing snail trails.

Entrambe le tipologie di snail trails iniziano ad apparire sulle celle nello stesso periodo, pertanto la loro generazione deve avere cause simili.

Nelle Figura 2.2 e Figura 2.3 sono riportate una cella sana, una affetta da snail trails ed una affetta framing snail trails. Si può notare come in presenza delle snail trails sia effettivamente presente uno scolorimento dei contatti d'argento, che, come meglio spiegato nel paragrafo 2.3, è dovuto a reazioni chimiche che coinvolgono i contatti stessi e il film incapsulante di EVA (Etilene Vinil Acetato).

La cella sana presenta l'elettrodo superiore (griglia e bus bar) in ottimo stato, senza alcun scolorimento né ai bordi della cella né al suo interno (Figura 2.2).

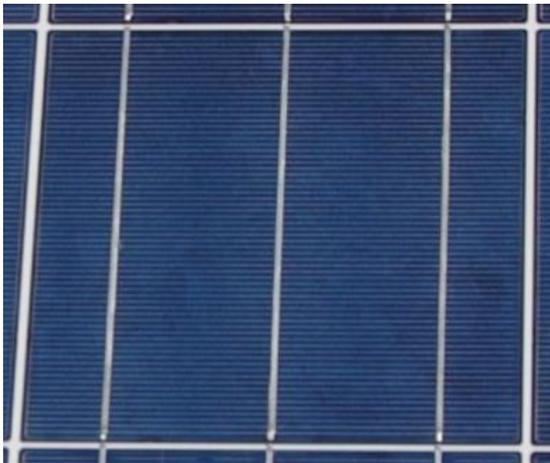


Figura 2.2: cella sana, con assenza di snail trails

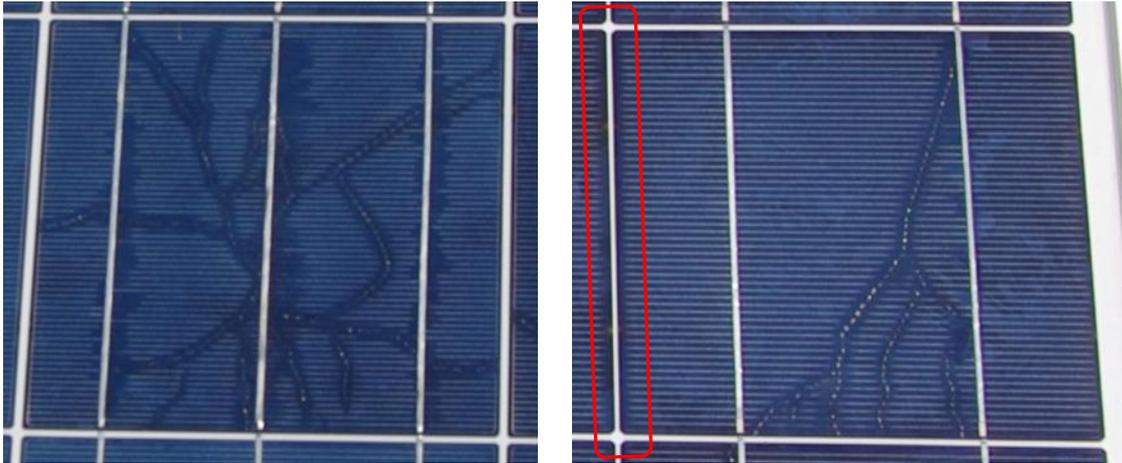


Figura 2.3: cella con snail trails (a sinistra) e cella con framing snail trails (a destra)

2.2 Struttura di un modulo fotovoltaico

In Figura 2.4 è rappresentata la struttura di un modulo fotovoltaico; essa è costituita principalmente da diversi strati sovrapposti (10).

La parte superiore del modulo è costituita da vetro temperato. Esso deve avere una buona resistenza meccanica e un'elevata trasparenza; generalmente lo spessore di questo primo strato è compreso tra 2 mm e 4 mm.

Al di sotto del vetro vi è la matrice di celle. Essa è incapsulata sia frontalmente che posteriormente da un materiale polimerico, generalmente EVA, con funzione di supporto meccanico e di isolamento, sia elettrico che da agenti esterni. Esso è un polimero che, se sottoposto a un processo di laminazione a caldo, diventa rigido e trasparente e va ad inglobare le celle fotovoltaiche.

Il processo di laminazione è la fase fondamentale per la corretta costruzione del modulo fotovoltaico e per la sua durata nel tempo (11). Lo svolgimento corretto di questo processo, infatti, dovrebbe garantire che nelle condizioni di normale funzionamento dei moduli non si verificano la formazione di bolle all'interno del film di EVA né la delaminazione dei vari strati che compongono il modulo, che potrebbero compromettere seriamente le prestazioni del modulo stesso. Il processo consiste nell'unione dei diversi strati di cui è composto il modulo fotovoltaico, attraverso la fusione sottovuoto a 140-150°C. La fusione del foglio di EVA funge da collante tra i diversi strati (vetro, EVA, e backsheet foil) con le celle in silicio, generando un corpo unico e compatto. È importante che in questa fase le

temperature non siano troppo elevate, per evitare la formazione di bolle d'aria all'interno del laminato, né troppo basse, per non creare un incapsulamento insufficiente. Anche i tempi di laminazione devono essere rispettati, per permettere al foglio di EVA di polimerizzare completamente; a questo scopo i tempi di laminazione sono in genere di circa 15 minuti.

Sul retro del modulo si trova il foglio posteriore, meglio noto come backsheet foil. Esso è realizzato generalmente in Tedlar (polivinilfluoruro) e ha la funzione di isolare elettricamente, proteggere e schermare dalle intemperie e dall'umidità gli strati più interni del modulo fotovoltaico.

Il vetro, le celle incapsulate nell'EVA ed il backsheet foil sono poi montati all'interno della cornice. Essa normalmente è formata da profilati di alluminio anodizzato ed ha la funzione di dare robustezza meccanica al modulo fotovoltaico, oltre che fornire un supporto per l'installazione ed il fissaggio del modulo stesso. La parte attiva del modulo è incastrata all'interno della cornice; inoltre, il fissaggio tra essa e la cornice prevede l'uso di materiale sigillante, tipicamente silicone, che ha anche la funzione di ulteriore barriera nei confronti delle infiltrazioni di umidità sui bordi del modulo.

Infine, nella scatola di giunzione (junction box), posta nel retro del modulo, sono presenti i collegamenti elettrici tra le celle ed i cavi del modulo, oltre ad eventuali diodi di bypass.

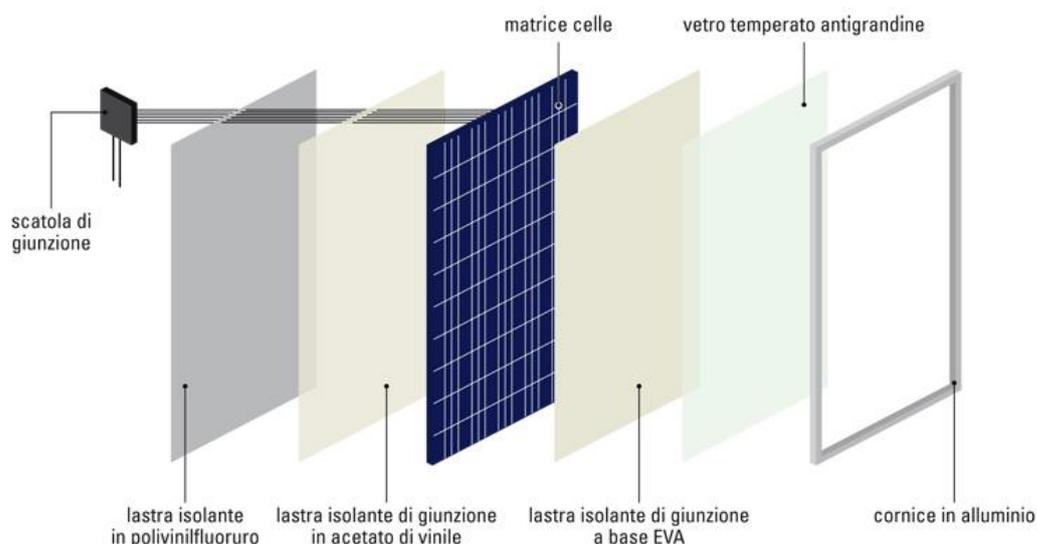


Figura 2.4: struttura di un modulo fotovoltaico

2.3 Possibili cause di sviluppo delle snail trails

Il difetto di tipo snail trails si riferisce allo scolorimento dei contatti d'argento della griglia di fingers che si verifica in prossimità di microfratture presenti sulla matrice di celle.

La formazione delle snail trails, secondo diversi studi (9), (4), è dovuta alla diffusione dell'umidità attraverso il backsheet foil. L'umidità può quindi diffondere nel modulo attraversando il sottile strato di EVA inferiore, probabilmente grazie all'incompleta polimerizzazione dell'EVA stesso in fase di laminazione, e passando attraverso le microfratture può raggiungere facilmente i bordi della cella e la sua superficie superiore (8), (6).

La presenza di un campo elettrico, la temperatura di normale funzionamento delle celle e la radiazione UV possono innescare un processo di corrosione all'interfaccia tra il contatto d'argento dei fingers e il sottile foglio incapsulante di EVA, permettendo una migrazione dell'argento nell'EVA e la formazione di componenti contenenti particelle d'argento (12), (13), (6). Perché questo avvenga è necessario che il materiale polimerico di cui è costituito l'EVA contenga tracce di zolfo, fosforo e cloro (14). La reazione chimica che avviene all'interfaccia tra i contatti d'argento e l'EVA e la formazione di legami chimici con zolfo e fosforo sembrano essere la causa dello scolorimento della griglia dei fingers.

Il cloro sembra avere un'influenza iniziale sulla catena delle reazioni chimiche coinvolte (14). Infatti l'ossigeno presente nelle molecole d'acqua reagisce con l'argento, formando ossido d'argento (Ag_2O); a sua volta l'ossido d'argento reagisce con il cloro, formando cloruro d'argento (AgCl) che, in presenza della radiazione solare, può rompersi in argento amorfo e cloro. L'argento amorfo, di colore nero, può reagire con l'acido solfidrico (H_2S) o con il fosforo presente nell'EVA, producendo rispettivamente solfuro d'argento (Ag_2S) e fosfato d'argento Ag_3PO_4 . Il solfuro d'argento è di colore nero ed è tra i composti più stabili dell'argento, mentre il fosfato d'argento è un composto ionico inorganico di colore giallastro.

Le reazioni chimiche che avvengono all'interfaccia tra i contatti d'argento e il film di EVA non sono sempre note, poiché non si ha certezza sulla presenza di altre specie chimiche oltre alla molecole base che formano il polimero, cioè l'etilene e l'acetato di vinile. Spesso l'EVA è combinato con una serie di additivi, tra cui agenti indurenti, stabilizzatori della radiazione UV, antiossidanti e agenti per favorire l'adesione al vetro (11). I costruttori di moduli non forniscono informazioni a riguardo e pertanto le specie chimiche coinvolte

possono variare nei diversi moduli. Ciò che appare chiaro, invece, è che la presenza di zolfo, fosforo e cloro abbia un'influenza significativa sullo scolorimento della griglia e quindi sull'effetto snail trails, in virtù delle reazioni chimiche che avvengono con l'argento. Alla luce di quanto precedentemente indicato, le principali criticità (6) che creano le condizioni per la formazione delle snail trails risultano essere:

- la composizione chimica del materiale incapsulante e la concentrazione di zolfo, fosforo e cloro;
- le proprietà del backsheet foil, con particolare riferimento alla permeabilità al vapore d'acqua;
- la composizione chimica dei contatti d'argento;
- la presenza di microfratture nella cella.

Nonostante le microfratture non siano l'unica causa delle snail trails, esse rappresentano una condizione necessaria per lo sviluppo di quest'ultime. Infatti la formazione delle snail trails è strettamente collegata alla presenza di microfratture, attraverso le quali l'umidità, una volta penetrata dal backsheet foil, riesce a raggiungere la superficie superiore della cella, dove avviene l'ossidazione dei contatti d'argento e le successive reazioni chimiche. Non tutte le microfratture portano alla formazione di snail trails, ma in presenza di snail trails ci sarà sicuramente una microfrattura nella stessa posizione (9).

Negli ultimi anni, per ridurre i costi di produzione dei moduli fotovoltaici, i produttori hanno spesso diminuito lo spessore del film di silicio, passando da 300 μm a 150-200 μm , rendendo così le celle più fragili e maggiormente suscettibili alle fratture durante la loro manipolazione, nel processo di laminazione o nel loro immagazzinamento (7). Le microfratture possono essere generate da vibrazioni o da carichi meccanici a cui è sottoposta la cella, sia durante la produzione sia durante il trasporto e l'installazione. Nelle condizioni di installazione le celle possono essere sottoposte a carichi meccanici dovuti alla spinta del vento o a dilatazioni termiche delle strutture di sostegno, al peso della neve o a impatti con la grandine, che anche se non generano rotture nella copertura di vetro, possono comunque generare microfratture nelle celle (5).

Dal punto di vista elettrico, in prossimità di una microfrattura si ha un addensamento della corrente, con conseguente generazione di calore nell'area circostante ed aumento della resistenza equivalente serie della cella. Possono esistere casi in cui una o più aree

all'interno della cella risultino completamente isolate a causa delle microfratture: ciò si verifica quando porzioni di fingers restano completamente isolati dai bus bar. La radiazione incidente sull'area isolata non viene convertita in energia elettrica, ma ha il solo effetto di riscaldare questa parte di cella (7): di fatto, l'area isolata si comporta come una cella fotovoltaica a vuoto.

3 Descrizione del laboratorio SolarTechLab

Il laboratorio SolarTechLab è stato fondato nel 2012 presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano ed è ubicato sul tetto del dipartimento stesso (15). Le attività che vengono svolte presso il laboratorio hanno come obiettivo generale l'analisi dei sistemi di conversione dell'energia solare, in condizioni reali di funzionamento.

Nel laboratorio vengono svolte le seguenti attività:

- Analisi di moduli fotovoltaici commerciali ed innovativi, di moduli termici, di moduli ibridi (fotovoltaico e termico) e di fotovoltaici a concentrazione, in condizioni reali di funzionamento. Diverse tipologie di questi moduli sono attualmente installate.
- Analisi di componenti per i sistemi fotovoltaici o solari, come l'inverter o gli inseguitori. Presso il laboratorio sono installati nuovi microinverter in grado di ottimizzare l'energia prodotta da ciascun modulo in condizioni reali, scambiando dati con un sistema di controllo remoto. Sono in fase di progetto l'analisi ed il confronto tra le diverse tipologie di inseguitori, sia applicate al fotovoltaico tradizionale, sia al fotovoltaico a concentrazione.
- Studio di modelli previsionali della produzione da impianti fotovoltaici; lo sviluppo di tali modelli è di fondamentale importanza, al fine di aumentare la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili. Questi modelli possono essere anche utilizzati per ottimizzare la produzione, distribuzione e accumulo dell'energia elettrica.
- Analisi della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili inserite in reti isolate e con sistemi di accumulo. L'obiettivo è quello di sviluppare i sistemi di controllo e ottimizzare le strategie di accumulo per diversi profili di richiesta elettrica.
- Ottimizzazione dei sistemi fotovoltaici, sviluppo di componenti e test di prototipi. L'ultimo obiettivo del laboratorio consiste nel miglioramento delle attuali tecnologie di conversione e realizzazione di prototipi precedentemente analizzati e sviluppati mediante modelli teorici. La finalità è quella di migliorare la tecnologia attuale, consentendo un risparmio economico rispetto ai sistemi tradizionali, pur

garantendo la medesima affidabilità.

La pianta del laboratorio è rappresentata in Figura 3.1, dove è mostrata la situazione al giorno 19 Giugno 2015. Sono installati 26 moduli, di diversa tecnologia e di costruttori differenti, tutti orientati verso sud, con inclinazione fissa di 30° rispetto al piano orizzontale, ad eccezione di due moduli che hanno un'inclinazione variabile. Ogni modulo fotovoltaico è collegato alla rete di bassa tensione tramite microinverter commerciali; in questo modo, oltre che ottimizzare la produzione di ciascun modulo, ognuno di essi è controllato e monitorato in modo indipendente.

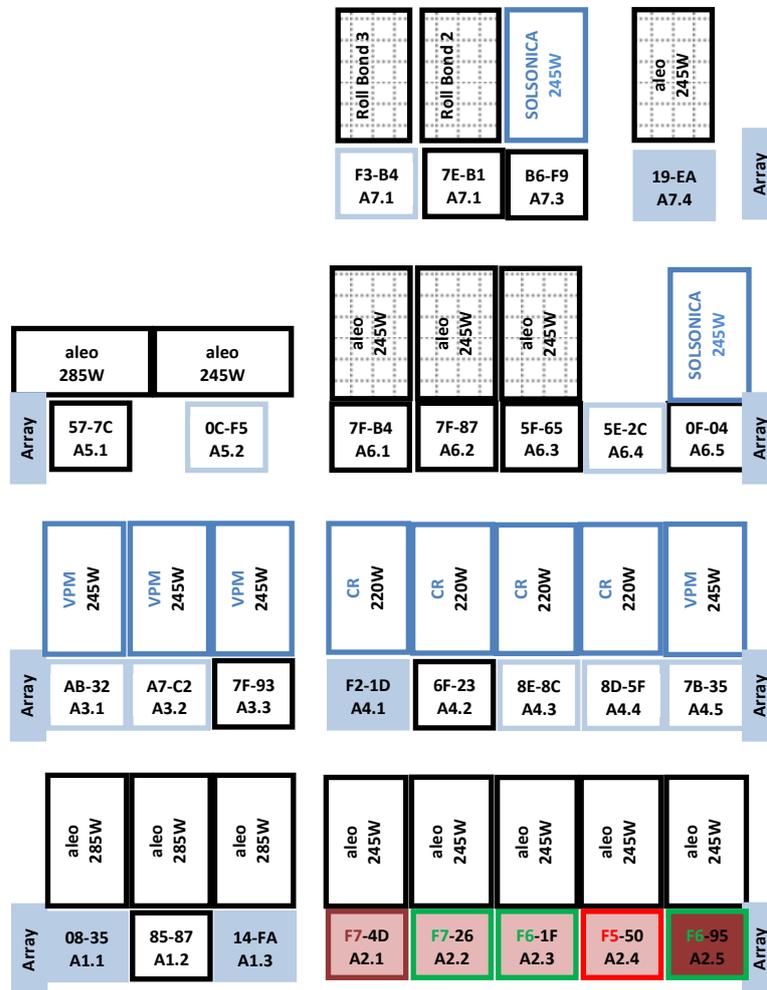


Figura 3.1: pianta del laboratorio SolarTechLab, con i moduli e i rispettivi inverter, al giorno 19/06/2015

Le coordinate geografiche del laboratorio sono $45.502941^{\circ}\text{N}$ di latitudine e 9.156577°E di longitudine.

Il monitoraggio continuo delle variabili ambientali è effettuato dalla stazione meteorologica presente al laboratorio, che misura:

- l'irraggiamento solare globale e diffuso sul piano orizzontale;
- la temperatura ambiente;
- l'umidità dell'aria;
- la velocità e la direzione del vento.

Il valore istantaneo di tutte le misure è disponibile in real time attraverso l'interfaccia grafica del software di gestione della centralina meteorologica, ma non è memorizzato. I dati meteorologici sono memorizzati in un database in forma aggregata: per ognuna delle misure sono salvati il valore medio, il valore massimo, il valore minimo e la deviazione standard, calcolati sui campioni acquisiti in intervallo temporale di dieci minuti.

In particolare, la misura dell'irraggiamento è effettuata con due piranometri in Classe 1. Un piranometro misura l'irraggiamento globale sul piano orizzontale ed un secondo piranometro, posto dietro ad una banda metallica, misura l'irraggiamento diffuso (Figura 3.2).

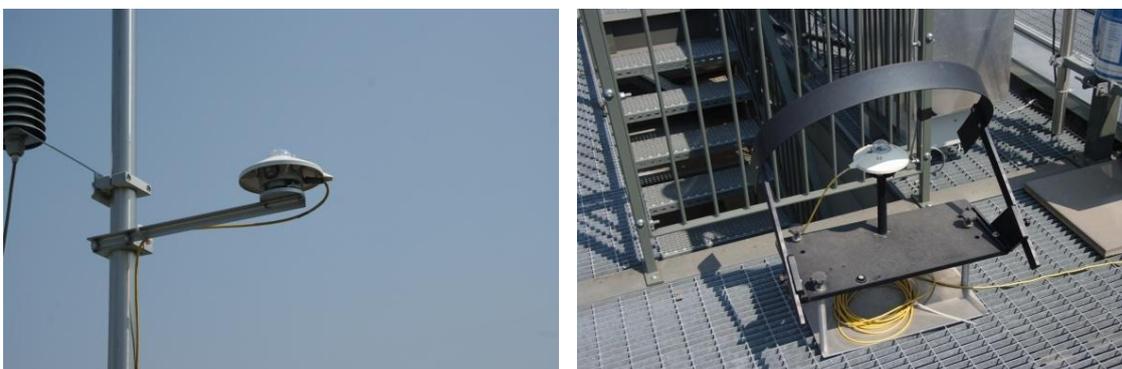


Figura 3.2: piranometro per la misura dell'irraggiamento globale sul piano orizzontale (a sinistra) e piranometro a banda per la misura dell'irraggiamento diffuso (a destra)

I moduli affetti da snail trails ed oggetto del presente lavoro sono installati nelle posizioni da 1 a 4 dell'array A4, identificate con le sigle A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 (Figura 3.3). Essi sono moduli di tipo policristallino, modello Helios NA220W-P, con una potenza nominale

di 220 W e sono stati prodotti nel 2011. Essi fanno parte del generatore fotovoltaico di un impianto a tetto entrato in esercizio nel 2012. Il proprietario dell'impianto ha riscontrato la presenza delle snail trails solo dopo alcuni mesi dall'entrata in esercizio dell'impianto fotovoltaico stesso.



Figura 3.3: array 4, composto dai quattro moduli con snail trails (A4.1, A4.2, A4.3, A4.4) e dal modulo A4.5

4 Scopo dell'attività sperimentale e metodologie

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di valutare l'influenza delle snail trails sulle prestazioni dei moduli fotovoltaici, in termini di potenza ed energia producibile.

Nel capitolo 5 vengono presentati i risultati di alcuni test svolti dal laboratorio Kiwa Cermet Italia sui moduli fotovoltaici affetti da snail trails, dopo che questi sono stati rimossi dall'impianto di cui facevano parte e prima che fossero installati presso il laboratorio SolarTechLab. Si tratta di test di ispezione visiva, elettroluminescenza, rigidità dielettrica e isolamento dalle correnti di dispersione. Queste tipologie di test sono utili per verificare il corretto funzionamento dei moduli o per evidenziare la presenza di difetti, quali, ad esempio, le microfratture.

Le attività sperimentali svolte presso il laboratorio SolarTechLab sono invece di diverso tipo e sono descritte nei capitoli 6, 7, e 8. Esse hanno tre obiettivi:

- caratterizzare i moduli fotovoltaici affetti da snail trails dal punto di vista elettrico mediante la misura della curva voltamperometrica con diversi valori di temperatura ed irraggiamento;
- valutare la produzione energetica dei singoli moduli affetti da snail trails in condizioni reali di funzionamento;
- caratterizzare i moduli fotovoltaici affetti da snail trails dal punto di vista termico.

L'analisi del comportamento elettrico dei moduli affetti da snail trails viene presentata nei capitoli 6 e 7, rispettivamente in termini di potenza e produzione energetica. In essi vengono dapprima descritti gli strumenti e le modalità di misura e successivamente vengono presentati e discussi i risultati della campagna di misura.

Il capitolo 6 è relativo alle prove di caratterizzazione voltamperometrica dei moduli, in diverse condizioni di irraggiamento e temperatura del modulo. Esse permettono di caratterizzare in modo completo il modulo fotovoltaico dal punto di vista della porta elettrica. Da esse sono ricavati:

- il punto di massima potenza (P_{mpp}) e le sue coordinate nel piano voltamperometrico (V_{mpp} ; I_{mpp});
- la tensione a vuoto (V_{oc});
- la corrente di cortocircuito (I_{sc});

- la curva tensione-potenza.

Le misure delle caratteristiche I-V e P-V sono state effettuate per due diverse campagne di misura: una prima campagna di misura è stata effettuata in giorni diversi, in condizioni di elevato irraggiamento, mentre una seconda campagna è stata effettuata in diverse ore della stessa giornata, al fine di valutare le prestazioni dei moduli al variare delle condizioni di irraggiamento e temperatura.

A valle delle misure, viene effettuato il confronto tra i valori misurati di potenza, corrente di cortocircuito, tensione a vuoto e quanto dichiarato nel datasheet del costruttore, al fine di avere un confronto con il funzionamento atteso dello stesso modulo se non fosse affetto da snail trails. Un ulteriore confronto con i valori attesi di funzionamento è stato effettuato costruendo la curva voltamperometrica a partire da un modello circuitale del modulo fotovoltaico; tra i modelli disponibili in letteratura (16) si è scelto il modello a cinque parametri caratterizzato a partire dai dati dichiarati nel datasheet dal costruttore.

Il capitolo 7 affronta l'analisi dell'energia prodotta dai moduli in condizioni reali, ovvero sottoposti a diverse condizioni di irraggiamento e temperatura, nel periodo compreso tra il 14 Aprile ed il 30 Agosto 2015. Nella prima parte del capitolo viene spiegato come si calcola l'energia giornaliera prodotta, a partire dalle curve potenza-tempo, mentre nella seconda parte vengono mostrati e discussi i risultati della campagna di misure. Le misure ottenute vengono confrontate con il funzionamento di un modulo policristallino non affetto da snail trails (di seguito indicato per brevità "modulo sano"). In particolare il confronto è effettuato tramite due indici, chiamati instantaneous final yield index e daily final yield index, che permettono di trarre conclusioni sia qualitative che quantitative riguardo all'influenza delle snail trails sull'energia prodotta dai moduli.

Un'ultima analisi svolta presso il laboratorio SolarTechLab è la termografia. Essa ha lo scopo di mostrare il comportamento termico dei moduli affetti da snail trails quando essi sono in produzione e, in particolare, di verificare se le celle presentino punti caldi tali da compromettere l'integrità dei moduli stessi. I risultati ottenuti da questa analisi sono riportati nel capitolo 8. Inoltre, le immagini termografiche vengono confrontate con le immagini ottenute dal test di elettroluminescenza e con le immagini nel visibile. Dalle eventuali analogie che esistono tra le diverse immagini, si possono trarre importanti conclusioni sul funzionamento delle celle affette da snail trails e individuare quali di esse sono maggiormente influenzate da tale difetto.

5 Analisi dei moduli presso il laboratorio Kiwa Cermet Italia

Ciascun modulo affetto da snail trails è stato oggetto dei seguenti test prima di essere installato presso il SolarTechLab:

- ispezione visiva;
- elettroluminescenza;
- rigidità dielettrica;
- isolamento dalle correnti di dispersione.

Tali test sono stati effettuati presso il laboratorio esterno Kiwa Cermet Italia.

L'esito di questi test ha mostrato che i moduli non presentano alcun problema di isolamento elettrico ed è stata verificata la tenuta del materiale isolante fino ad una tensione di 6000 V, senza causare cedimento dello stesso. È stata inoltre verificata la resistenza alle correnti di dispersione, risultando nella norma.

L'analisi visiva e il test con elettroluminescenza hanno invece messo in evidenza la presenza di microfratture, e quindi anche delle snail trails, sulla superficie delle celle. In particolare l'analisi visiva ha mostrato numerose microfratture, l'annerimento dei fingers e segni di bruciature sulle celle. In Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 sono mostrate alcune immagini che documentano lo stato dei fingers, come già segnalato dall'ispezione visiva effettuata dal laboratorio Kiwa.



Figura 5.1: scolorimento e annerimento dei fingers e microfratture



Figura 5.2: fingers anneriti, segni di bruciature



Figura 5.3: fingers con segni di bruciature lungo una microfrattura

Il test di elettroluminescenza è puramente qualitativo, ma ha il pregio di mostrare importanti difetti presenti sulla superficie dei moduli (7). Esso si basa sul seguente principio: se si applica una tensione al modulo fotovoltaico, si verifica una ricombinazione degli elettroni nelle sue celle che provoca emissione di fotoni da parte del semiconduttore su frequenze del vicino infrarosso, cioè in un campo spettrale non visibile ad occhio nudo.

I fotoni emessi sono rilevati da una specifica camera ad elettroluminescenza ed, in generale, vale la regola che quanti più fotoni sono emessi da una cella, tanto più attiva è quell'area nella produzione di energia. Le parti più chiare delle celle indicano un'elevata emissione di fotoni e dimostrano l'attività a livello elettrico, mentre le parti più scure indicano una scarsa o nulla attività a livello elettrico. In particolare si possono notare in Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7 la presenza di microfratture (1), aree di cella elettricamente separate (2) e malfunzionamento dei fingers (3).

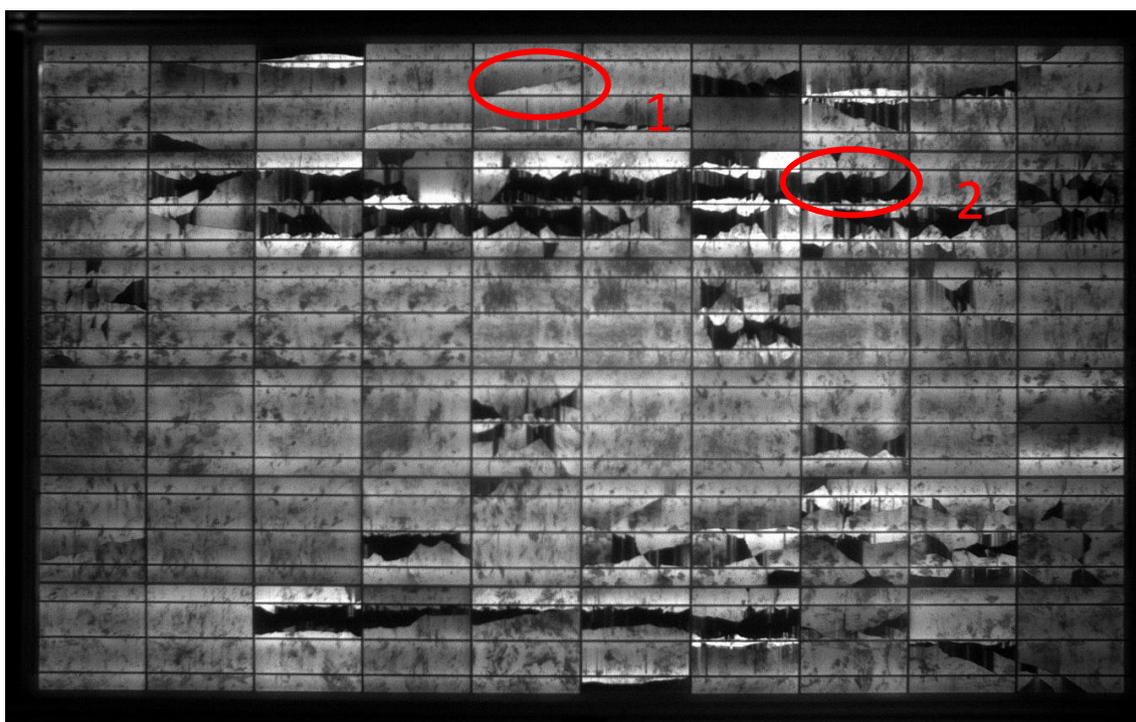


Figura 5.4: elettroluminescenza del modulo A4.1 effettuata dal laboratorio Kiwa

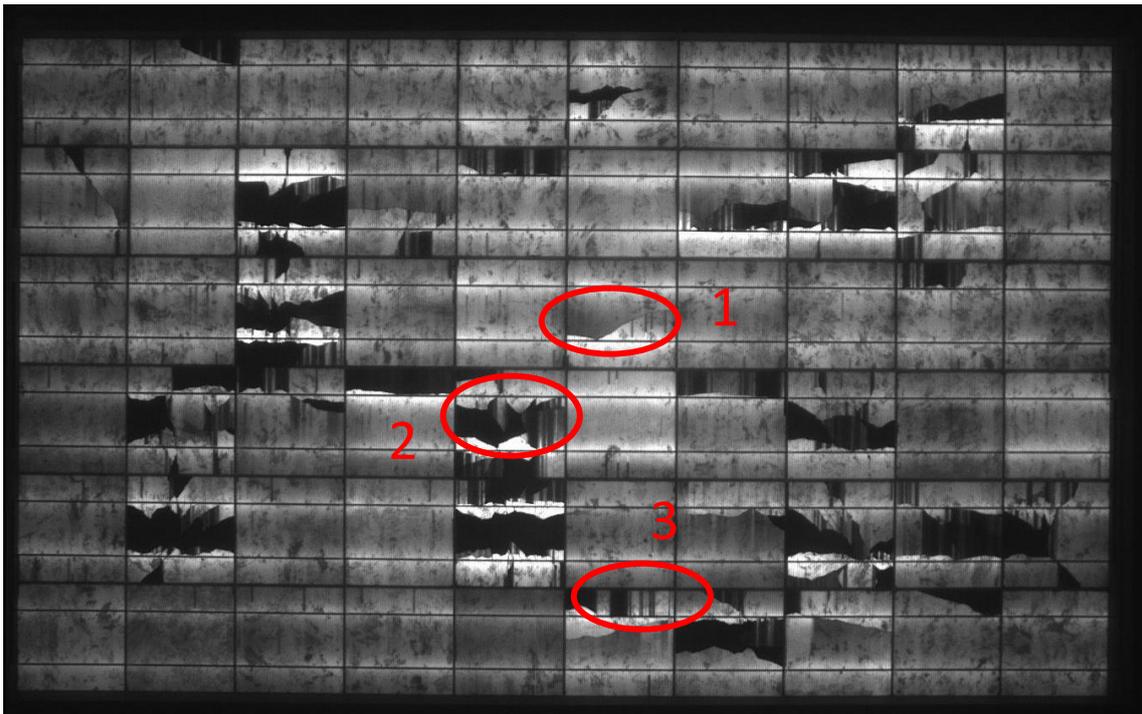


Figura 5.5: elettroluminescenza del modulo A4.2 effettuata dal laboratorio Kiwa

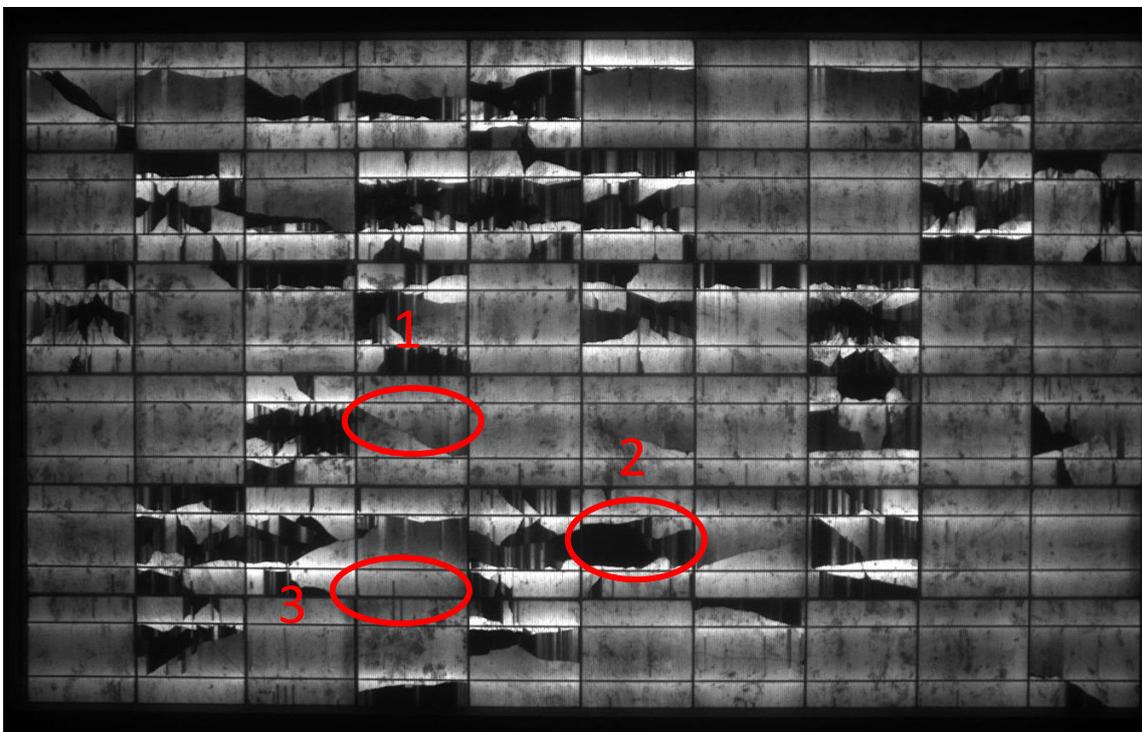


Figura 5.6: elettroluminescenza del modulo A4.3 effettuata dal laboratorio Kiwa

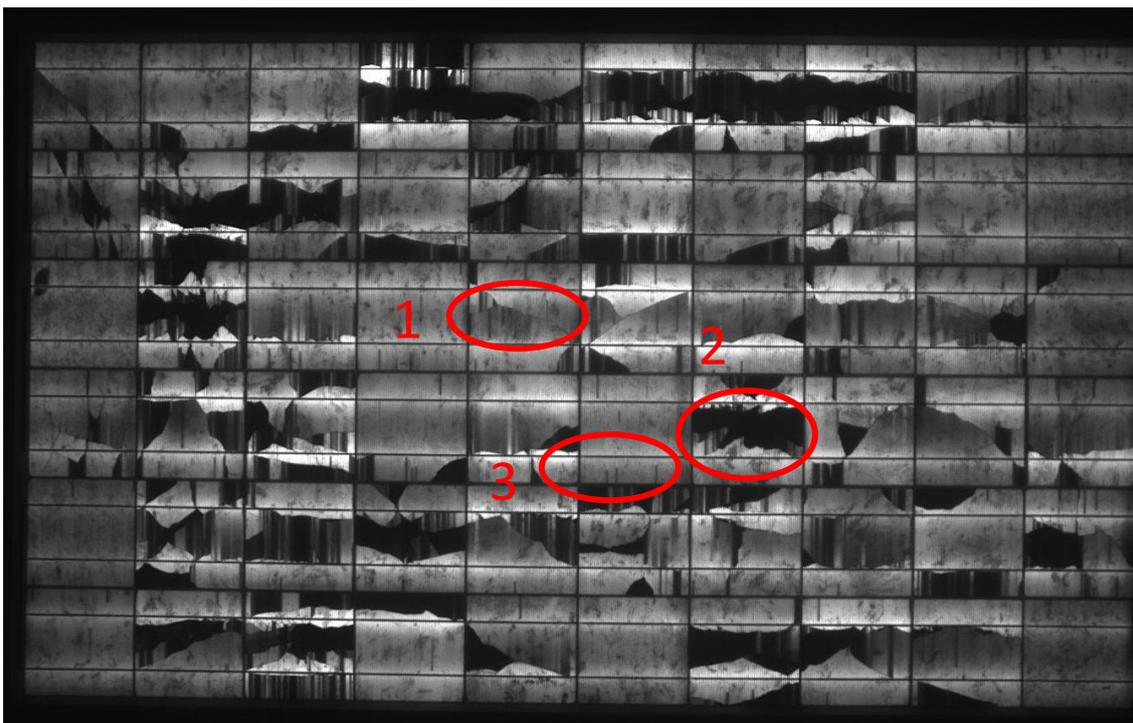


Figura 5.7: elettroluminescenza del modulo A4.4 effettuata dal laboratorio Kiwa

Le aree più scure evidenziate dal test di elettroluminescenza fanno riferimento a quelle zone delle celle che sono elettricamente isolate per la presenza di microfratture. Pertanto tali zone non partecipano attivamente alla generazione di energia elettrica quando il modulo è in produzione. Si noti come i moduli A4.3 e A4.4 abbiano un maggior numero di celle danneggiate rispetto ai moduli A4.1 e A4.2, ci si aspetta che ciò si traduca in una maggiore riduzione di potenza dei moduli¹.

Il danneggiamento dei fingers è dovuto alle reazioni di ossidazione dell'argento e alle interazioni chimiche con i composti presenti nell'EVA (6). Questo causa il loro malfunzionamento e quindi una riduzione della corrente che arriva ai bus bar. I fingers malfunzionanti sono visibili nelle immagini catturate nel test di elettroluminescenza perché sono di colore più scuro; nelle immagini sono indicati con il riferimento 3.

Sulla superficie dei moduli si possono inoltre notare delle celle con luminosità non uniforme, segno che queste celle sono elettricamente attive, ma non funzionano in modo del tutto corretto.

¹ Si rimanda ai paragrafi 6.4 e 6.5 per i valori di potenza misurati sui moduli

6 Caratteristiche I-V e P-V

In questo capitolo viene trattata la misura delle curve voltamperometriche, o curve I-V, dei moduli fotovoltaici affetti da snail trails. Da esse sono derivate le curve di potenza, o curve P-V. I risultati ottenuti sono confrontati con i valori attesi; questi ultimi sono ottenuti con due approcci differenti.

La prima parte di questo capitolo descrive la procedura sperimentale per la misura delle curve I-V e la strumentazione utilizzata per la misura contemporanea della tensione e della corrente ai morsetti dei moduli. Vengono poi analizzati i dati di temperatura del modulo fotovoltaico e di irraggiamento rilevati durante il test e misurati, rispettivamente, da una termocoppia posizionata sul back dei moduli e dai due piranometri della centralina meteo. Successivamente i risultati delle misure sono confrontati con i valori attesi attraverso due approcci, con l'obiettivo di valutare in termini sia qualitativi che quantitativi l'effetto delle snail trails sulla riduzione della potenza producibile dai moduli affetti da questo tipo di alterazione. Il primo approccio considera i valori forniti dal datasheet; il secondo considera il modello di modulo fotovoltaico a cinque parametri, caratterizzato a partire dai valori di tensione a vuoto, corrente di cortocircuito e punto di massima potenza forniti dal datasheet.

6.1 Procedura di misura delle caratteristiche I-V e strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati

In questo paragrafo viene descritta la procedura sperimentale e gli strumenti utilizzati per la misura delle caratteristiche I-V dei moduli fotovoltaici affetti da snail trails, in condizioni reali di funzionamento.

Le curve voltamperometriche dei moduli sono state misurate in giornate diverse ed in differenti condizioni operative, utilizzando un'apparecchiatura di misurazione elettrica basata su un network analyzer ed un circuito di test specifico, il tutto coordinato da un personal computer. Lo schema di funzionamento della strumentazione è riportato in Figura 6.1.

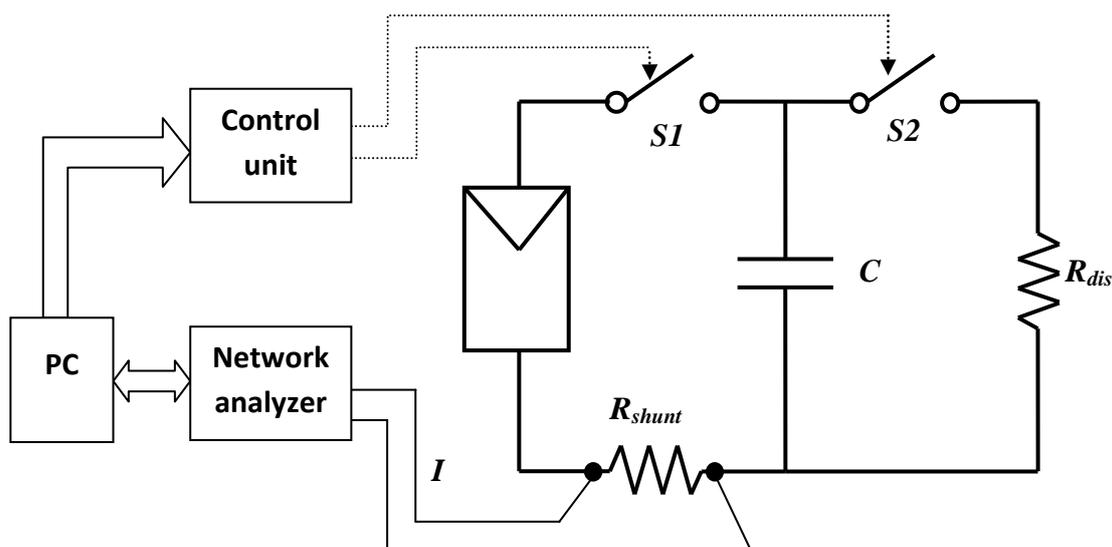


Figura 6.1: Schema del sistema di misura di corrente e tensione del modulo fotovoltaico

Prima dell'inizio del test il condensatore C è stato collegato alla resistenza di scarica R_{dis} , attraverso l'interruttore S_2 , che lo mantiene scarico. Il test ha inizio con l'apertura di S_2 , a seguito della quale viene chiuso l'interruttore S_1 . La corrente prodotta dal modulo fotovoltaico carica il condensatore fino a quando la tensione non raggiunge il valore di circuito aperto del modulo. Alla fine del test S_1 si apre ed S_2 si chiude, scaricando il condensatore sulla resistenza di scarica e creando le condizioni necessarie per l'inizio di un nuovo test. La control unit gestisce automaticamente l'apertura e la chiusura degli interruttori.

Durante il test vengono misurate le coppie di corrente e tensione, che vengono memorizzate dal network analyzer. Esso è dotato di convertitori A/D a 12 bit che contemporaneamente campionano i segnali di corrente e tensione, con una velocità di 12500 campioni/s. La corrente viene misurata in modo indiretto utilizzando la trasduzione corrente/tensione mediante resistenza di shunt R_{shunt} , mentre la tensione è misurata all'ingresso del circuito di test. Il valore reale della tensione è però ottenuto sommando al valore misurato la caduta di tensione dovuta alla resistenza dei cavi. Il PC coordina il sistema di misura: controlla la sequenza on/off degli interruttori e scarica e immagazzina i dati misurati alla fine di ogni test.

L'accuratezza del network analyzer è riportata in Tabella 6.1.

	Fondo scala (FS)	Accuratezza		
		1÷10% del FS	10÷130% del FS	130÷150% del FS
Tensione ingresso	100 V	1 V	100 mV	1 V
Corrente ingresso	10 A	100 mA	10 mA	100 mA

Tabella 6.1: accuratezza del network analyzer

La procedura per la misura delle curve voltamperometriche è la seguente, ed è applicata in sequenza ad ognuno dei quattro i moduli affetti da snail trails: una volta collegato il circuito di test al modulo, vengono effettuate dieci misurazioni della curva I-V in sequenza, in ognuna delle quali il network analyzer memorizza le coppie corrente e tensione durante la prova e, al termine di essa, scarica i dati nel PC, che li visualizza e li memorizza.

Ogni misurazione della curva I-V fa riferimento a determinate condizioni di irraggiamento e temperatura del modulo.

La temperatura viene misurata sul back del modulo, attraverso una termocoppia posizionata in corrispondenza del centro di una cella. Si è fatto uso di una termocoppia PT100 collegata al multimetro Agilent modello U1182A, adatta a misurare temperature superficiali, con un intervallo di funzionamento di $-50^{\circ}\text{C}/400^{\circ}\text{C}$ e con accuratezza di $0,75\% \pm 2,2^{\circ}\text{C}$.

Per la misura dell'irraggiamento sono disponibili i valori di irraggiamento globale sul piano orizzontale e di irraggiamento diffuso, che sono misurati dai rispettivi piranometri, le cui caratteristiche sono riportate nella Tabella 6.2.

Durante ciascuna prova i valori istantanei di temperatura del modulo, di irraggiamento globale sul piano orizzontale e di irraggiamento diffuso sono registrati manualmente.

Piranometro (LSI DPA253)	
Range di funzionamento	$< 2000 \text{ W/m}^2$
Range spettrale	305 – 2800 nm
Incertezza giornaliera realizzabile	$< 5\%$
Non linearità	$< 4\%$
Deriva termica	$< 1,2\%$

Tabella 6.2: caratteristiche dei piranometri

È necessario che tra una prova e l'altra le condizioni di irraggiamento e temperatura siano stazionarie, in modo che le dieci prove possano rappresentare dieci misure della stessa caratteristica voltamperometrica. Si è verificato che l'esecuzione di un ciclo di dieci prove richiede circa tre minuti e che, in tale intervallo di tempo, l'irraggiamento e temperatura del modulo restano sufficientemente stabili (variabilità inferiore al 5%), se non vi sono né nubi nella porzione di cielo occupata dal disco solare, né raffiche di vento.

In Tabella 6.3 vengono riportate, a titolo d'esempio, le dieci misure di irraggiamento e temperatura del modulo effettuate il giorno 01/07/2015 sul modulo A4.3. La durata totale delle dieci prove è di circa tre minuti, tempo nel quale, come si può notare, l'irraggiamento e la temperatura variano ben al di sotto del limite prefissato del 5%.

Modulo A4.3 01/07/15					
misura	ora della prova	G [W/m²]	err% @G	T [°C]	err% @T
1	12:30:50	900,76	0,52%	59,5	1,38%
2	12:31:06	898,60	0,28%	59,5	1,38%
3	12:31:19	897,52	0,16%	59,8	0,87%
4	12:31:33	897,52	0,16%	59,7	1,04%
5	12:31:48	895,21	0,10%	59,8	0,87%
6	12:32:31	894,27	0,20%	61,3	1,60%
7	12:32:49	890,88	0,58%	61,3	1,60%
8	12:33:05	893,18	0,32%	60,2	0,20%
9	12:33:23	894,25	0,20%	60,8	0,79%
10	12:33:53	898,55	0,28%	61,3	1,60%
valor medio		896,08		60,32	

Tabella 6.3: scostamenti delle misure di temperatura e irraggiamento dal valor medio, per il modulo A4.3, durante le prove effettuate il giorno 01/07/15

Per ognuna delle dieci misure della curva I-V effettuate in ogni test si procede riducendo il rumore numerico che si ha per effetto della digitalizzazione. Infatti, poiché la risoluzione del network analyzer non è in grado di misurare variazioni di tensione inferiori a 100 mV, per ogni valore di tensione misurato corrispondono più valori di corrente. Pertanto i valori di corrente corrispondenti al medesimo valore di tensione misurato vengono mediati. La tensione viene invece calcolata sommando al valore misurato la caduta di tensione nei cavi dell'hardware di misura, che hanno una resistenza complessiva di 0,22 Ω:

$$V = V_{misurata} + 0,22 \cdot I \quad (\text{eq. 6.1})$$

Si hanno così a disposizione le coppie (V,I) di tensione-corrente, da cui può essere generata una curva caratteristica I-V per ognuna delle dieci misure.

In Figura 6.2 è mostrata la prima misura della caratteristica I-V effettuata sul modulo A4.3 il giorno 01/07/2015. Sulla curva è riportato il punto di massima potenza; inoltre, tratteggiate, sono presenti le curve limite, che esprimono i valori teorici di corrente di cortocircuito, tensione a vuoto e potenza massima calcolati riportando i valori di datasheet alle condizioni di misura².

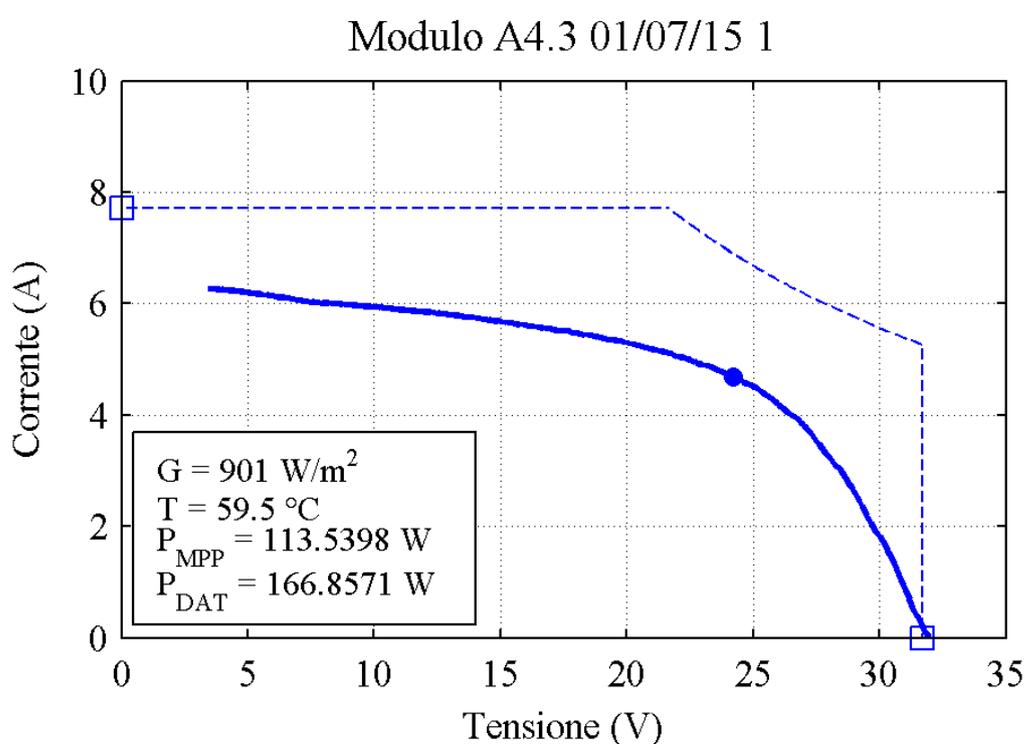


Figura 6.2: caratteristica I-V relativa alla prima prova effettuata sul modulo A4.3 il giorno 01/07/15

La curva P-V è ricavata dalla curva I-V moltiplicando, per ognuno dei punti, le ordinate per il corrispondente valore di ascissa. In Figura 6.3 è rappresentata la caratteristica P-V relativa alla prima misura effettuata sul modulo A4.3 il giorno 01/07/2015. Sono inoltre indicati il punto di massima potenza e, con linea tratteggiata, i valori di massima potenza e di tensione a vuoto, calcolati riportando i valori del datasheet alle condizioni di misura.

² Le equazioni per riportare le condizioni di datasheet alle condizioni di misura sono indicate nel paragrafo 6.3.1

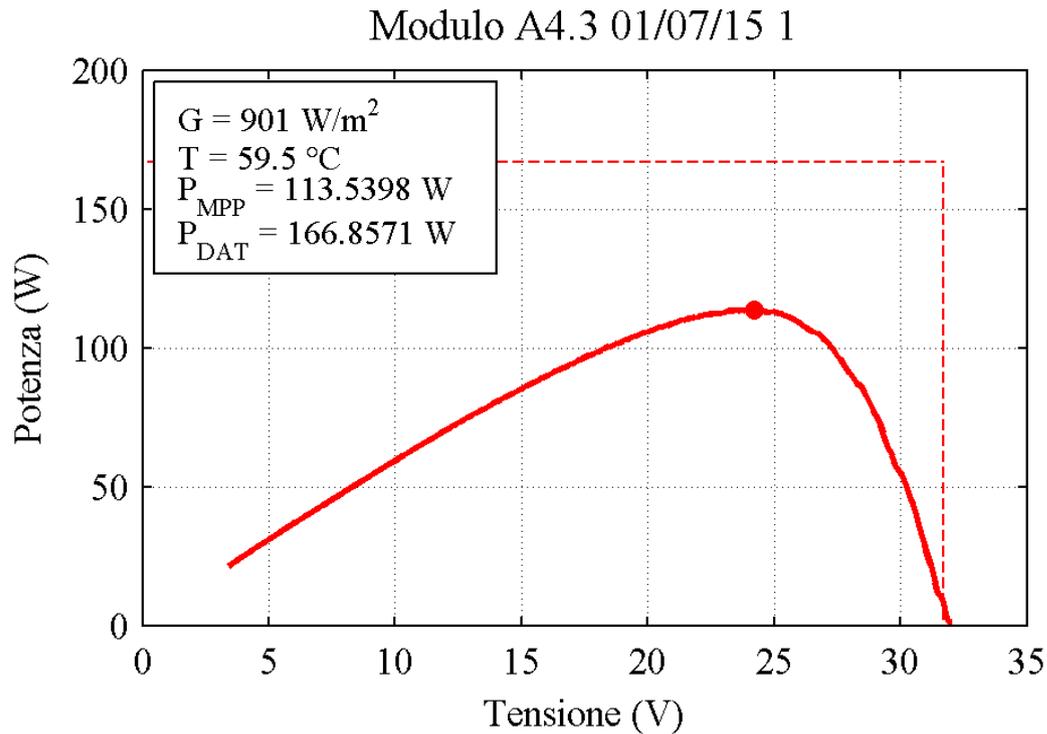


Figura 6.3: caratteristica P-V relativa alla prima prova effettuata sul modulo A4.3 il giorno 01/07/15

I test per la misura delle caratteristiche I-V dei moduli sono stati svolti in giorni diversi a partire dal mese di Aprile 2015, in modo tale da testare i moduli in diverse combinazioni di condizioni di irraggiamento e temperatura. A questo scopo, sono state svolte due campagne di misura:

- una campagna di misura in giorni diversi, con irraggiamento superiore a 500 W/m^2 ;
- una campagna di misura in diverse ore della stessa giornata, con irraggiamento variabile.

6.2 Elaborazione dei dati e generazione delle caratteristiche I-V e P-V medie

I dati raccolti nelle dieci misurazioni della curva caratteristica I-V di ogni modulo devono essere elaborati al fine di costruire le curve caratteristiche medie, da cui si possono ricavare i valori di corrente di cortocircuito I_{sc} , tensione a vuoto V_{oc} e massima potenza P_{mpp} nelle diverse condizioni di irraggiamento e temperatura.

L'elaborazione dei dati è stata svolta attraverso opportuni codici e funzioni del software Matlab e si può riassumere sostanzialmente in due punti:

- elaborazione delle misure elettriche per ridurre l'incertezza di misura e generare le curve I-V e P-V medie;
- elaborazione delle misure di irraggiamento globale sul piano orizzontale e di irraggiamento diffuso per calcolare l'irraggiamento globale sul piano dei moduli.

6.2.1 Elaborazione delle misure elettriche e generazione delle curve I-V e P-V medie

I dati misurati nelle dieci prove vengono mediati, riducendo così l'incertezza di misura che si avrebbe considerando singolarmente ciascuna prova. Per far questo è stato necessario generare tramite il software Matlab un vettore di tensione media e calcolare il vettore corrispondente di corrente media. Il vettore di tensione media è stato definito in egual modo per ognuna delle dieci prove, con estremi 0 V e 40 V e con un passo di 0,05 V. Per ciascun valore del vettore di tensione media è stato calcolato in ogni prova il corrispondente valore di corrente, ottenuto tramite interpolazione di due valori misurati di corrente. Si hanno così a disposizione per ogni prova un vettore di tensione media e uno di corrente. I valori del vettore di corrente media sono ottenuti come media dei valori dei vettori di corrente calcolati nelle dieci prove e corrispondenti al medesimo valore di tensione. Dai valori del vettore di tensione media e del vettore di corrente media è possibile generare le coppie di punti che definiscono la curva caratteristica I-V media. Le curve caratteristiche medie I-V e P-V così ottenute rappresentano il funzionamento in condizioni reali dei moduli affetti da snail trails e costituiscono uno strumento importante per analizzare la riduzione delle prestazioni in termini di diminuzione del punto di massima potenza e quindi di energia elettrica prodotta. Esse fanno riferimento ad un

irraggiamento medio e ad una temperatura media, calcolati come medie dei valori di irraggiamento e temperatura misurati nelle dieci prove.

In Figura 6.4 sono mostrate le curve caratteristiche I-V e P-V medie relative al modulo A4.3, ricavate dalle dieci misure effettuate il giorno 1 Luglio 2015.

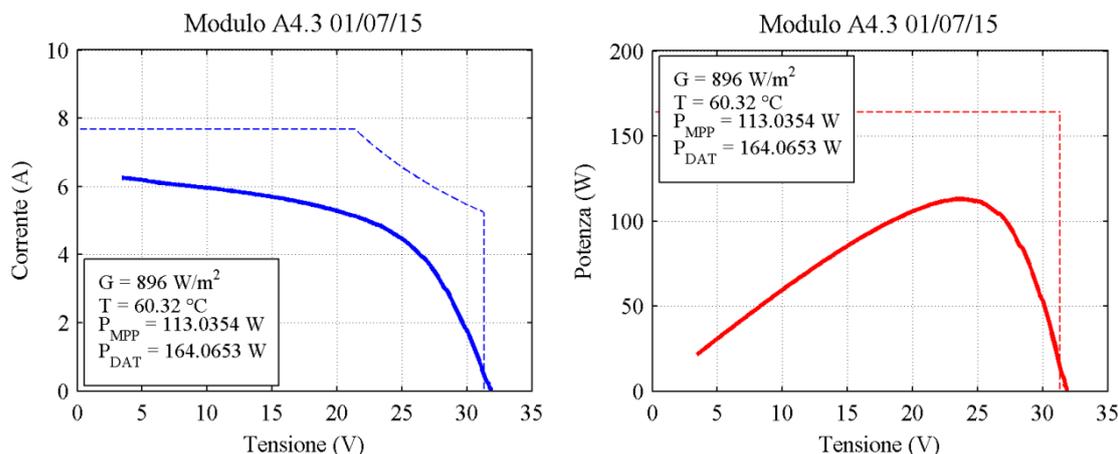


Figura 6.4: caratteristiche medie I-V (a sinistra) e P-V (a destra), relative al modulo A4.3, nel giorno 01/07/15

6.2.2 Calcolo dell'irraggiamento globale sul piano dei moduli

Per il calcolo dell'irraggiamento globale incidente sui moduli (16) è necessario stabilire innanzitutto la posizione del sole, in termini di altezza solare α_s e di angolo azimutale solare γ_s , a partire da:

- data e ora solare locale;
- coordinate geografiche del sito (latitudine e longitudine);
- presenza o meno dell'ora legale.

Le coordinate a cui si trova il laboratorio Solar Tech sono latitudine 45.502941°N e longitudine 9.156577°E.

Per l'Italia il fuso è di +1 h. Per tutta la zona del fuso l'ora locale (CT) rimane costante, mentre l'ora solare locale (ST) varia, poiché il fuso copre più gradi di longitudine. Nei calcoli di geometria solare si utilizza l'ora solare locale, che viene calcolata partendo dall'ora del fuso:

$$ST = (CT - 1) + [4 \cdot (L_{ref} - L) + E] / 60 \quad (\text{eq. 6.2})$$

dove L_{ref} è il meridiano di riferimento utilizzato per il fuso orario considerato, mentre L è la longitudine del luogo di cui si vuole calcolare l'ora solare. L_{ref} si calcola come:

$$L_{ref} = 15^\circ \cdot (CT - GMT) \quad (\text{eq. 6.3})$$

dove GMT è l'ora della zona di Greenwich.

In eq.6.2 il fattore 4 è dovuto al fatto che la terra impiega 4 minuti per ruotare di un grado, ovvero il tempo impiegato dal sole per coprire un grado di longitudine. L'ora locale CT è stata corretta, poiché le misure sono state effettuate al laboratorio nel periodo tra Aprile e Settembre, durante il quale è in vigore l'ora legale. Si è fatto poi uso dell'equazione del tempo E , la cui formulazione è la seguente:

$$E = 229,2 \cdot \begin{pmatrix} 0,000075 + \\ 0,001868 \cdot \cos(B) + \\ -0,03277 \cdot \sin(B) + \\ -0,014615 \cdot \cos(2B) + \\ -0,04080 \cdot \sin(2B) \end{pmatrix} \quad (\text{eq. 6.4})$$

dove $B = (n_{day} - 1) \cdot \frac{360}{365}$ con $n_{day} = 1, \dots, 365$ che indica il giorno n-esimo dell'anno

L'equazione del tempo tiene conto del fatto che il giorno solare non ha una durata costante durante l'anno, a causa dell'eccentricità dell'orbita della Terra e dell'inclinazione del suo asse (16). L'ora solare locale ST è stata così ricavata, partendo dall'ora locale del fuso CT , utilizzando due correzioni: una espressa dall'equazione del tempo e una riguardante la variazione dell'ora solare locale ST all'interno del fuso.

Dall'ora solare locale si può ricavare l'angolo orario ω , che è l'angolo compreso tra il meridiano locale e il meridiano 'contenente' il sole, cioè quello passante per quel punto sulla superficie della Terra dove il sole è perpendicolare a mezzogiorno ($\alpha_s = 90^\circ$). L'angolo orario ω varia da -180° , al mattino, a $+180^\circ$, la sera, e assume il valore 0° a mezzogiorno; si può notare come ω vari di 15° ogni ora. L'espressione dell'angolo orario ω è la seguente:

$$\omega = 15^\circ \cdot (ST - 12) \quad (\text{eq. 6.5})$$

Prima di poter stabilire la posizione del sole, è necessario calcolare l'angolo di declinazione δ , che è definito come la posizione angolare del sole al mezzogiorno solare, rispetto al piano dell'equatore. L'angolo di declinazione δ varia da $-\varepsilon$ a $+\varepsilon$, dove ε è l'inclinazione dell'asse terrestre e vale $23,45^\circ$. Il valore di δ è espresso dalla formula approssimata di Cooper:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n_{day}}{365}\right) \quad (\text{eq. 6.6})$$

Si può quindi calcolare dalle relazioni di geometria solare (17) l'altezza solare α_s :

$$\alpha_s = \arcsin(\sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (\text{eq. 6.7})$$

dove ϕ indica la latitudine.

L'angolo azimutale solare γ_s è dato da:

$$\gamma_s = \arcsin\left(\cos(\delta) \cdot \frac{\sin(\omega)}{\cos(\alpha_s)}\right) \quad (\text{eq. 6.8})$$

γ_s assume per convenzione il valore di 0° a Sud, cresce positivamente verso ovest e può variare da -180° a $+180^\circ$.

Stabilita la posizione del sole, si procede al calcolo dell'irraggiamento globale sul piano dei moduli, avendo a disposizione i valori di irraggiamento diffuso e di irraggiamento globale sul piano orizzontale.

I moduli sono orientati secondo un angolo azimutale $\gamma = -6,5^\circ$, e sono inclinati secondo un angolo di tilt $\beta = 30^\circ$.

Per il calcolo dell'irraggiamento globale incidente sul piano dei moduli si utilizza la seguente metodologia. In uno spazio riferito ad una terna sinistrorsa $[x,y,z]$, si definiscono:

- il versore 'sun', che indica la direzione da cui provengono i raggi del sole
- il versore 'n', che rappresenta la normale uscente dal piano del modulo
- il versore 'z', che rappresenta la normale uscente dal piano di misura del piranometro che misura l'irraggiamento globale, cioè al piano orizzontale.

I tre versori, in coordinate cartesiane, sono:

$$sun = (\cos(\alpha_s) \cdot \cos(\gamma_s), \cos(\alpha_s) \cdot \sin(\gamma_s), \sin(\alpha_s)) \quad (\text{eq. 6.9})$$

$$n = (\sin(\beta) \cdot \cos(\gamma), \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma), \cos(\beta)) \quad (\text{eq. 6.10})$$

$$z = (0, 0, 1) \quad (\text{eq. 6.11})$$

In Figura 6.5 sono mostrati i tre vettori e gli angoli caratteristici necessari per determinare la posizione solare.

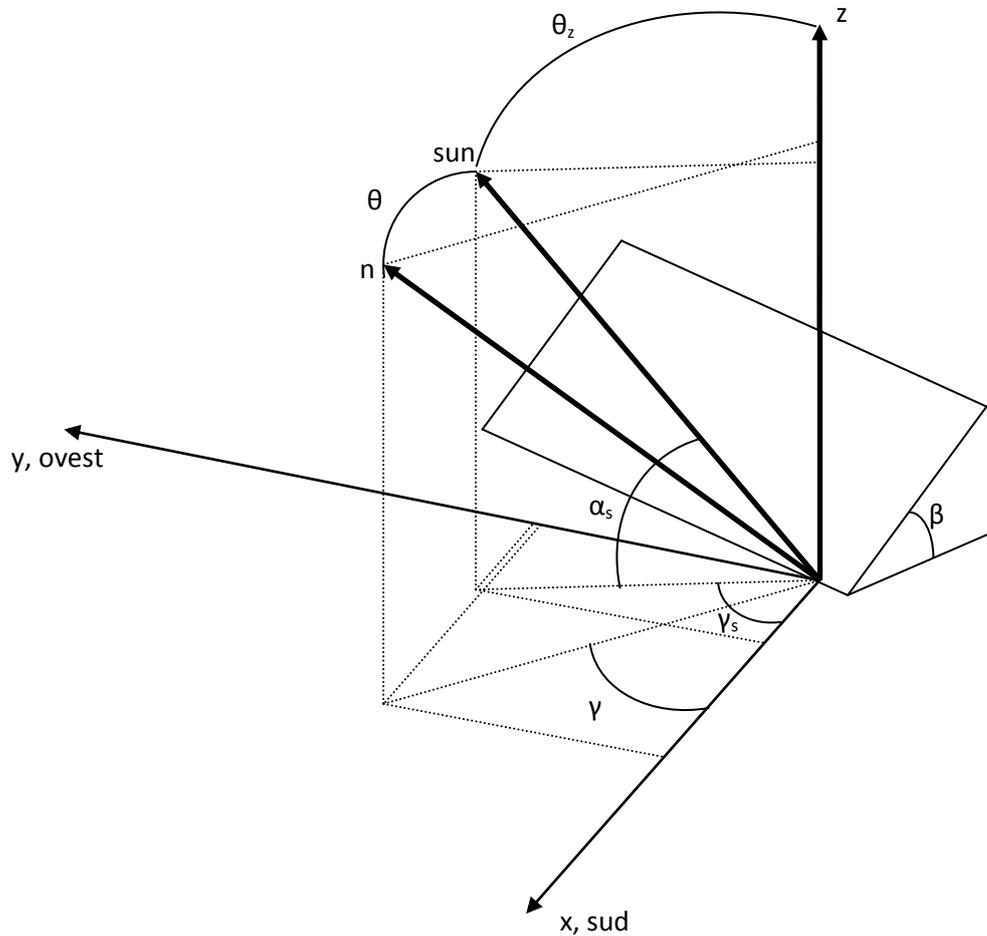


Figura 6.5: angoli caratteristici per determinare la posizione del sole

L'irraggiamento diretto è calcolato, a partire dalle misure, come:

$$G_{dir} = (G_{tot,PO} - G_{dif}) / \cos(\theta_z) \quad (\text{eq. 6.12})$$

dove:

- $G_{tot,PO}$ è l'irraggiamento globale sul piano orizzontale;
- G_{dif} è l'irraggiamento diffuso;
- θ_z è l'angolo compreso tra la direzione del sole, identificata dal vettore 'sun' e la direzione del piano di misura, indicata dal vettore 'z'.

L'angolo θ_z è calcolato, a partire dal suo coseno, definito dal seguente prodotto scalare:

$$\cos(\theta_z) = \text{sun} \cdot \mathbf{z} \quad (\text{eq. 6.13})$$

L'irraggiamento globale che raggiunge le celle è ottenuto combinando le componenti diretta e diffusa sul piano del modulo, moltiplicate rispettivamente per la trasmittanza del vetro riferita angolo di incidenza della radiazione diretta (θ) e per la trasmittanza del vetro riferita all'angolo medio di incidenza della radiazione isotropa (θ_{iso}). Generalmente si esprime l'irraggiamento globale in termini di incidence angle modifier per la radiazione diretta (K_{dir}) e diffusa (K_{dif}) e di trasmittanza del vetro in condizioni incidenza normale (τ_0). Gli incidence angle modifier sono definiti come:

$$K_{dir} = \frac{\tau(\theta)}{\tau_0} \quad (\text{eq. 6.14})$$

$$K_{dif} = \frac{\tau(\theta_{iso})}{\tau_0} \quad (\text{eq. 6.15})$$

L'angolo di incidenza dell'irraggiamento diretto sul piano del modulo θ è calcolato, a partire dal suo coseno, definito dal seguente prodotto scalare:

$$\cos(\theta) = \text{sun} \cdot \mathbf{n} \quad (\text{eq. 6.16})$$

L'irraggiamento globale che raggiunge la cella è:

$$G = \tau_0 \cdot \left(G_{dir} \cdot K_{dir} \cdot \cos(\theta) + G_{dif} \cdot K_{dif} \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (\text{eq. 6.17})$$

Nell'eq. 6.17 è stato omissso il termine di irraggiamento riflesso dal terreno in quanto si è verificato sperimentalmente che questo contributo, presso il SolarTechLab è trascurabile (17) in quanto la riflettanza del grigliato metallico che forma il pavimento è ridotta ed il fattore di vista per questa componente dell'irraggiamento è ridotto.

L'incidence angle modifier per la componente diffusa K_{dif} è stato ragionevolmente approssimato al valore unitario. L'incidence angle modifier per la componente diretta K_{dir} è calcolato come segue.

La trasmittanza del vetro in condizioni di incidenza normale è definita da:

$$\tau_0 = e^{-k \cdot L} \cdot \left[1 - \left(\frac{n_{glass} - 1}{n_{glass} + 1} \right)^2 \right] \quad (\text{eq. 6.18})$$

dove k è il fattore di estinzione del vetro, L lo spessore del vetro, n_{glass} il fattore di rifrazione del vetro.

La trasmittanza del vetro (τ) ad un generico angolo di incidenza θ è data da:

$$\tau(\theta) = e^{\frac{-k \cdot L}{\cos(\theta_r)}} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right) \right] \quad (\text{eq. 6.19})$$

θ_r rappresenta l'angolo di rifrazione rispetto alla normale alla superficie. Esso è legato all'angolo di incidenza θ dalla legge di Snell (16):

$$\sin(\theta_r) = \frac{n_{air}}{n_{glass}} \cdot \sin(\theta) \quad (\text{eq. 6.20})$$

Nelle eq.6.18 e eq.6.19 sono stati utilizzati valori tipici di k , L e n_{glass} per poter determinare K_{dir} .

6.3 Confronto con i valori di riferimento

Le curve I-V e P-V medie misurate rappresentano il funzionamento in condizioni reali dei moduli affetti da snail trails. Per capire quanto tale difetto condizioni le prestazioni dei moduli è necessario effettuare un confronto con dei valori di riferimento. Un primo riferimento è generato a partire dai valori forniti nel datasheet del costruttore, che permettono di individuare le prestazioni attese in determinate condizioni di irraggiamento e temperatura. Un secondo riferimento è costituito da un modello a cinque parametri, che permette di generare una curva teorica che rappresenti il funzionamento atteso. Le eventuali analogie, emerse dal confronto con i valori di riferimento ottenuti dai due approcci, costituiscono una base importante per la valutazione delle prestazioni dei moduli.

6.3.1 Valori di riferimento da datasheet

Al fine di avere un confronto con il funzionamento atteso dei moduli, a partire dal datasheet vengono ricavati i valori di corrente di cortocircuito, tensione a vuoto e potenza massima nelle condizioni reali di funzionamento.

Essendo oggetto del presente lavoro lo studio di come il difetto delle snail trails si rifletta sulle caratteristiche elettriche del modulo, non è possibile riportare i dati misurati sui

moduli affetti da snail trails alle Standard Test Conditions³ (STC), in quanto non è noto come i coefficienti di temperatura per il riporto della V_{oc} , I_{sc} e P_{mpp} siano influenzati dalla presenza di tale difetto. Pertanto, avendo a disposizione i coefficienti di temperatura riferiti al funzionamento del modulo in condizioni sane, si è scelto di riportare i valori forniti nel datasheet dalle STC alle condizioni di prova e non viceversa.

I valori di datasheet sono riportati alle condizioni reali di funzionamento secondo le seguenti relazioni che dipendono dall'irraggiamento effettivo G incidente sulla cella, dalla temperatura di cella T_c e dai coefficienti di temperatura α , β e γ (17):

$$I_{sc, testcondition} = \frac{G}{G_{STC}} \cdot I_{sc, STC} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_c - T_{c, STC})) \quad (\text{eq. 6.21})$$

$$V_{oc, testcondition} = V_{oc, STC} \cdot (1 + \beta \cdot (T_c - T_{c, STC})) + A \cdot \ln\left(\frac{G}{G_{STC}}\right) \quad (\text{eq. 6.22})$$

$$P_{mpp, testcondition} = \eta_{rel}(G) \cdot \frac{G}{G_{STC}} \cdot P_{mpp, STC} \cdot (1 + \gamma \cdot (T_c - T_{c, STC})) \quad (\text{eq. 6.23})$$

I dati principali forniti dal datasheet dei moduli oggetto d'analisi sono sinteticamente riportati in Tabella 6.4 e Tabella 6.5. Nell'allegato 1 è riportato il datasheet completo dei moduli.

Helios NA220W-P	
V_{oc} [V]	35,72
I_{sc} [A]	8,32
V_{mpp} [V]	28,7
I_{mpp} [A]	7,67
P_{mpp} [W]	220

Tabella 6.4: valori di datasheet del modulo Helios NA220W-P, riferiti alle STC

Coefficienti di temperatura	
$\alpha(@I_{sc})$ [K^{-1}]	0,000822
$\beta(@V_{oc})$ [K^{-1}]	-0,003277
$\gamma(@P_{mpp})$ [K^{-1}]	-0,004594

Tabella 6.5: coefficienti di temperatura del modulo Helios NA220W-P

³ STC: Irraggiamento 1000 W/m², Temperatura di cella 25°C, AM 1,5.

In eq.6.22 A è il prodotto tra il numero di celle (N), il fattore di idealità del diodo (n) e il potenziale termico (V_t). I moduli oggetto d'analisi sono composti da 60 celle in serie. Il fattore di idealità del diodo, il cui valore non è specificato nel datasheet, è stato ricavato tramite il modello a cinque parametri⁴ e vale 1,401. Il potenziale termico è definito da:

$$V_t = \frac{K \cdot T_c}{q} \quad (\text{eq. 6.24})$$

dove K è la costante di Boltzmann e vale $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, T_c è la temperatura di cella, q è la carica dell' elettrone e vale $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

In eq.6.23 $\eta_{rel}(G)$ è rappresenta l'efficienza relativa del modulo che tiene conto della riduzione dell'efficienza della cella al diminuire dell'irraggiamento incidente. Essa è definita come rapporto tra l'efficienza della cella ad una certo valore di irraggiamento ($\eta(G)$) e l'efficienza in condizioni standard (η_{STC}).

$$\eta_{rel}(G) = \frac{\eta(G)}{\eta_{STC}} \quad (\text{eq. 6.25})$$

Nel datasheet non è riportata la riduzione dell'efficienza con l'irraggiamento (tipicamente espressa al valore di irraggiamento di 200 W/m^2). Inoltre, non è possibile determinare sperimentalmente l'efficienza reale della cella ad una certo valore di irraggiamento, in quanto la potenza prodotta è fortemente influenzata dalla presenza delle snail trails. È stata pertanto caratterizzata la funzione $\eta_{rel}(G)$, a partire da valori dichiarati nel datasheet per moduli di diversi produttori, ma aventi la stessa tecnologia, la stessa potenza nominale e dello stesso anno di fabbricazione dei moduli affetti da snail trails. Si è scelto di rappresentare la funzione $\eta_{rel}(G)$ con una funzione lineare crescente con l'irraggiamento. Essa è calibrata affinché assuma il valore 0,945 con irraggiamento di 200 W/m^2 ed il valore unitario con irraggiamento di 1000 W/m^2 .

6.3.2 Modello a cinque parametri

Le curve caratteristiche medie dei quattro moduli vengono confrontate con una curva teorica di riferimento, ricavata secondo un modello a cinque parametri, per avere una stima

⁴ Si veda il capitolo 6.3.2

sul valore atteso di potenza dei moduli. Inoltre, dai valori di potenza, corrente di cortocircuito e tensione a vuoto ricavati dal modello, si può osservare se ci siano analogie con quanto dichiarato nel datasheet.

Il modello a cinque parametri è stato sviluppato in riferimento ad una cella e successivamente è stato esteso al modulo composto da 60 celle in serie (17), (18). Il circuito equivalente a cinque parametri del modulo è costituito da un generatore ideale di corrente $I_{pv}(G, T)$, da un diodo e da due resistenze, R_s e $R_{sh}(G)$, collegati come in Figura 6.6.

Sono state indicate le dipendenze dei parametri circuitali in funzione della temperatura e dell'irraggiamento.

La resistenza R_s è collegata in serie ai terminali della cella e rappresenta l'insieme delle componenti della cella che hanno comportamento ohmico, come il contatto della base di metallo con lo strato p del semiconduttore, il contatto dello strato n con la griglia metallica, i fingers stessi ed i busbar (19).

La resistenza $R_{sh}(G)$ è collegata in parallelo al generatore di corrente e modella le perdite di ricombinazione tra elettrone e lacuna prima che la carica giunga agli elettrodi (19).

Il generatore di corrente $I_{pv}(G, T)$ modella la corrente fotogenerata all'interno della cella, mentre il diodo modella il comportamento della giunzione P-N.

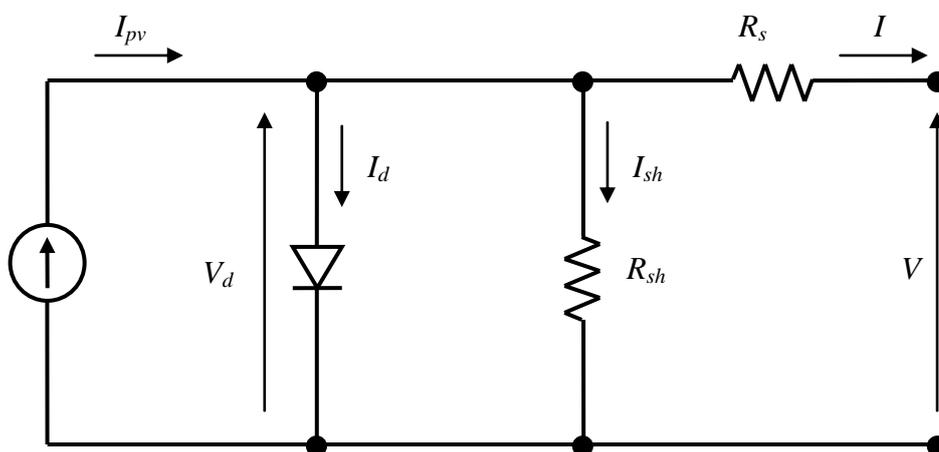


Figura 6.6: circuito elettrico equivalente di una cella fotovoltaica, secondo un modello a cinque parametri

In Figura 6.6:

- I_{pv} è la corrente generata nella cella;
- I_d è la corrente di diodo;
- V_d è la tensione di diodo;
- R_s è la resistenza serie;
- R_{sh} è la resistenza di shunt;
- I_{sh} è la corrente di shunt;
- I e V sono la corrente e la tensione ai terminali della cella.

La corrente circolante nel diodo è espressa dall'equazione di Shockley (17):

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V+R_s \cdot I}{N \cdot n \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (\text{eq. 6.26})$$

dove I_0 è la corrente di saturazione inversa del diodo, n il fattore di idealità del diodo, N il numero di celle, V_t il potenziale termico.

La funzione implicita che lega la tensione alla corrente di porta nel modello a cinque parametri è la seguente:

$$I = I_{pv} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V+R_s \cdot I}{N \cdot n \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{eq. 6.27})$$

I parametri nell'eq. 6.27 sono I_{pv} , I_0 , n , R_{sh} e R_s , pertanto occorrono cinque equazioni indipendenti (18) per determinarli.

La relazione espressa dall'eq.6.27 è valutata in tre punti caratteristici:

- funzionamento in cortocircuito ($0, I_{sc}$);
- funzionamento a vuoto ($V_{oc}, 0$);
- funzionamento nel punto di potenza massima (V_{mpp}, I_{mpp}).

Le tre equazioni che si ottengono sono riportate nelle relazioni eq.6.28, eq.6.29 ed eq.6.30.

$$I_{sc} = I_{pv} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{R_s \cdot I_{sc}}{N \cdot n \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{R_s \cdot I_{sc}}{R_{sh}} \quad (\text{eq. 6.28})$$

$$0 = I_{pv} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{oc}}{N \cdot n \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (\text{eq. 6.29})$$

$$I_{mpp} = I_{pv} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{mpp} + R_s \cdot I_{mpp}}{N \cdot n \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp} + R_s \cdot I_{mpp}}{R_{sh}} \quad (\text{eq. 6.30})$$

Una quarta equazione, che incide soprattutto nella determinazione di R_s , è ottenuta imponendo che il punto di massima potenza sia un punto stazionario, ovvero fissando a zero la derivata parziale della potenza rispetto alla tensione, nel punto di massima potenza (eq.6.31).

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_{mpp} = 0 \quad (\text{eq. 6.31})$$

Infine, come quinta equazione viene considerata la pendenza iniziale (ovvero nell'intorno del punto di funzionamento in cortocircuito) della curva I-V e si assume che questa dipenda unicamente dalla resistenza di shunt, come espresso nella eq.6.32:

$$\left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{sc} = -\frac{1}{R_{sh}} \quad (\text{eq. 6.32})$$

Il sistema di cinque equazioni, dalla eq.6.28 alla eq.6.32, viene risolto utilizzando i valori di V_{oc} , I_{sc} , V_{mpp} e I_{mpp} alle STC, forniti dal datasheet, ricavando così i valori dei cinque parametri che caratterizzano il modello.

I valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.6.

Parametri del modello valutati alle STC	
$I_{pv,ref}$ [A]	8,3225
$I_{0,ref}$ [A]	$5,4017 \cdot 10^{-7}$
n_{ref}	1,401
$R_{s,ref}$ [Ω]	0,178
$R_{sh,ref}$ [Ω]	598,723

Tabella 6.6: valori dei parametri del modello valutati alle Standard Test Conditions

La variazione dei parametri elettrici del modello con l'irraggiamento e la temperatura di cella è effettuata in accordo con la teoria di De Soto (18), che suggerisce di mantenere invariati i valori del fattore di idealità del diodo (n) e della resistenza serie (R_s) al variare delle condizioni operative (eq.6.33 ed eq.6.34), mentre per i valori di I_{pv} , I_0 e R_{sh} la variazione segue opportune relazioni riportate in eq.6.35, eq.6.36 ed eq.6.37.

$$n = n_{ref} \quad (\text{eq. 6.33})$$

$$R_s = R_{s,ref} \quad (\text{eq. 6.34})$$

$$I_{pv} = \frac{G}{G_{STC}} \cdot \frac{M}{M_{ref}} \cdot \left[I_{pv,ref} \cdot \left(1 + \alpha \cdot (T_c - T_{c,STC}) \right) \right] \quad (\text{eq. 6.35})$$

$$I_0 = I_{0,ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c,STC}} \right)^3 \cdot e^{\left(\frac{E_{g,STC}}{n \cdot k \cdot T_{c,STC}} - \frac{E_g}{n \cdot k \cdot T_c} \right)} \quad (\text{eq. 6.36})$$

$$R_{sh} = R_{sh,ref} \cdot \frac{G_{STC}}{G} \quad (\text{eq. 6.37})$$

In eq.6.35 M è l'air mass modifier e tiene conto del fatto che al crescere dell'air mass (AM) il contenuto spettrale della radiazione incidente sul modulo cambia a causa dell'assorbimento selettivo da parte di alcune specie presenti nell'atmosfera e in molti casi questo ha un'incidenza sull'efficienza del modulo fotovoltaico (18). La relazione per la determinazione dell'air mass modifier è di tipo polinomiale ed è la seguente:

$$\frac{M}{M_{ref}} = \sum_{i=0}^4 a_i \cdot (AM)^i \quad (\text{eq. 6.38})$$

Dove M_{ref} è l'air mass modifier alle STC e vale 1, mentre a_i sono dei coefficienti determinati sperimentalmente e per il silicio policristallino valgono: $a_0 = 0,918093$, $a_1 = 0,086257$, $a_2 = -0,024459$, $a_3 = 0,002816$, $a_4 = -0,000126$. L'air mass può essere determinato in funzione dell'angolo zenitale θ_z :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0,5057 \cdot (96,080 - \theta_z)^{-1,634}} \quad (\text{eq. 6.39})$$

L'air mass modifier incide sia sulla componente diretta che sulla diffusa della radiazione. Combinando le equazioni eq.6.38 ed eq.6.39 si può esprimere la dipendenza dell'air mass modifier dall'angolo zenitale. La Figura 6.7 mostra l'andamento della curva $M - \theta_z$:

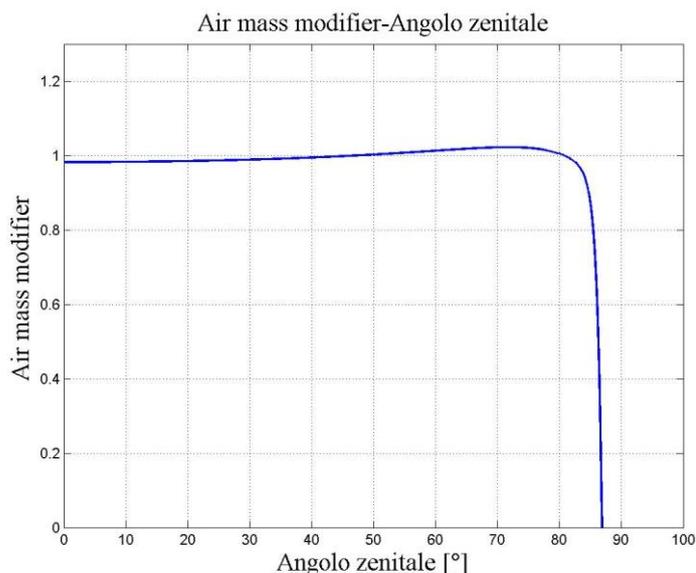


Figura 6.7: andamento dell'air mass modifier in funzione dell'angolo zenitale per un modulo al silicio policristallino

Come si può notare in Figura 6.7, l'air mass modifier ha un andamento simile ad un gradino e assume un valore molto prossimo a 1 per angoli zenitali inferiori agli 80°. Poiché le misure effettuate sui moduli con snail trails sono state effettuate in ore della giornata in cui gli angoli zenitali sono risultati inferiori agli 80° (nelle misure il valore massimo dell'angolo zenitale θ_z è di 68,7°), si può considerare trascurabile l'influenza dell'air mass modifier nella determinazione di I_{pv} .

In eq.6.36 k è la costante di Boltzmann espressa in eV/K e vale $8,617332 \cdot 10^{-5}$ eV/K, mentre E_g è l'energy gap del silicio, il cui valore dipende dalla temperatura di cella secondo la relazione seguente:

$$E_g = 1,17 - 4,73 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T_c^2}{T_c + 636} \quad (\text{eq. 6.40})$$

In Figura 6.8 è mostrato l'andamento dell'energy gap del silicio in funzione della temperatura di cella, in un intervallo di valori ragionevole per il normale funzionamento dei moduli.

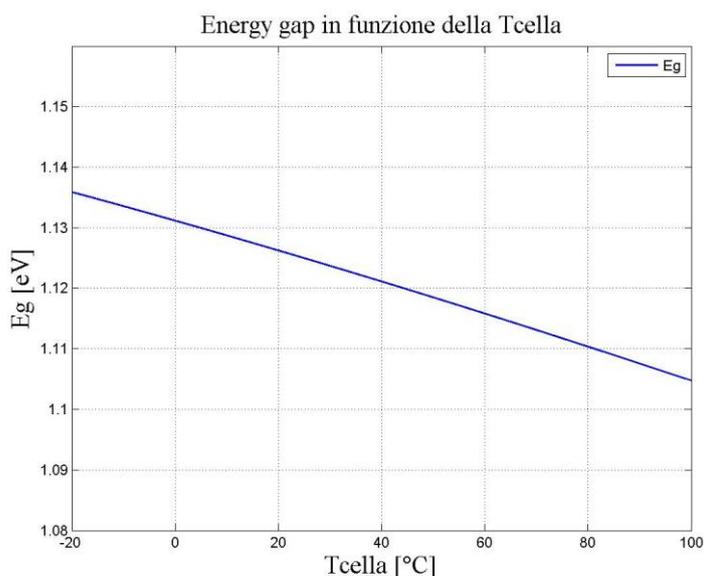


Figura 6.8: andamento dell'energy gap del silicio in funzione della temperatura di cella

6.4 Confronto tra valori misurati e valori di riferimento in giorni con irraggiamento superiore a 500 W/m^2

Utilizzando il metodo di misura descritto in sezione 6.1 sono stati ricavati i dati misurati riportati in Tabella 6.7, che fanno riferimento a giorni diversi con irraggiamento globale sul piano dei moduli superiore a 500 W/m^2 . La campagna di misure è stata effettuata in un periodo che va dal mese di Aprile fino al mese di Settembre 2015, ottenendo diverse combinazioni di condizioni ambientali e di irraggiamento.

Giorno	Modulo	G [W/m ²]	T [°C]	Dati misurati su snail trails			Datasheet in condizioni di test			Modello 5 parametri		
				Isc [A]	Voc [V]	Pmpp [W]	Isc [A]	Voc [V]	Pmpp [W]	Isc [A]	Voc [V]	Pmpp [W]
09/04/15	A4.1	972,42	54,40	7,82	32,85	151,42	8,29	32,21	184,80	8,29	31,45	183,18
	A4.2	961,28	52,50	7,09	33,05	135,82	8,18	32,41	184,38	8,18	31,70	182,99
	A4.3	957,85	54,20	6,36	33,05	119,96	8,16	32,20	182,04	8,16	31,45	180,53
	A4.4	948,85	54,60	6,55	32,95	116,47	8,09	32,13	179,83	8,09	31,36	178,34
04/06/15	A4.1	608,48	48,61	4,78	31,95	95,72	5,16	31,80	116,20	5,16	31,19	115,71
	A4.2	599,39	52,74	4,64	32,10	91,00	5,10	31,26	111,96	5,10	30,55	111,11
	A4.3	574,76	51,57	4,00	32,40	77,47	4,89	31,31	107,83	4,89	30,62	107,01
	A4.4	573,80	51,00	4,26	32,40	79,82	4,88	31,37	107,96	4,88	30,70	107,19

11/06/15	A4.1	882,59	56,19	6,98	32,10	132,41	7,53	31,77	165,10	7,53	30,96	163,80
	A4.2	893,35	51,44	6,63	33,50	128,24	7,59	32,36	171,50	7,59	31,68	170,55
	A4.3	891,47	54,61	6,15	32,95	114,59	7,60	31,98	168,28	7,60	31,22	167,07
	A4.4	869,44	56,15	6,34	32,75	116,53	7,42	31,74	162,53	7,42	30,93	161,28
01/07/15	A4.1	886,00	58,15	7,15	31,75	136,66	7,57	31,55	164,04	7,57	30,69	162,55
	A4.2	894,86	61,76	6,87	31,75	125,54	7,67	31,15	162,54	7,67	30,19	160,69
	A4.3	896,08	60,32	6,25	31,95	113,04	7,67	31,32	164,07	7,67	30,40	162,34
	A4.4	900,11	61,97	6,63	32,00	118,15	7,72	31,14	163,36	7,72	30,17	161,47
16/07/15	A4.1	859,14	54,75	7,00	31,85	133,90	7,32	31,88	161,69	7,32	31,11	160,60
	A4.2	865,53	58,11	6,69	31,75	123,98	7,40	31,50	160,05	7,40	30,64	158,64
	A4.3	848,92	58,30	6,00	32,10	109,88	7,26	31,43	156,64	7,26	30,56	155,27
	A4.4	877,85	59,35	6,64	32,20	119,17	7,51	31,39	161,38	7,51	30,49	159,82
09/09/15 ore 13:10	A4.1	943,83	50,55	7,43	32,10	147,66	8,02	32,59	182,67	8,02	31,94	181,54
	A4.2	928,11	51,33	7,00	32,35	137,38	7,89	32,46	178,70	7,89	31,79	177,60
	A4.3	937,34	51,39	6,57	32,30	126,24	7,97	32,48	180,54	7,97	31,80	179,38
	A4.4	955,12	54,59	7,04	32,10	130,26	8,14	32,15	181,11	8,14	31,38	179,58

Tabella 6.7: misure effettuate sui moduli affetti da snail trails e valori teorici ricavati dal datasheet e dal modello a cinque parametri, in giorni differenti con elevato irraggiamento

La Tabella 6.7 riporta i dati di corrente di cortocircuito I_{sc} , tensione a vuoto V_{oc} e punto di massima potenza P_{mpp} misurati sui moduli affetti da snail trails, i valori di riferimento ottenuti dal datasheet e riportati alle condizioni reali di funzionamento e i valori di riferimento ricavati dal modello a cinque parametri. Per il modello a cinque parametri i valori di corrente di cortocircuito I_{sc} , tensione a vuoto V_{oc} e punto di massima potenza P_{mpp} sono stati ricavati direttamente dalle curve caratteristiche I-V e P-V, generate secondo il modello stesso.

In Tabella 6.8 viene riportato il confronto tra i valori misurati e i valori attesi, in termini di scostamenti relativi dal valore di riferimento (*ref*). Essi sono definiti come segue:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P_{mpp,ref} - P_{mpp,misurata}}{P_{mpp,ref}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 6.41})$$

$$\frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} = \frac{V_{oc,ref} - V_{oc,misurata}}{V_{oc,ref}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 6.42})$$

$$\frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} = \frac{I_{sc,ref} - I_{sc,misurata}}{I_{sc,ref}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 6.43})$$

Giorno	Modulo	G [W/m ²]	T [°C]	Dati misurati su snail trails			Confronto con datasheet			Confronto con 5 parametri		
				Isc [A]	Voc [V]	Pmpp [W]	$\frac{\Delta P}{P}$	$\frac{\Delta Voc}{Voc}$	$\frac{\Delta Isc}{Isc}$	$\frac{\Delta P}{P}$	$\frac{\Delta Voc}{Voc}$	$\frac{\Delta Isc}{Isc}$
09/04/15	A4.1	972,42	54,40	7,82	32,85	151,42	18,06%	-1,98%	5,63%	17,34%	-4,45%	5,63%
	A4.2	961,28	52,50	7,09	33,05	135,82	26,34%	-1,98%	13,37%	25,78%	-4,26%	13,37%
	A4.3	957,85	54,20	6,36	33,05	119,96	34,10%	-2,64%	22,03%	33,55%	-5,10%	22,03%
	A4.4	948,85	54,60	6,55	32,95	116,47	35,24%	-2,55%	19,04%	34,69%	-5,06%	19,04%
04/06/15	A4.1	608,48	48,61	4,78	31,95	95,72	17,63%	-0,48%	7,44%	17,27%	-2,42%	7,45%
	A4.2	599,39	52,74	4,64	32,10	91,00	18,72%	-2,67%	8,96%	18,10%	-5,07%	8,98%
	A4.3	574,76	51,57	4,00	32,40	77,47	28,16%	-3,49%	18,10%	27,61%	-5,80%	18,11%
	A4.4	573,80	51,00	4,26	32,40	79,82	26,07%	-3,27%	12,61%	25,53%	-5,52%	12,62%
11/06/15	A4.1	882,59	56,19	6,98	32,10	132,41	19,80%	-1,03%	7,39%	19,16%	-3,67%	7,39%
	A4.2	893,35	51,44	6,63	33,50	128,24	25,23%	-3,52%	12,66%	24,81%	-5,75%	12,67%
	A4.3	891,47	54,61	6,15	32,95	114,59	31,90%	-3,03%	19,02%	31,41%	-5,56%	19,02%
	A4.4	869,44	56,15	6,34	32,75	116,53	28,30%	-3,18%	14,54%	27,75%	-5,87%	14,55%
01/07/15	A4.1	886,00	58,15	7,15	31,75	136,66	16,69%	-0,64%	5,60%	15,93%	-3,47%	5,60%
	A4.2	894,86	61,76	6,87	31,75	125,54	22,76%	-1,93%	10,47%	21,87%	-5,18%	10,48%
	A4.3	896,08	60,32	6,25	31,95	113,04	31,10%	-2,01%	18,49%	30,37%	-5,10%	18,50%
	A4.4	900,11	61,97	6,63	32,00	118,15	27,68%	-2,77%	14,07%	26,83%	-6,07%	14,08%
16/07/15	A4.1	859,14	54,75	7,00	31,85	133,90	17,19%	0,09%	4,46%	16,63%	-2,39%	4,47%
	A4.2	865,53	58,11	6,69	31,75	123,98	22,54%	-0,80%	9,55%	21,85%	-3,63%	9,56%
	A4.3	848,92	58,30	6,00	32,10	109,88	29,85%	-2,14%	17,27%	29,23%	-5,03%	17,27%
	A4.4	877,85	59,35	6,64	32,20	119,17	26,15%	-2,60%	11,62%	25,43%	-5,61%	11,62%
09/09/15 ore 13:10	A4.1	943,83	50,55	7,43	32,10	147,66	19,17%	1,51%	7,31%	18,66%	-0,51%	7,31%
	A4.2	928,11	51,33	7,00	32,35	137,38	23,12%	0,35%	11,31%	22,64%	-1,77%	11,31%
	A4.3	937,34	51,39	6,57	32,30	126,24	30,08%	0,55%	17,50%	29,62%	-1,57%	17,50%
	A4.4	955,12	54,59	7,04	32,10	130,26	28,07%	0,15%	13,54%	27,46%	-2,29%	13,55%

Tabella 6.8: confronto tra i dati misurati e i valori di riferimento ottenuti dal datasheet e dal modello a cinque parametri, in giorni differenti con elevato irraggiamento

Prima di analizzare i risultati mostrati in Tabella 6.8, è importante sottolineare che la riduzione di potenza generata dai moduli è imputabile per una quota parte all'invecchiamento, pari a circa il 4%, e per la restante parte all'unico difetto riscontrato su tali moduli, cioè le snail trails. Il datasheet indica una riduzione massima di potenza del 10% nei primi dieci anni di funzionamento, quindi, supponendo una riduzione lineare annua dell'1%, si ricava una riduzione massima per invecchiamento pari al 3,5%, essendo i moduli in produzione dall'inizio del 2012.

I due riferimenti con i quali sono stati effettuati i confronti con i valori misurati di corrente di cortocircuito, tensione a vuoto e punto di massima potenza, mostrano importanti analogie. Come si può notare in Tabella 6.8, vi è un'evidente riduzione del punto di

massima potenza dal valore di riferimento ed, insieme ad essa, è marcata anche la riduzione della corrente di cortocircuito, mentre la tensione a vuoto risulta quasi sempre poco superiore al valore di riferimento.

La riduzione di potenza dei quattro moduli affetti da snail trails calcolata secondo il datasheet è significativa e varia dal 16,69% per il modulo A4.1 al 35,24% per il modulo A4.4, mentre secondo i risultati ottenuti dal confronto con il modello a cinque parametri si attesta tra il 15,93% del modulo A4.1 e il 34,69% del modulo A4.4. Ciascun modulo presenta condizioni di funzionamento simili nei vari giorni, poiché le misure sono state effettuate all'incirca verso l'ora in cui si ha il picco di irraggiamento giornaliero, quindi tra le ore 12:00 e le ore 14:00, ad eccezione del giorno 4 Giugno; tuttavia i valori misurati differiscono da un modulo all'altro. Infatti la riduzione di potenza più rilevante si ha nei moduli A4.3 e A4.4, mentre i moduli A4.2 e soprattutto A4.1 presentano riduzioni di potenza più contenute, ma comunque sempre ben superiori a quanto atteso.

L'analisi visiva ed il test di elettroluminescenza⁵ mostrano chiaramente che i moduli A4.3 ed A4.4 sono caratterizzati da un maggior numero di celle affette da snail trails rispetto agli altri due moduli e questo certamente influisce sulla riduzione della potenza generabile da essi. Nelle tabelle Tabella 6.9 e Tabella 6.10 sono riassunti per ogni modulo i risultati ottenuti dal confronto tra la potenza misurata e quella teorica di riferimento ottenuta con i due approcci nei diversi giorni.

giorno	$\Delta P/P$ confronto con datasheet			
	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4
09/04/2015	18,06%	26,34%	34,10%	35,24%
04/06/2015	17,63%	18,72%	28,16%	26,07%
11/06/2015	19,80%	25,23%	31,90%	28,30%
01/07/2015	16,69%	22,76%	31,10%	27,68%
16/07/2015	17,19%	22,54%	29,85%	26,15%
09/09/2015	19,17%	23,12%	30,08%	28,07%

Tabella 6.9: riduzione della potenza dei moduli dal valore teorico di riferimento secondo i valori di datasheet nei diversi giorni

⁵ Si rimanda al capitolo 5

giorno	$\Delta P/P$ confronto con 5 parametri			
	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4
09/04/2015	17,34%	25,78%	33,55%	34,69%
04/06/2015	17,27%	18,10%	27,61%	25,53%
11/06/2015	19,16%	24,81%	31,41%	27,75%
01/07/2015	15,93%	21,87%	30,37%	26,83%
16/07/2015	16,63%	21,85%	29,23%	25,43%
09/09/2015	18,66%	22,64%	29,62%	27,46%

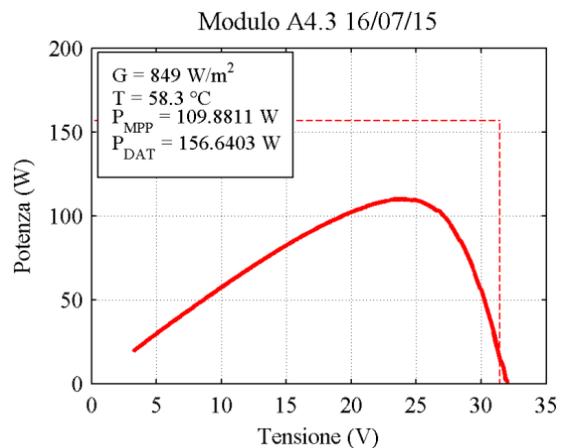
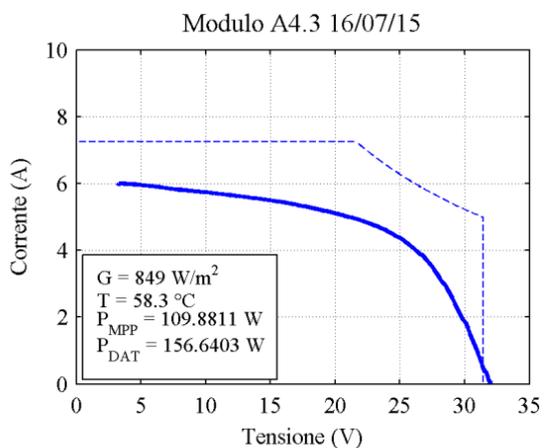
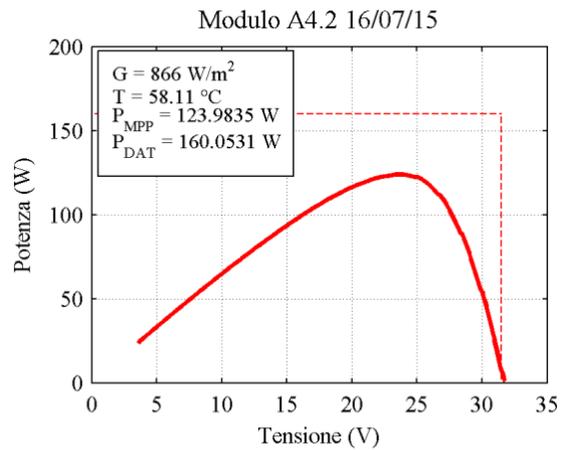
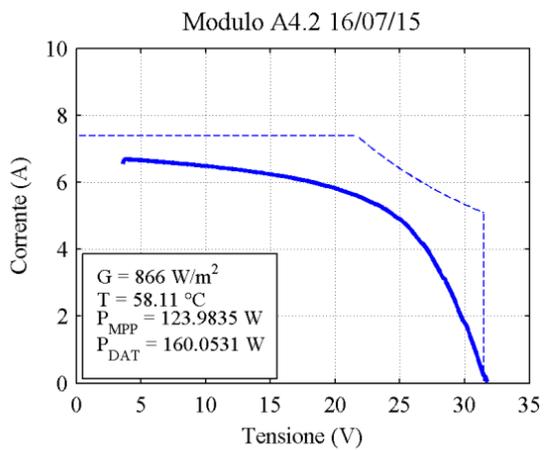
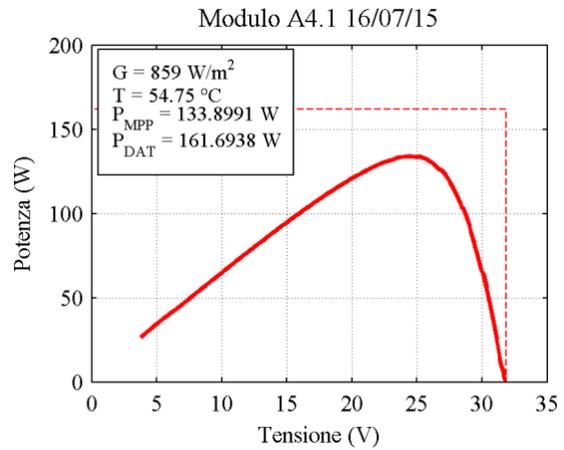
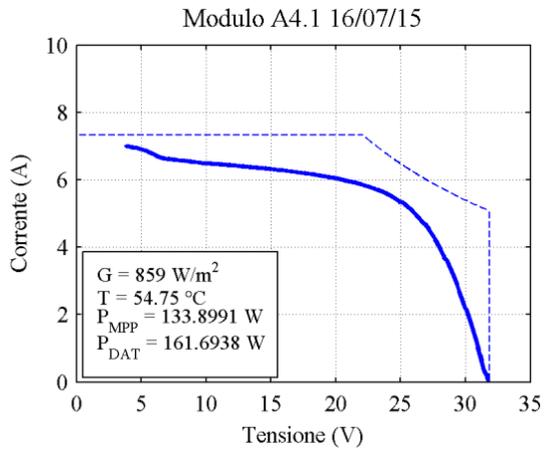
Tabella 6.10: riduzione della potenza dei moduli dal valore teorico di riferimento secondo i valori ricavati dal modello a cinque parametri nei diversi giorni

La corrente di cortocircuito misurata è molto inferiore al valore di riferimento e differisce da un modulo all'altro. Entrambi gli approcci utilizzati per determinare il valore teorico di riferimento forniscono risultati analoghi. Come per il punto di massima potenza, anche in questo caso è il modulo A4.1 ad avere la riduzione minore di corrente di cortocircuito; essa varia dal 4,46% al 7,44%. Il modulo A4.3 è invece quello con la riduzione maggiore, che varia dal 17,5% al 22,3%.

Diversamente da quanto misurato per il punto di massima potenza e per la corrente di cortocircuito, la tensione a vuoto non subisce variazioni significative rispetto al valore teorico di riferimento. Lo scostamento massimo, secondo il modello a cinque parametri, è pari al 6,07% ed è misurato sul modulo A4.4, che risulta avere lo scostamento maggiore anche in quasi tutti gli altri giorni. Il valore di riferimento teorico da datasheet ha invece uno scostamento massimo del 3,49%, misurato per il modulo A4.3. I due approcci forniscono risultati che differiscono tra loro del 2-3%. I valori teorici di tensione a vuoto ottenuti dal datasheet sono più vicini al valore misurato di quanto non lo siano i risultati ottenuti dal modello a cinque parametri. Nella maggior parte delle prove effettuate risulta comunque che la tensione a vuoto misurata è superiore al valore teorico ottenuto con i due diversi approcci. Tuttavia, va ricordato che vi è incertezza di misura nel calcolo della tensione a vuoto, a causa dell'incertezza nella misura della temperatura di cella. La tensione a vuoto è molto influenzata dalla temperatura, in particolare il suo valore diminuisce al crescere della temperatura di cella.

Di seguito, in Figura 6.9, sono riportate le curve caratteristiche I-V e P-V dei quattro moduli affetti da snail trails, con riferimento alle misure effettuate il giorno 16 Luglio

2015. Con una linea tratteggiata vengono rappresentati i valori teorici di corrente di cortocircuito, tensione a vuoto e potenza massima calcolati a partire dai valori di datasheet (eq.6.21, eq.6.22 ed eq.6.23).



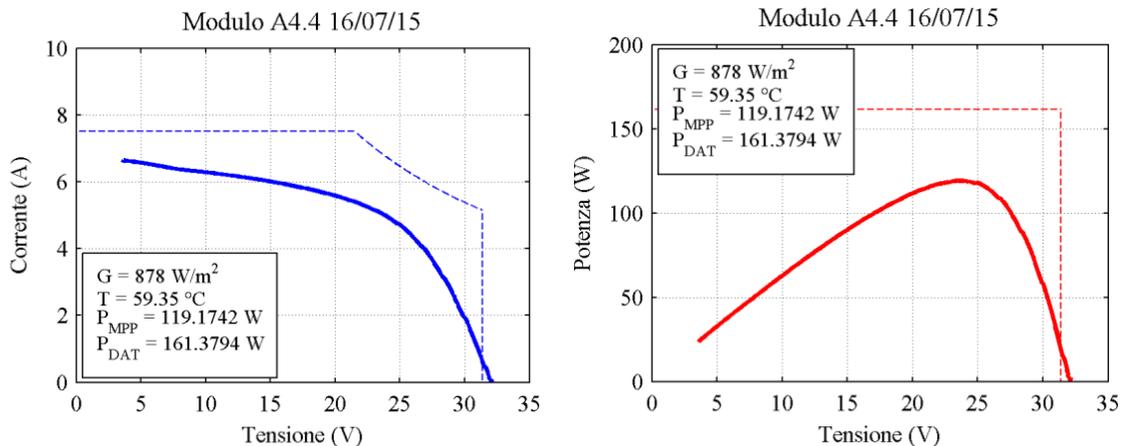


Figura 6.9: curve caratteristiche I-V e P-V dei moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4, relative alle misure effettuate il giorno 16 Luglio 2015

In Figura 6.10 sono riportate le curve I-V e P-V misurate dei moduli affetti da snail trails e confrontate con la curva del modello a cinque parametri, per tutti i giorni in cui sono state effettuate le misure.

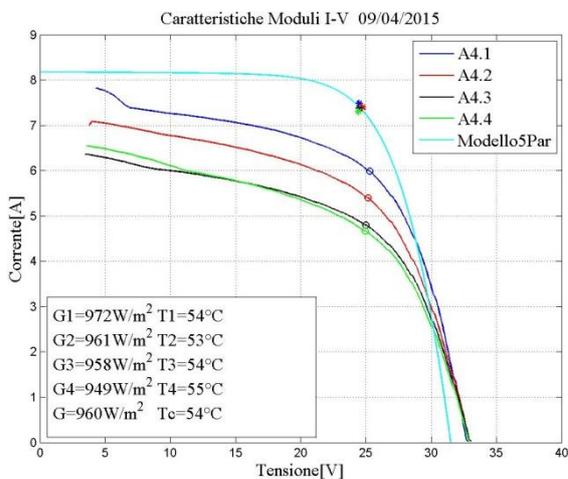


Figura 6.10 (a1)

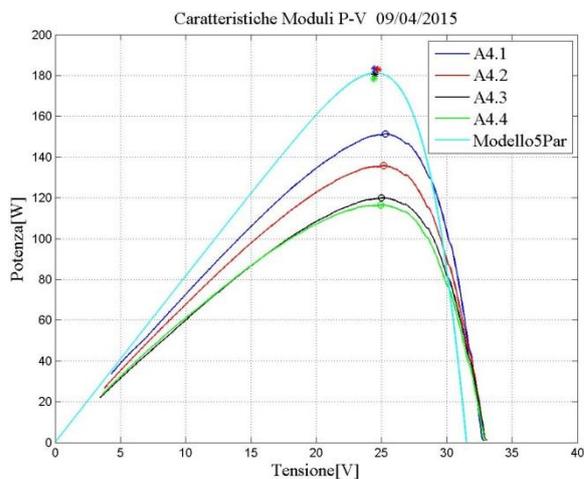


Figura 6.10 (a2)

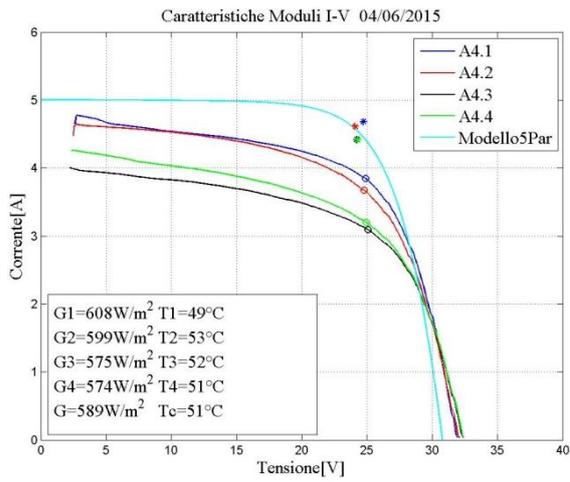


Figura 6.10 (b1)

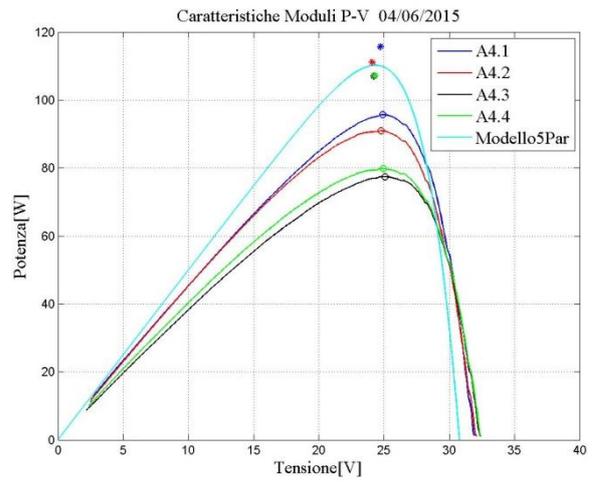


Figura 6.10 (b2)

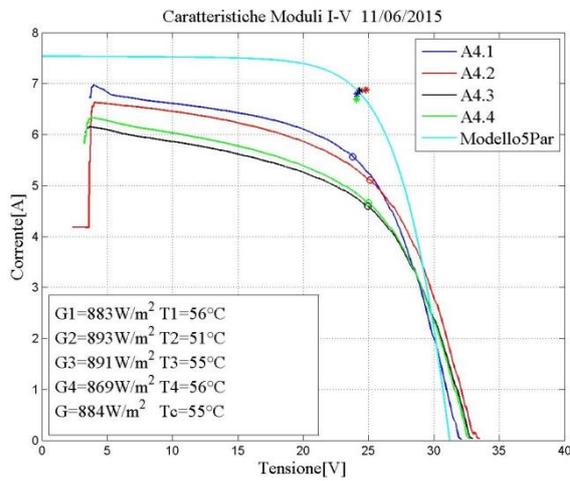


Figura 6.10 (c1)

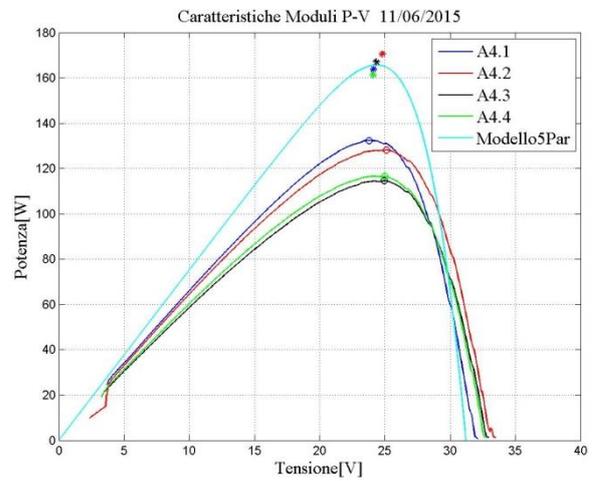


Figura 6.10 (c2)

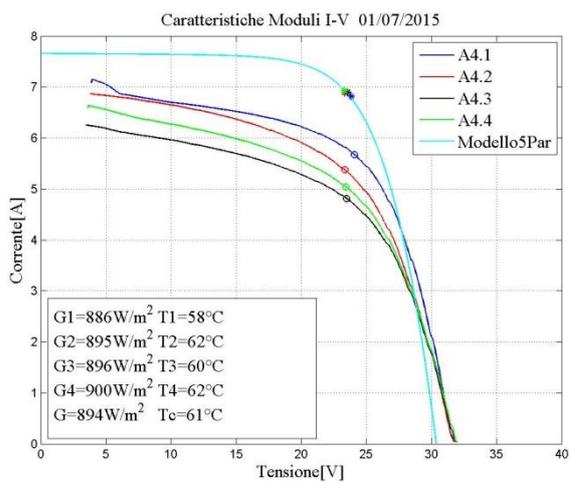


Figura 6.10 (d1)

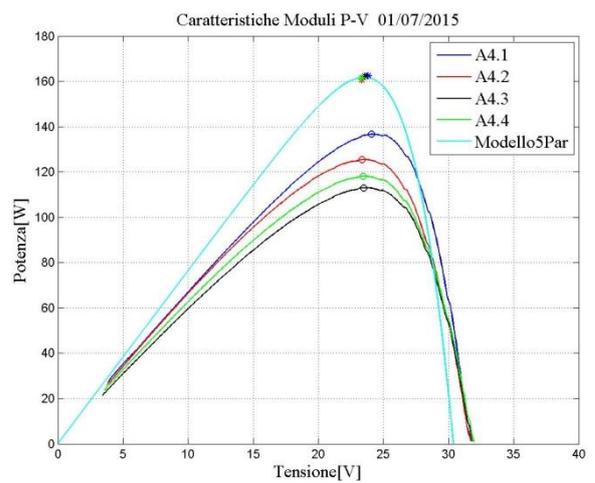


Figura 6.10 (d2)

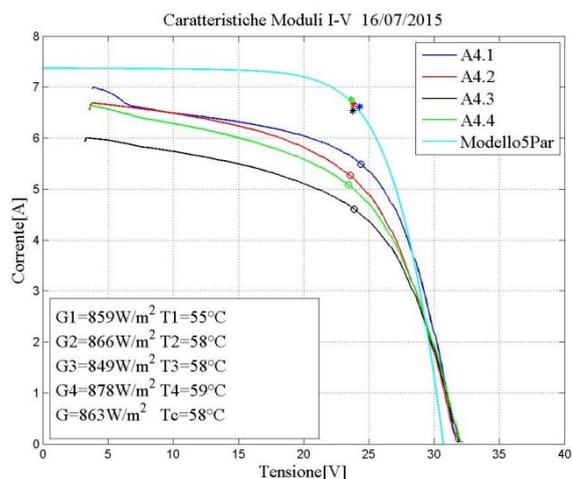


Figura 6.10 (e1)

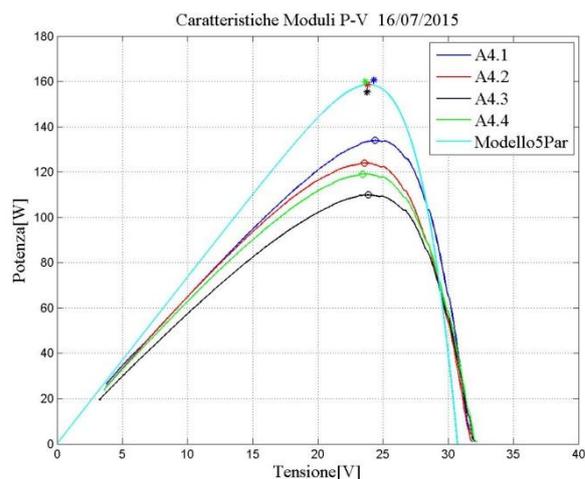


Figura 6.10 (e2)

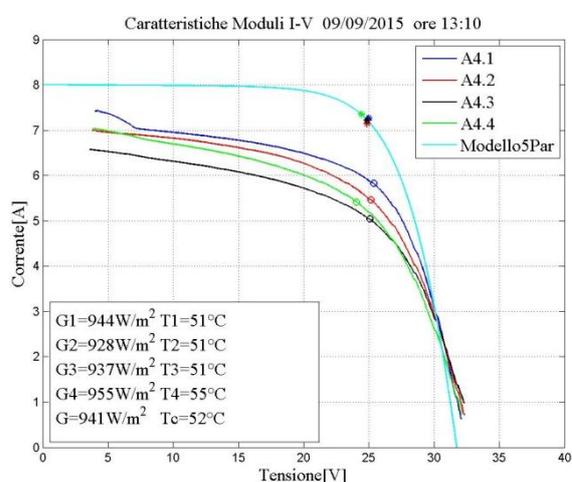


Figura 6.10 (f1)

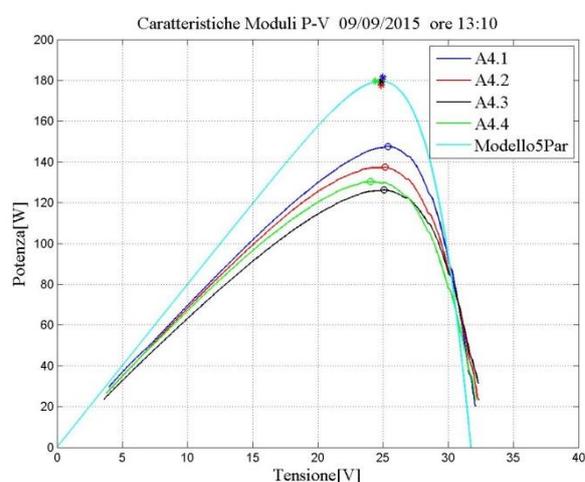


Figura 6.10 (f2)

Figura 6.10: curve caratteristiche I-V e P-V dei moduli affetti da snail trails misurate in giorni diversi, confrontate con la curva del modello a cinque parametri

Dal confronto tra le curve misurate e la curva teorica di riferimento, ottenuta secondo il modello a cinque parametri, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- le curve misurate sono al di sotto della curva teorica del modello a cinque parametri, in particolare si nota che il punto di massima potenza subisce un'importante diminuzione non imputabile al solo invecchiamento del modulo.
- La corrente di cortocircuito misurata sui moduli è molto inferiore al valore teorico, mentre la tensione a vuoto misurata è leggermente superiore al valore fornito dal modello. Questo conferma che il difetto snail trails riduce la corrente fotogenerata,

ma non ha un impatto significativo sulle caratteristiche della giunzione PN da cui dipende, principalmente, la tensione a vuoto.

- Il modulo con la maggior riduzione di corrente fotogenerata e quindi con le peggiori prestazioni in termini di energia prodotta è l'A4.3, seguito dai moduli A4.4, A4.2 e A4.1.
- La curva I-V calcolata con il modello a cinque parametri a basse tensioni ha pendenza molto ridotta, mentre le curve I-V misurate hanno una pendenza molto più marcata. Siccome tale pendenza dipende principalmente dalle perdite per ricombinazione (rappresentate nel modello a cinque parametri da R_{sh}), i risultati ottenuti suggeriscono che nei moduli affetti da snail trails questo tipo di fenomeno possa essere amplificato.

Lo scostamento tra le curve misurate e quelle di riferimento è evidente sia per le curve I-V sia per le P-V. In particolare si può notare in Figura 6.10 come il punto di massima potenza misurato sia lontano dal valore teorico, con conseguente riduzione delle prestazioni dei moduli analizzati. Per una più facile visualizzazione è stata rappresentata una sola curva teorica di riferimento per i quattro moduli con snail trails, riferita a un irraggiamento medio e a una temperatura di cella media tra tutte le prove. I punti di massima potenza teorici sono invece rappresentati per ogni modulo e chiaramente si trovano molto vicini alla curva teorica media.

6.5 Confronto tre valori misurati e valori di riferimento al variare della temperatura del modulo e dell'irraggiamento nella stessa giornata

Al fine di analizzare come la riduzione di potenza vari con l'irraggiamento e la temperatura del modulo, sono state effettuate più misure in diverse ore della stessa giornata. Le prove sono state svolte il giorno 9 Settembre 2015, con tempo sereno ed assenza di nubi. Nella Tabella 6.11 sono riportati i risultati ottenuti.

Giorno e ora	Modulo	G [W/m ²]	T [°C]	Teta [°]	Dati misurati su snail trails			Datasheet in condizioni di test			Modello 5 parametri		
					Isc [A]	Voc [V]	Pmpp [W]	Isc [A]	Voc [V]	Pmpp [W]	Isc [A]	Voc [V]	Pmpp [W]
09/09/15 ore 9:20	A4.1	272,27	27,56	59,11	2,22	33,20	50,79	2,27	32,59	56,27	2,27	32,52	55,39
	A4.2	293,04	29,09	58,08	2,44	33,55	55,81	2,45	32,55	60,22	2,45	32,45	59,41
	A4.3	304,47	29,74	57,11	2,42	33,60	53,11	2,54	32,56	62,43	2,54	32,44	61,66
	A4.4	276,37	29,27	56,06	2,32	33,10	51,55	2,31	32,40	56,68	2,31	32,30	55,75
09/09/15 ore10:20	A4.1	640,53	39,60	39,93	5,30	33,00	112,84	5,39	33,00	128,29	5,39	32,63	128,54
	A4.2	616,84	38,11	41,00	5,03	32,95	107,12	5,19	33,10	124,24	5,19	32,77	124,55
	A4.3	606,18	38,86	41,74	4,65	33,30	96,24	5,10	32,97	121,56	5,10	32,62	121,78
	A4.4	599,61	38,31	42,68	4,84	33,40	99,44	5,04	33,01	120,51	5,04	32,67	120,76
09/09/15 ore11:20	A4.1	753,01	43,95	30,52	6,16	32,45	126,82	6,36	32,85	148,76	6,36	32,37	148,76
	A4.2	766,04	45,20	29,69	6,09	32,55	123,97	6,48	32,74	150,52	6,48	32,23	150,41
	A4.3	792,81	45,65	28,79	5,84	32,50	114,70	6,71	32,77	155,71	6,71	32,24	155,53
	A4.4	794,67	46,21	27,99	6,18	32,70	119,93	6,73	32,71	155,66	6,73	32,16	155,43
09/09/15 ore12:10	A4.1	835,30	46,98	17,22	6,88	32,30	140,51	7,08	32,73	163,44	7,08	32,17	163,05
	A4.2	838,77	46,90	17,96	6,72	32,55	134,49	7,10	32,75	164,22	7,10	32,19	163,83
	A4.3	864,67	47,27	18,70	6,41	32,80	124,45	7,33	32,78	169,27	7,33	32,21	168,77
	A4.4	852,25	47,57	19,38	6,66	32,55	127,00	7,22	32,71	166,44	7,22	32,13	165,96
09/09/15 ore13:10	A4.1	943,83	50,55	11,04	7,43	32,10	147,66	8,02	32,59	182,67	8,02	31,94	181,54
	A4.2	928,11	51,33	11,04	7,00	32,35	137,38	7,89	32,46	178,70	7,89	31,79	177,60
	A4.3	937,34	51,39	11,12	6,57	32,30	126,24	7,97	32,48	180,54	7,97	31,80	179,38
	A4.4	955,12	54,59	11,30	7,04	32,10	130,26	8,14	32,15	181,11	8,14	31,38	179,58
09/09/15 ore14:40	A4.1	866,75	49,48	27,31	6,73	32,15	134,38	7,36	32,52	167,79	7,36	31,89	167,11
	A4.2	878,42	50,43	26,31	6,63	32,45	131,07	7,46	32,44	169,35	7,46	31,79	168,54
	A4.3	870,85	50,77	25,49	6,07	32,55	117,16	7,40	32,38	167,50	7,40	31,72	166,70
	A4.4	890,98	52,01	24,43	6,54	32,45	124,15	7,58	32,29	170,51	7,58	31,59	169,52
09/09/15 ore15:50	A4.1	713,32	46,11	40,17	5,68	32,55	116,76	6,04	32,47	139,00	6,04	31,93	138,84
	A4.2	723,19	46,96	41,21	5,63	32,65	115,29	6,13	32,40	140,41	6,13	31,84	140,19
	A4.3	708,91	47,83	42,34	5,08	32,35	100,58	6,01	32,25	136,89	6,01	31,66	136,60
	A4.4	687,79	47,07	43,33	5,26	32,65	103,03	5,83	32,27	133,13	5,83	31,70	132,89
09/09/15 ore16:40	A4.1	505,04	40,85	54,73	4,04	32,15	85,51	4,26	32,31	99,57	4,26	31,91	99,29
	A4.2	521,15	40,79	53,91	4,11	32,45	87,50	4,39	32,39	102,90	4,39	31,99	102,69
	A4.3	535,75	41,55	53,07	3,91	32,55	80,55	4,52	32,36	105,49	4,52	31,94	105,29
	A4.4	545,29	41,66	52,28	4,22	32,65	85,24	4,60	32,39	107,38	4,60	31,97	107,21
09/09/15 ore17:30	A4.1	335,65	36,39	64,47	2,75	32,20	60,28	2,82	31,94	66,82	2,82	31,65	65,90
	A4.2	329,74	36,44	65,32	2,64	32,45	58,95	2,77	31,89	65,60	2,77	31,61	64,64
	A4.3	314,80	35,25	66,20	2,36	32,15	51,30	2,64	31,94	62,92	2,64	31,68	61,94
	A4.4	293,77	36,60	67,03	2,34	31,99	50,00	2,47	31,61	58,25	2,47	31,32	57,07

Tabella 6.11: valori misurati e valori teorici ricavati dal datasheet e dal modello a cinque parametri, in diverse ore del giorno 9 Settembre 2015

Le misure del giorno 9 Settembre 2015 sono state effettuate a partire dalle ore 9:20 fino alle ore 17:30, con intervalli di circa un'ora tra una prova e l'altra. In questo modo è possibile analizzare la variazione della curva I-V al variare dell'irraggiamento, dell'angolo di incidenza e della temperatura di cella.

Prima delle ore 10:00 e dopo le ore 16:00 il calcolo del punto teorico di massima potenza, a partire dal datasheet, risente del fattore $\eta_{rel}(G)$. Infatti l'efficienza relativa del modulo si riduce al diminuire dell'irraggiamento incidente e con un irraggiamento prossimo ai 300 W/m² si ha una riduzione di circa il 5% dell'efficienza rispetto all'efficienza in STC.

In Tabella 6.12 viene riportato il confronto tra valori misurati e valori attesi in termini scostamenti relativi.

Giorno e ora	Modulo	G [W/m ²]	T [°C]	Teta [°]	Dati misurati su snail trails			Confronto con datasheet			Confronto con 5 parametri		
					Isc [A]	Voc [V]	Pmpp [W]	$\frac{\Delta P}{P}$	$\frac{\Delta Voc}{Voc}$	$\frac{\Delta Isc}{Isc}$	$\frac{\Delta P}{P}$	$\frac{\Delta Voc}{Voc}$	$\frac{\Delta Isc}{Isc}$
09/09/15 ore 9:20	A4.1	272,27	27,56	59,11	2,22	33,20	50,79	9,72%	-1,88%	2,23%	8,30%	-2,08%	2,25%
	A4.2	293,04	29,09	58,08	2,44	33,55	55,81	7,31%	-3,06%	0,26%	6,05%	-3,38%	0,28%
	A4.3	304,47	29,74	57,11	2,42	33,60	53,11	14,93%	-3,20%	4,77%	13,87%	-3,58%	4,79%
	A4.4	276,37	29,27	56,06	2,32	33,10	51,55	9,04%	-2,15%	-0,57%	7,53%	-2,48%	-0,55%
09/09/15 ore 10:20	A4.1	640,53	39,60	39,93	5,30	33,00	112,84	12,04%	0,01%	1,69%	12,22%	-1,12%	1,70%
	A4.2	616,84	38,11	41,00	5,03	32,95	107,12	13,78%	0,44%	3,03%	13,99%	-0,56%	3,04%
	A4.3	606,18	38,86	41,74	4,65	33,30	96,24	20,83%	-1,01%	8,75%	20,98%	-2,09%	8,76%
	A4.4	599,61	38,31	42,68	4,84	33,40	99,44	17,49%	-1,19%	3,96%	17,65%	-2,22%	3,98%
09/09/15 ore 11:20	A4.1	753,01	43,95	30,52	6,16	32,45	126,82	14,75%	1,22%	3,22%	14,75%	-0,25%	3,23%
	A4.2	766,04	45,20	29,69	6,09	32,55	123,97	17,64%	0,58%	5,96%	17,58%	-1,00%	5,97%
	A4.3	792,81	45,65	28,79	5,84	32,50	114,70	26,34%	0,81%	12,97%	26,25%	-0,80%	12,97%
	A4.4	794,67	46,21	27,99	6,18	32,70	119,93	22,95%	0,02%	8,09%	22,84%	-1,66%	8,10%
09/09/15 ore 12:10	A4.1	835,30	46,98	17,22	6,88	32,30	140,51	14,03%	1,31%	2,80%	13,83%	-0,41%	2,81%
	A4.2	838,77	46,90	17,96	6,72	32,55	134,49	18,10%	0,61%	5,45%	17,91%	-1,12%	5,46%
	A4.3	864,67	47,27	18,70	6,41	32,80	124,45	26,48%	-0,07%	12,53%	26,26%	-1,84%	12,53%
	A4.4	852,25	47,57	19,38	6,66	32,55	127,00	23,70%	0,48%	7,85%	23,48%	-1,31%	7,86%
09/09/15 ore 13:10	A4.1	943,83	50,55	11,04	7,43	32,10	147,66	19,17%	1,51%	7,31%	18,66%	-0,51%	7,31%
	A4.2	928,11	51,33	11,04	7,00	32,35	137,38	23,12%	0,35%	11,31%	22,64%	-1,77%	11,31%
	A4.3	937,34	51,39	11,12	6,57	32,30	126,24	30,08%	0,55%	17,50%	29,62%	-1,57%	17,50%
	A4.4	955,12	54,59	11,30	7,04	32,10	130,26	28,07%	0,15%	13,54%	27,46%	-2,29%	13,55%
09/09/15 ore 14:40	A4.1	866,75	49,48	27,31	6,73	32,15	134,38	19,91%	1,14%	8,51%	19,58%	-0,81%	8,51%
	A4.2	878,42	50,43	26,31	6,63	32,45	131,07	22,61%	-0,03%	11,19%	22,24%	-2,09%	11,19%
	A4.3	870,85	50,77	25,49	6,07	32,55	117,16	30,06%	-0,53%	17,91%	29,72%	-2,63%	17,91%
	A4.4	890,98	52,01	24,43	6,54	32,45	124,15	27,19%	-0,51%	13,67%	26,76%	-2,72%	13,68%
09/09/15 ore 15:50	A4.1	713,32	46,11	40,17	5,68	32,55	116,76	16,00%	-0,25%	5,99%	15,91%	-1,94%	6,00%
	A4.2	723,19	46,96	41,21	5,63	32,65	115,29	17,89%	-0,78%	8,11%	17,76%	-2,55%	8,12%
	A4.3	708,91	47,83	42,34	5,08	32,35	100,58	26,53%	-0,32%	15,42%	26,37%	-2,17%	15,42%

	A4.4	687,79	47,07	43,33	5,26	32,65	103,03	22,61%	-1,18%	9,80%	22,47%	-2,98%	9,81%
09/09/15 ore 16:40	A4.1	505,04	40,85	54,73	4,04	32,15	85,51	14,12%	0,50%	5,09%	13,88%	-0,75%	5,10%
	A4.2	521,15	40,79	53,91	4,11	32,45	87,50	14,96%	-0,19%	6,52%	14,79%	-1,43%	6,54%
	A4.3	535,75	41,55	53,07	3,91	32,55	80,55	23,64%	-0,59%	13,44%	23,50%	-1,90%	13,46%
	A4.4	545,29	41,66	52,28	4,22	32,65	85,24	20,62%	-0,81%	8,24%	20,49%	-2,14%	8,25%
09/09/15 ore 17:30	A4.1	335,65	36,39	64,47	2,75	32,20	60,28	9,79%	-0,82%	2,32%	8,53%	-1,72%	2,34%
	A4.2	329,74	36,44	65,32	2,64	32,45	58,95	10,14%	-1,75%	4,66%	8,80%	-2,67%	4,68%
	A4.3	314,80	35,25	66,20	2,36	32,15	51,30	18,47%	-0,66%	10,66%	17,17%	-1,47%	10,68%
	A4.4	293,77	36,60	67,03	2,34	31,99	50,00	14,16%	-1,19%	5,14%	12,39%	-2,13%	5,16%

Tabella 6.12: confronto tra i dati misurati e i valori teorici ottenuti dal datasheet e dal modello a cinque parametri, in diverse ore del giorno 9 settembre 2015

La riduzione della corrente di cortocircuito dai valori teorici di riferimento varia durante le ore della giornata; in particolare aumenta al crescere dell'irraggiamento e al diminuire dell'angolo di incidenza. I valori forniti dal datasheet e dal modello a cinque parametri sono sostanzialmente gli stessi e indicano che la massima riduzione per tutti i moduli si ha tra le ore 13:10 e le ore 14:40. Il modulo A4.3 ha la riduzione maggiore della corrente di cortocircuito ed è pari al 17,91%, valore ottenuto alle ore 14:40. Il modulo A4.1, invece, ha globalmente la minor riduzione, non superando mai l'8,51%. In Figura 6.11 è mostrata la riduzione della corrente di cortocircuito per i quattro moduli durante le ore del giorno 9 Settembre 2015.

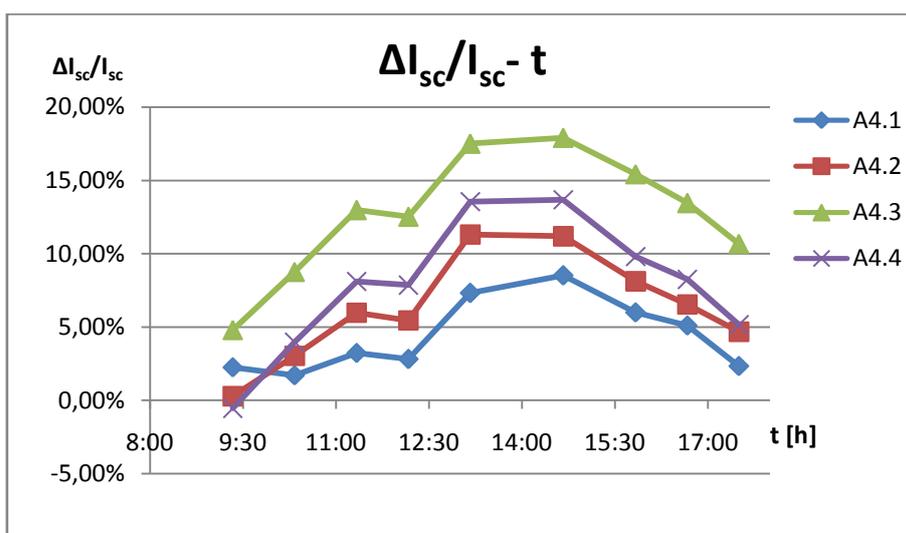


Figura 6.11: riduzione della corrente di cortocircuito dal valore teorico durante le ore della giornata

I valori di riferimento di tensione a vuoto ottenuti dal datasheet sono più vicini al valore misurato di quanto non lo siano i risultati ottenuti dal modello a cinque parametri. Tuttavia, i due diversi approcci utilizzati non differiscono fra loro più del 2-2,5% e forniscono valori di tensione a vuoto vicini ai valori misurati sui moduli. Nell'arco della giornata, infatti, lo scostamento massimo dal valore di riferimento, calcolato dal modello a cinque parametri, è del 3,58%, come si può osservare in Figura 6.12.

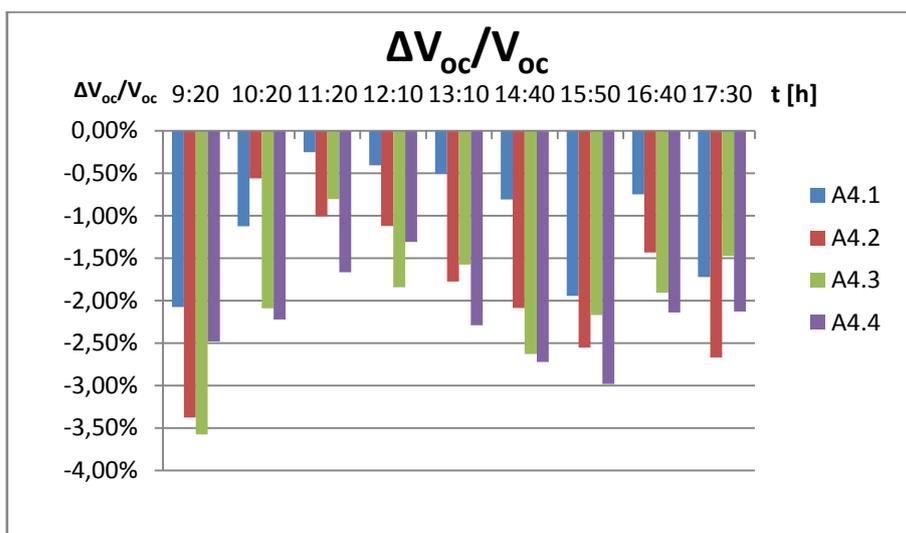


Figura 6.12: scostamento di Voc dal valore di riferimento calcolato secondo il modello a cinque parametri

Anche per il calcolo della potenza teorica nelle diverse ore i due approcci forniscono risultati simili. Si può notare come nelle misure effettuate prima delle ore 11:00 e dopo le 17:00 la riduzione di potenza risulti più contenuta rispetto alle ore più calde della giornata, quando l'irraggiamento è maggiore. Infatti, per tutti i moduli tale riduzione ha un massimo tra le ore 13:10 e le 14:40. L'analogia con il comportamento della corrente di cortocircuito è evidente e questo induce a pensare che sia la riduzione della corrente fotogenerata a incidere maggiormente sulla riduzione della potenza prodotta dai moduli fotovoltaici affetti da snail trails.

Anche da questa analisi, svolta in più ore della stessa giornata, si osserva che il modulo A4.1 sembra essere quello che risente meno della presenza di snail trails, non solo perché presenta una riduzione di potenza generata inferiore, ma soprattutto perché essa è contenuta tra l'8% e il 20% in tutte le ore in cui sono state effettuate le misure. Per gli altri

moduli, invece, è ancora più evidente come la potenza diminuisca in maniera significativa con l'irraggiamento. Il modulo A4.3 mostra la maggiore riduzione di potenza in tutte le ore, seguito dal modulo A4.4, il cui comportamento è molto simile. La Figura 6.13 mostra tale andamento per i quattro moduli, prendendo a riferimento i valori teorici calcolati utilizzando il modello a cinque parametri.

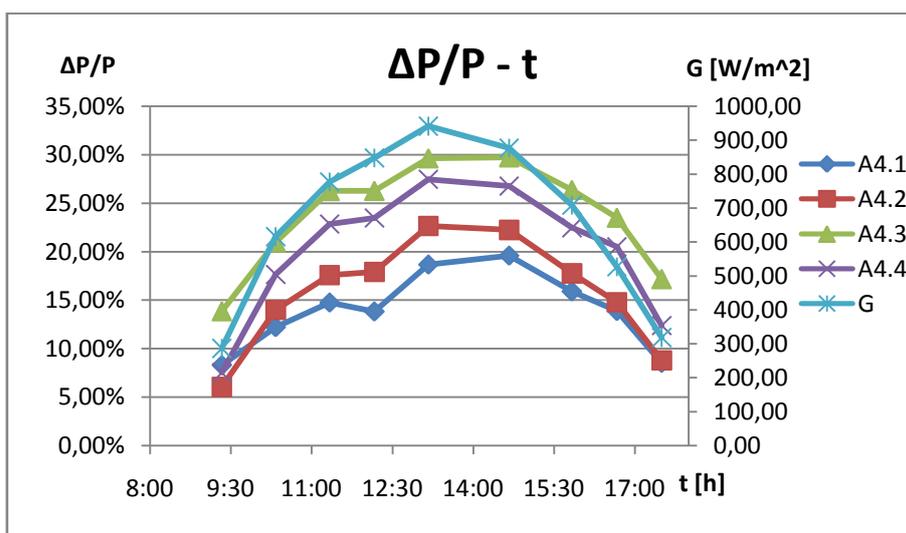


Figura 6.13: riduzione di potenza rispetto ai valori teorici di riferimento del modello a cinque parametri per i moduli affetti da snail trails, nel giorno 9 settembre 2015

Il confronto tra i dati misurati e i valori teorici di riferimento mostra come la riduzione di potenza sia significativa per tutti i moduli nelle ore ad elevato irraggiamento e basso angolo di incidenza. In Figura 6.14 è mostrato l'andamento della riduzione di potenza in funzione dell'angolo di incidenza θ . Per tutti i moduli affetti da snail trails la riduzione di potenza cresce al diminuire dell'angolo di incidenza; quando questo inizia a crescere, dopo le ore 13:10, la riduzione di potenza diminuisce, ma rispetto al mattino si ha che a pari angolo di incidenza la riduzione di potenza è maggiore. Questo effetto di isteresi indica che, a pari angolo di incidenza θ , la temperatura di cella ha un effetto negativo sulla riduzione della massima potenza producibile: al crescere della temperatura di cella la potenza dei moduli affetti da snail trails si discosta maggiormente rispetto al valore di potenza atteso.

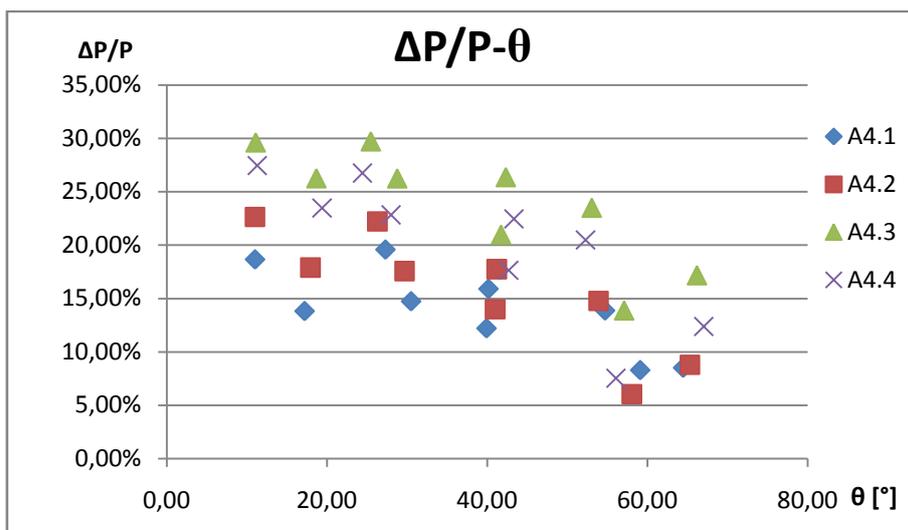


Figura 6.14: riduzione di potenza dal valore teorico di riferimento ottenuto dal modello a cinque parametri per i moduli affetti da snail trails, in funzione dell'angolo di incidenza θ , nel giorno 9 Settembre 2015

In Figura 6.15 è mostrato il legame tra la riduzione di potenza rispetto al valore atteso e la temperatura di cella, mentre in Figura 6.16 è mostrato il legame tra la riduzione di potenza e l'irraggiamento globale sul piano dei moduli. Tali andamenti mostrano che la condizione di massimo irraggiamento, e quindi massima temperatura, risulta essere la più penalizzante in termini di riduzione massima della potenza producibile rispetto a quella attesa.

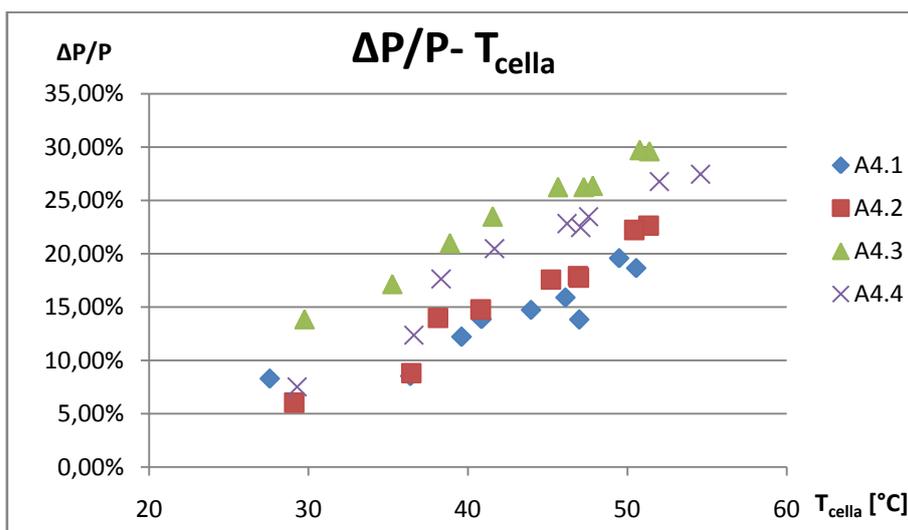


Figura 6.15: riduzione di potenza dal valore teorico ottenuto dal modello a cinque parametri in funzione della temperatura di cella

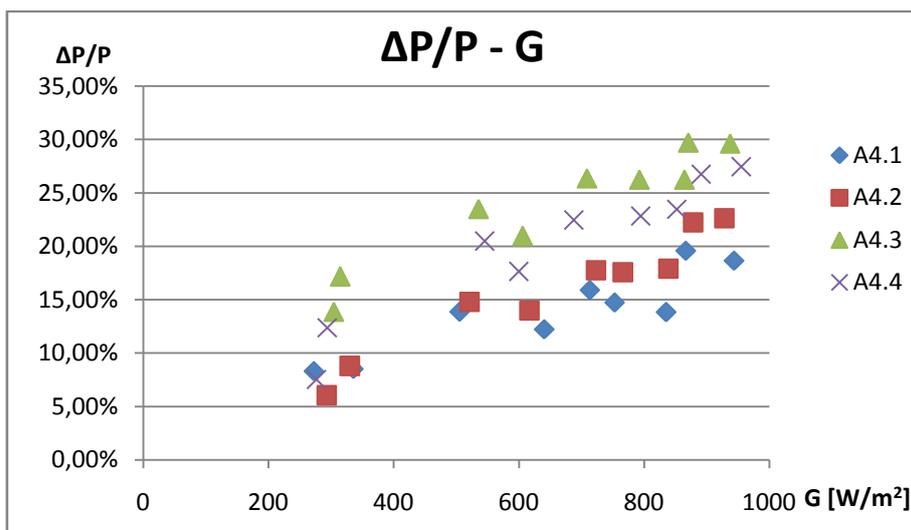


Figura 6.16: legame tra le perdite percentuali di potenza ricavate dal modello a cinque parametri e irraggiamento globale, per i moduli affetti da snail trails, nella giornata del 9 Settembre 2015

6.5.1 Influenza della componente diretta dell'irraggiamento sulle prestazioni dei moduli nelle diverse ore della stessa giornata

La riduzione di potenza è più elevata nelle ore centrali della giornata, quando l'irraggiamento diretto rappresenta la maggior parte dell'irraggiamento globale che incide sulla superficie del modulo. Questa osservazione suggerisce che le snail trails possano influire negativamente sull'efficienza di conversione della componente diretta dell'irraggiamento, mentre potrebbero avere un impatto inferiore sulla riduzione della potenza quando il contributo della componente diffusa è maggiore, cioè prima delle ore 9:30 e dopo le ore 17:30 (Tabella 6.13 e Tabella 6.14). La Figura 6.17 mostra che la riduzione di potenza dal valore atteso cresce quando la quota di irraggiamento diretto aumenta. Quest'ultima è stata ottenuta come rapporto tra l'irraggiamento diretto e l'irraggiamento globale incidenti sul modulo, in termini percentuali. Anche in questo caso la riduzione di potenza è fortemente influenzata dalla temperatura di cella. Infatti, a pari quota di irraggiamento diretto, la riduzione di potenza di ogni modulo risulta maggiore nelle ore in cui l'irraggiamento globale e le temperature di cella sono maggiori.

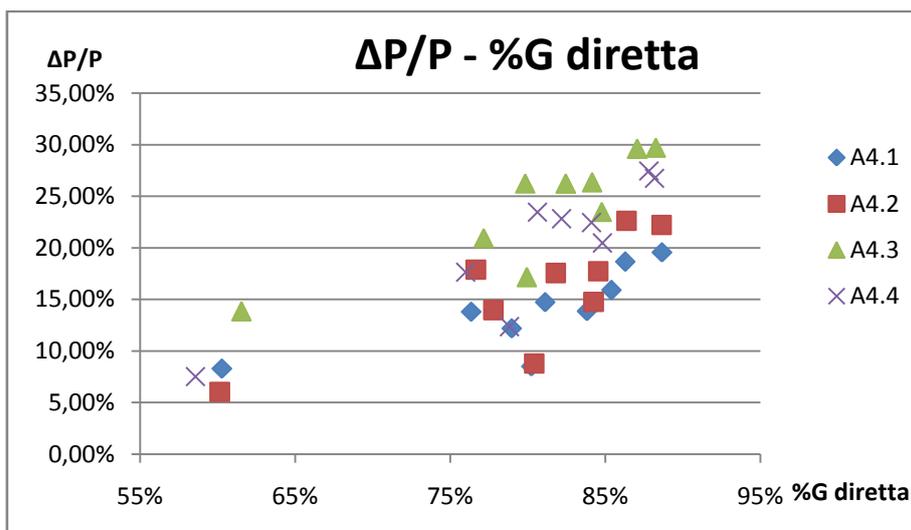


Figura 6.17: riduzione di potenza dal valore teorico in funzione della quota di irraggiamento diretto, nel giorno 9 Settembre 2015, per i moduli affetti da snail trails

ore	A4.1					A4.2				
	G [W/m ²]	G diretta [W/m ²]	G diretta [%]	T [°C]	$\frac{\Delta P}{P}$	G [W/m ²]	G diretta [W/m ²]	G diretta [%]	T [°C]	$\frac{\Delta P}{P}$
09:20	272,27	164,13	60,3%	27,56	8,30%	293,04	176,23	60,1%	29,09	6,05%
10:20	640,53	505,80	79,0%	39,60	12,22%	616,84	479,78	77,8%	38,11	13,99%
11:20	753,01	610,91	81,1%	43,95	14,75%	766,04	626,74	81,8%	45,20	17,58%
12:10	835,30	637,88	76,4%	46,98	13,83%	838,77	642,93	76,7%	46,90	17,91%
13:10	943,83	814,42	86,3%	50,55	18,66%	928,11	801,59	86,4%	51,33	22,64%
14:40	866,75	768,51	88,7%	49,48	19,58%	878,42	778,59	88,6%	50,43	22,24%
15:50	713,32	609,20	85,4%	46,11	15,91%	723,19	611,41	84,5%	46,96	17,76%
16:40	505,04	423,31	83,8%	40,85	13,88%	521,15	439,04	84,2%	40,79	14,79%
17:30	335,65	269,31	80,2%	36,39	8,53%	329,74	265,17	80,4%	36,44	8,80%

Tabella 6.13: irraggiamento diretto nelle diverse ore del giorno 9 settembre 2015, per i moduli A4.1 e A4.2

ora	A4.3					A4.4				
	G [W/m ²]	G diretta [W/m ²]	G diretta [%]	T [°C]	$\frac{\Delta P}{P}$	G [W/m ²]	G diretta [W/m ²]	G diretta [%]	T [°C]	$\frac{\Delta P}{P}$
09:20	304,47	187,38	61,5%	29,74	13,87%	276,37	161,89	58,6%	29,27	7,53%
10:20	606,18	467,72	77,2%	38,86	20,98%	599,61	455,74	76,0%	38,31	17,65%
11:20	792,81	653,79	82,5%	45,65	26,25%	794,67	653,13	82,2%	46,21	22,84%
12:10	864,67	690,38	79,8%	47,27	26,26%	852,25	687,10	80,6%	47,57	23,48%
13:10	937,34	816,14	87,1%	51,39	29,62%	955,12	838,78	87,8%	54,59	27,46%
14:40	870,85	768,69	88,3%	50,77	29,72%	890,98	785,65	88,2%	52,01	26,76%
15:50	708,91	596,58	84,2%	47,83	26,37%	687,79	578,53	84,1%	47,07	22,47%
16:40	535,75	454,21	84,8%	41,55	23,50%	545,29	462,53	84,8%	41,66	20,49%
17:30	314,80	251,64	79,9%	35,25	17,17%	293,77	231,54	78,8%	36,60	12,39%

Tabella 6.14: irraggiamento diretto nelle diverse ore del giorno 9 settembre 2015, per i moduli A4.3 e A4.4

7 Energia prodotta e confronto con un modulo di riferimento

In questo capitolo vengono analizzati gli effetti causati dalle snail trails sulla produzione di energia elettrica da parte dei moduli. Viene inizialmente spiegato come vengono misurate le curve di producibilità e come da queste venga effettuato il calcolo dell'energia prodotta. Le prestazioni dei moduli vengono confrontate con un modulo sano di riferimento, attraverso due indici (4). Il primo di questi è l'instantaneous final yield, che esprime in termini adimensionali la potenza prodotta dai moduli, riferendola alla loro potenza nominale. Il secondo indice è il daily final yield, che rappresenta il numero di ore equivalenti di funzionamento su base giornaliera.

Il confronto rispetto ad un modulo non affetto da snail trails in termini di energia prodotta è effettuato per un periodo che va dal 14 Aprile al 30 Agosto 2015. All'interno di questo periodo è stato analizzato il comportamento dei moduli affetti da snail trails suddividendo i risultati ottenuti in giornate con bassa ed in giornate con alta radiazione.

7.1 Calcolo dell'energia prodotta

A partire dai valori di potenza istantanea di ogni modulo, misurati dai rispettivi inverter, si determina l'energia prodotta dai moduli, integrando la curva potenza-tempo con il metodo dei trapezi. Tramite il software Matlab è stato implementato questo metodo numerico di integrazione, che approssima la curva di potenza con un andamento lineare a tratti e ne calcola l'area sottesa; sommando le aree di tutti i trapezi si ottiene l'energia giornaliera prodotta dal modulo. Ciascun inverter fornisce i valori di potenza all'incirca una volta al minuto, pertanto si può ritenere buona l'approssimazione lineare della curva di potenza nel singolo intervallo temporale.

Per valutare in modo immediato le condizioni di funzionamento del modulo, le curve potenza-tempo sono espresse in termini adimensionali attraverso l'instantaneous final yield index, che è definito come rapporto tra la potenza prodotta dal modulo (P_{out}) e la sua potenza nominale (P_{nom}):

$$y_f = \frac{P_{out}}{P_{nom}} \quad (\text{eq. 7.1})$$

Inoltre, l'istantaneous final yield permette di comparare il funzionamento di moduli di potenza nominale differente (4).

In Figura 7.1 è mostrato l'andamento dell'istantaneous final yield nella giornata del 19 Luglio 2015 per i quattro moduli affetti da snail trails e per il modulo A3.3, scelto come riferimento per questo tipo di analisi. I moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 hanno potenza nominale di 220 W, mentre il modulo A3.3 è da 245 W nominali.

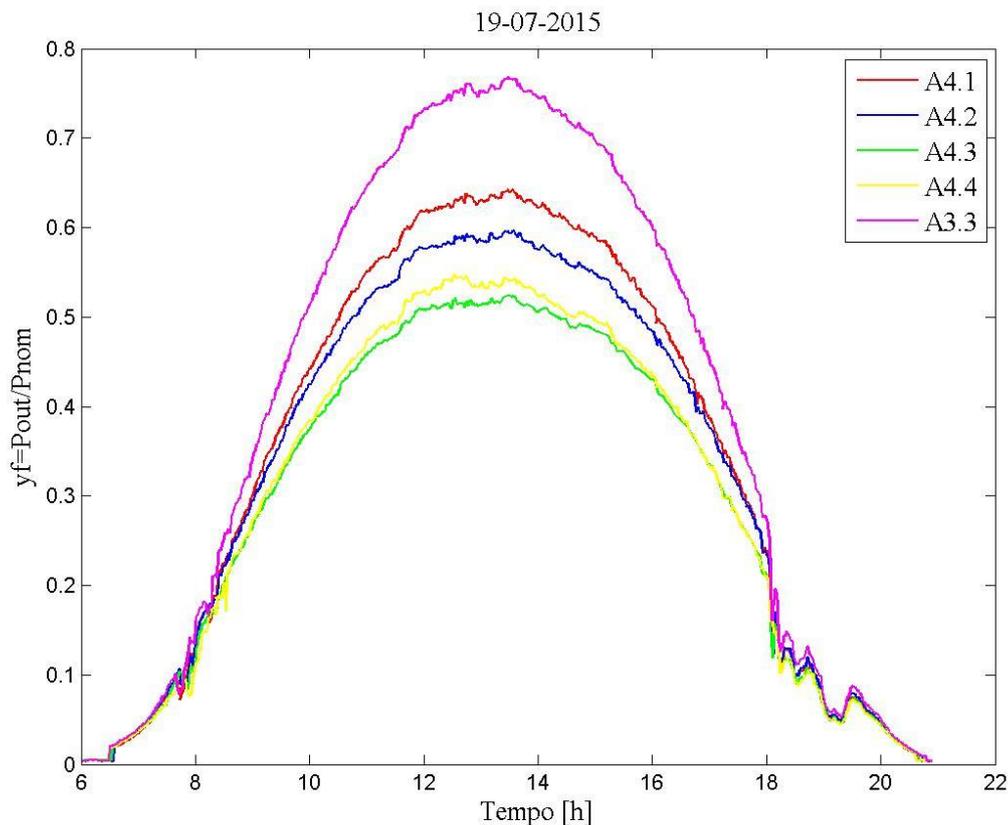


Figura 7.1: andamento dell'istantaneous final yield per i moduli A4.1, A4.2, A4.3, A4.4 e A3.3 nel giorno 19 Luglio 2015

Come si può osservare in Figura 7.1, l'istantaneous final yield per i moduli affetti da snail trails è ben al di sotto della curva del modulo di riferimento A3.3; l'energia prodotta dai moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 sarà pertanto inferiore al valore atteso. Anche tra i quattro moduli snail trails l'andamento si discosta tra un modulo e l'altro e, come già visto in precedenza, la riduzione di potenza risulta più significativa per i moduli A4.3 e A4.4, mentre per il modulo A4.1 si ha una riduzione di potenza inferiore.

7.2 Confronto in energia con un modulo di riferimento

I moduli affetti da snail trails vengono confrontati con un modulo sano di riferimento, per valutare l'influenza che tale problema ha sulla produzione elettrica. Come riferimento è stato scelto il modulo A3.3, in quanto è un modulo non affetto da snail trails e sottoposto alle stesse condizioni ambientali in fase di test dei quattro moduli oggetto del presente studio. Esso è stato prodotto da un costruttore diverso da quello che ha realizzato i quattro moduli aventi il difetto delle snail trails; inoltre la sua potenza di targa è di 245 W e non di 220 W, come i moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4.

I quattro moduli affetti da snail trails ed il modulo di riferimento sono stati prodotti nel 2011 e sono stati esposti alla luce solare a partire dal 2012, in condizioni ambientali simili. Il modulo A3.3 è stato analizzato, in termini di curva I-V, all'inizio ed alla fine delle prove oggetto di questo lavoro, confermando la corrispondenza delle prestazioni con quanto dichiarato nel datasheet.

Il confronto tra l'energia prodotta dai moduli A4.1, A4.2, A4.3, A4.4 e il modulo A3.3 viene fatto attraverso il "daily final yield index", che è definito come il rapporto tra l'energia giornaliera prodotta ($E_{out,day}$) e la potenza nominale (P_{nom}):

$$y_{fd} = \frac{E_{out,day}}{P_{nom}} \quad (\text{eq. 7.2})$$

Generalmente questo indice viene espresso in ore e può essere interpretato come il numero di ore equivalenti di funzionamento, in questo caso calcolato su base giornaliera. Ci si attende che, per moduli di identica tecnologia e sottoposti alle stesse condizioni ambientali, il daily final yield non cambi al variare della potenza nominale dei moduli stessi. L'effetto delle snail trails sulla produzione energetica può quindi essere valutato in termini di differenza relativa di daily final yield index tra i moduli affetti da snail trails ed il modulo di riferimento:

$$Err = \frac{y_{fd,ref} - y_{fd}}{y_{fd,ref}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 7.3})$$

In Tabella 7.1 i moduli affetti da snail trails vengono confrontati con il modulo di riferimento A3.3. Vengono presi in considerazione solo i giorni in cui la curva potenza-tempo non è affetta da problemi di misura e memorizzazione, dovuti per esempio

allo scollegamento momentaneo degli inverter per permettere la caratterizzazione voltamperometrica dei moduli o ad una trasmissione parziale dei dati. Nelle tabelle sono presenti, per ciascun modulo, il daily final yield index (y_{fd}) ed il suo scostamento percentuale dal valore di riferimento ($ErrA33$). Inoltre, per ogni giorno, viene indicata la radiazione giornaliera (I_{day}) e l'indice y_r , che rappresenta il numero di ore equivalenti riferito alla sorgente solare. L'indice y_r è definito come il rapporto tra la radiazione giornaliera e l'irraggiamento alle STC ($G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$)

$$y_r = \frac{I_{day}}{G_{STC}} \quad (\text{eq. 7.4})$$

Giorno	Y_r [h]	Radiazione [Wh/m ²]	A3.3	A4.1			A4.2		A4.3		A4.4	
			Y_{fd} [h]	Y_{fd} [h]	ErrA33 [%]	Y_{fd} [h]	ErrA33 [%]	Y_{fd} [h]	ErrA33 [%]	Y_{fd} [h]	ErrA33 [%]	
14/04/15	6,05	6047,50	5,62	4,73	15,81	4,53	19,41	3,97	29,34	3,99	29,00	
15/04/15	6,39	6389,83	6,12	5,11	16,54	4,91	19,72	4,32	29,36	4,33	29,27	
16/04/15	4,05	4052,67	3,88	3,18	17,98	3,29	15,10	2,95	23,95	2,90	25,22	
17/04/15	1,80	1803,33	1,57	1,25	20,13	1,40	10,66	1,30	17,49	1,22	22,27	
18/04/15	4,84	4841,67	4,80	3,95	17,77	3,86	19,65	3,46	27,89	3,42	28,70	
19/04/15	6,00	5999,67	5,84	4,87	16,62	4,70	19,46	4,12	29,38	4,07	30,19	
20/04/15	7,04	7039,83	6,70	5,52	17,48	5,35	20,12	4,70	29,77	4,71	29,63	
21/04/15	6,92	6918,17	6,48	5,33	17,77	5,18	19,98	4,57	29,46	4,59	29,10	
22/04/15	7,02	7016,17	6,50	5,37	17,44	5,18	20,34	4,56	29,83	4,58	29,62	
05/05/15	4,16	4164,67	3,72	3,03	18,52	3,12	16,13	2,81	24,62	2,78	25,22	
06/05/15	4,86	4861,50	4,39	3,62	17,70	3,59	18,37	3,14	28,59	3,23	26,38	
07/05/15	5,44	5440,17	4,82	3,99	17,31	3,95	18,12	3,56	26,21	3,59	25,58	
08/05/15	5,05	5051,17	4,63	3,80	17,93	3,70	20,21	3,31	28,60	3,29	29,10	
09/05/15	6,25	6254,50	5,33	4,48	15,98	4,36	18,11	3,84	27,88	3,88	27,09	
10/05/15	7,65	7646,33	6,53	5,40	17,17	5,16	20,86	4,55	30,27	4,63	29,08	
11/05/15	6,99	6991,33	6,10	4,99	18,28	4,88	20,04	4,29	29,69	4,32	29,25	
12/05/15	6,83	6831,17	5,99	5,04	15,95	4,85	19,03	4,28	28,57	4,31	28,14	
13/05/15	5,80	5795,17	4,98	4,19	15,79	4,07	18,26	3,59	27,95	3,60	27,59	
14/05/15	7,42	7415,50	6,47	5,44	15,93	5,14	20,54	4,55	29,67	4,62	28,53	
15/05/15	2,95	2950,33	2,71	2,25	17,05	2,27	16,22	2,06	24,01	2,04	24,52	
17/05/15	6,71	6705	5,85	4,83	17,48	4,63	20,81	4,15	29,08	4,07	30,52	
18/05/15	7,51	7510,67	6,44	5,38	16,50	5,10	20,75	4,51	29,99	4,52	29,79	
19/05/15	5,07	5072	4,44	3,76	15,35	3,63	18,20	3,24	26,90	3,23	27,10	
20/05/15	2,62	2622	2,46	2,06	16,50	2,07	16,04	1,93	21,52	1,83	25,61	
21/05/15	3,93	3934,33	3,45	2,91	15,64	2,91	15,56	2,67	22,51	2,56	25,87	
22/05/15	4,82	4823	4,36	3,74	14,40	3,66	16,07	3,30	24,46	3,26	25,26	
23/05/15	4,73	4734,67	4,33	3,66	15,55	3,52	18,71	3,16	27,08	3,16	27,02	
24/05/15	7,59	7593,67	6,56	5,53	15,67	5,22	20,40	4,66	29,02	4,71	28,27	

25/05/15	7,44	7441,67	6,12	5,27	14,00	4,94	19,28	4,38	28,42	4,53	26,04
27/05/15	7,44	7443,33	6,16	5,27	14,52	4,95	19,64	4,38	28,86	4,50	27,04
28/05/15	8,12	8116,83	6,77	5,78	14,68	5,39	20,51	4,81	29,07	4,88	28,03
29/05/15	7,39	7387,83	6,16	5,27	14,42	4,98	19,15	4,37	29,11	4,47	27,41
30/05/15	7,32	7322,50	6,27	5,28	15,80	5,00	20,22	4,51	28,05	4,54	27,47
31/05/15	3,68	3680,17	2,99	2,65	11,45	2,65	11,48	2,40	19,82	2,39	20,27
04/06/15	7,38	7377,67	5,93	5,11	13,72	4,81	18,81	4,25	28,32	4,36	26,49
05/06/15	7,06	7058,83	5,74	4,69	18,35	4,67	18,61	4,12	28,19	4,18	27,22
06/06/15	7,06	7059	5,83	4,75	18,51	4,72	19,08	4,14	29,06	4,24	27,27
19/06/15	6,97	6965,67	5,71	4,88	14,56	4,62	19,06	4,18	26,76	4,22	26,21
20/06/15	7,57	7566,33	6,05	5,21	13,92	4,85	19,88	4,34	28,27	4,42	27,00
21/06/15	7,14	7142,83	5,97	5,14	13,81	4,77	20,02	4,25	28,86	4,31	27,80
22/06/15	6,21	6212,67	5,35	4,58	14,30	4,35	18,65	3,93	26,51	3,91	26,84
23/06/15	5,18	5179,67	4,46	3,85	13,81	3,69	17,19	3,35	24,96	3,34	25,07
24/06/15	8,03	8030	6,48	5,54	14,52	5,17	20,20	4,63	28,62	4,67	27,87
25/06/15	7,64	7638,83	6,36	5,40	15,07	5,02	20,96	4,58	27,95	4,57	28,10
26/06/15	8,00	7999,67	6,48	5,54	14,53	5,16	20,39	4,65	28,16	4,69	27,65
27/06/15	7,57	7566	6,11	5,21	14,83	4,85	20,69	4,41	27,88	4,35	28,81
28/06/15	7,46	7456,50	5,95	5,08	14,55	4,78	19,61	4,31	27,48	4,31	27,55
29/06/15	6,87	6871,67	5,68	4,89	13,87	4,51	20,51	4,14	27,15	4,19	26,21
30/06/15	7,77	7771,83	6,33	5,38	15,00	5,00	20,95	4,51	28,69	4,54	28,17
01/07/15	7,71	7709,17	6,15	5,23	14,92	4,90	20,30	4,42	28,21	4,51	26,71
02/07/15	7,55	7554,33	6,09	5,24	13,87	4,93	18,98	4,41	27,60	4,58	24,75
03/07/15	7,08	7080,67	5,88	5,05	14,03	4,77	18,95	4,24	27,90	4,40	25,18
10/07/15	8,00	7999,00	6,45	5,46	15,38	5,17	19,95	4,60	28,80	4,80	25,64
11/07/15	7,86	7857,00	6,31	5,30	16,08	5,04	20,21	4,54	28,06	4,74	24,96
12/07/15	7,47	7474,33	6,05	5,07	16,15	4,77	21,06	4,33	28,34	4,53	25,07
15/07/15	6,71	6708,50	5,43	4,55	16,07	4,37	19,54	3,95	27,20	4,12	23,97
18/07/15	7,20	7204,83	5,87	5,00	14,77	4,77	18,74	4,20	28,38	4,33	26,14
19/07/15	7,37	7369,67	6,04	5,14	14,83	4,89	19,10	4,34	28,15	4,43	26,65
20/07/15	7,31	7313,83	5,89	5,03	14,60	4,77	18,97	4,26	27,61	4,35	26,05
23/07/15	7,47	7466,17	6,11	5,22	14,56	5,00	18,20	4,42	27,55	4,55	25,52
24/07/15	6,74	6738,67	5,80	4,94	14,72	4,74	18,29	4,20	27,47	4,27	26,30
25/07/15	6,64	6643,33	5,62	4,74	15,72	4,56	18,94	4,10	27,16	4,23	24,85
28/07/15	6,14	6136,33	5,08	4,36	14,29	4,19	17,68	3,78	25,56	3,85	24,33
29/07/15	6,02	6023,00	5,02	4,29	14,43	4,10	18,30	3,68	26,72	3,77	24,82
30/07/15	5,00	4997,50	4,47	3,80	15,01	3,74	16,37	3,30	26,17	3,46	22,57
31/07/15	5,94	5944,50	5,21	4,43	15,03	4,25	18,49	3,75	27,98	3,91	24,96
01/08/15	1,40	1397,33	1,21	1,08	10,86	1,11	7,82	1,04	13,41	1,02	15,79
02/08/15	7,12	7118,33	6,15	5,30	13,91	5,00	18,78	4,47	27,31	4,56	25,84
04/08/15	5,20	5195,33	4,36	3,76	13,78	3,67	15,92	3,33	23,53	3,32	23,83
05/08/15	6,38	6383,50	5,51	4,65	15,66	4,43	19,65	4,01	27,31	4,02	27,09
06/08/15	6,95	6945,67	5,92	5,04	14,87	4,70	20,65	4,28	27,71	4,42	25,29
07/08/15	6,75	6754,17	5,81	4,96	14,60	4,61	20,65	4,23	27,23	4,33	25,50
19/08/15	4,94	4943,33	4,24	3,70	12,90	3,54	16,51	3,27	23,02	3,38	20,26

20/08/15	6,88	6884,33	6,23	5,34	14,28	5,01	19,67	4,58	26,52	4,75	23,77
21/08/15	4,94	4937,33	4,40	3,80	13,74	3,68	16,45	3,31	24,88	3,42	22,33
22/08/15	5,94	5941,50	5,38	4,57	15,05	4,30	20,11	3,94	26,70	4,07	24,25
23/08/15	1,19	1188,33	1,04	0,93	10,90	0,94	9,46	0,91	12,60	0,92	11,83
25/08/15	3,96	3961,33	3,48	3,00	13,93	2,92	16,03	2,70	22,47	2,78	20,25
26/08/15	5,55	5554,00	5,08	4,33	14,90	4,15	18,46	3,80	25,22	3,91	23,05
27/08/15	6,22	6221,00	5,79	4,94	14,70	4,62	20,29	4,25	26,61	4,38	24,32
29/08/15	6,18	6181,00	5,73	4,88	14,95	4,57	20,39	4,20	26,77	4,36	24,05
30/08/15	6,35	6349,00	5,87	4,99	15,11	4,62	21,26	4,28	27,17	4,39	25,29

Tabella 7.1: confronto dei moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 con il modulo A3.3, nel periodo tra il 14/04/15 e il 30/06/15

Nella Figura 7.2 sono mostrati i valori di y_{fd} di ogni modulo confrontati con i valori di y_{fd} del modulo A3.3 di riferimento, per tutti i giorni del periodo considerato. Si può notare come per i moduli A4.3 e A4.4 lo scostamento di y_{fd} dal valore di riferimento sia in generale molto più marcato rispetto ai moduli A4.1 e A4.2.

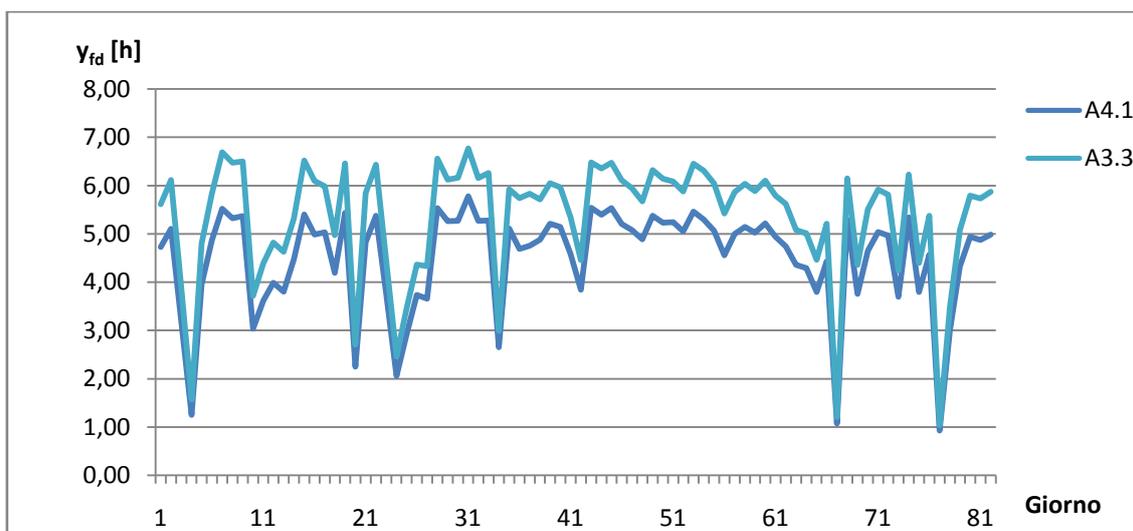


Figura 7.2 (a)

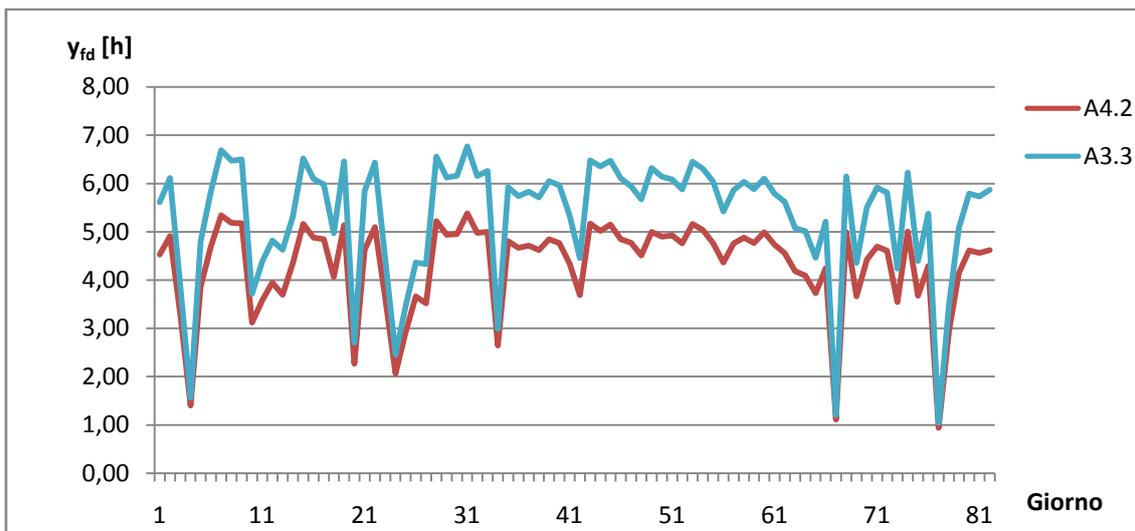


Figura 7.2 (b)

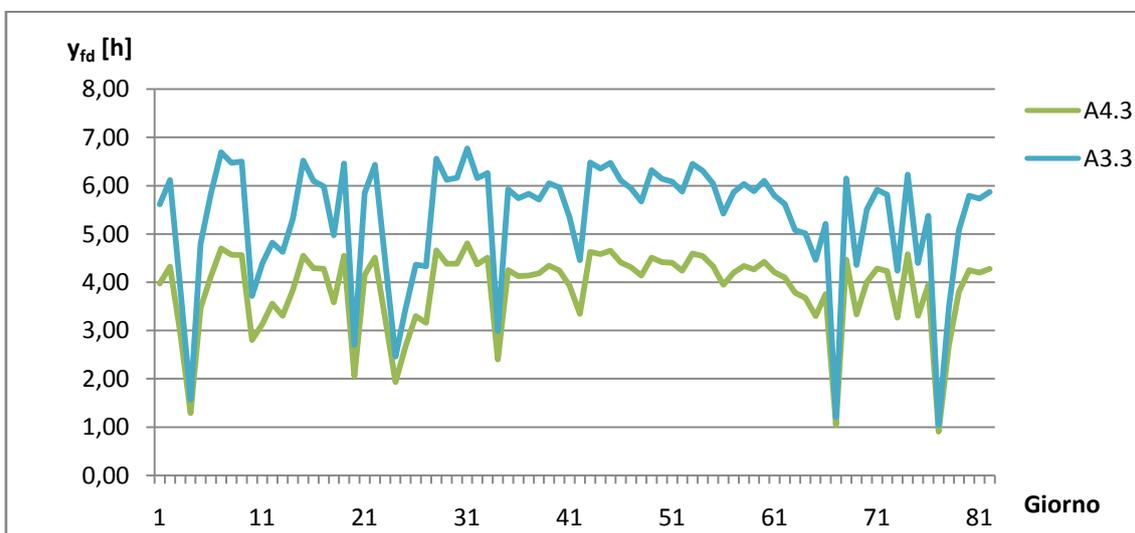


Figura 7.2 (c)

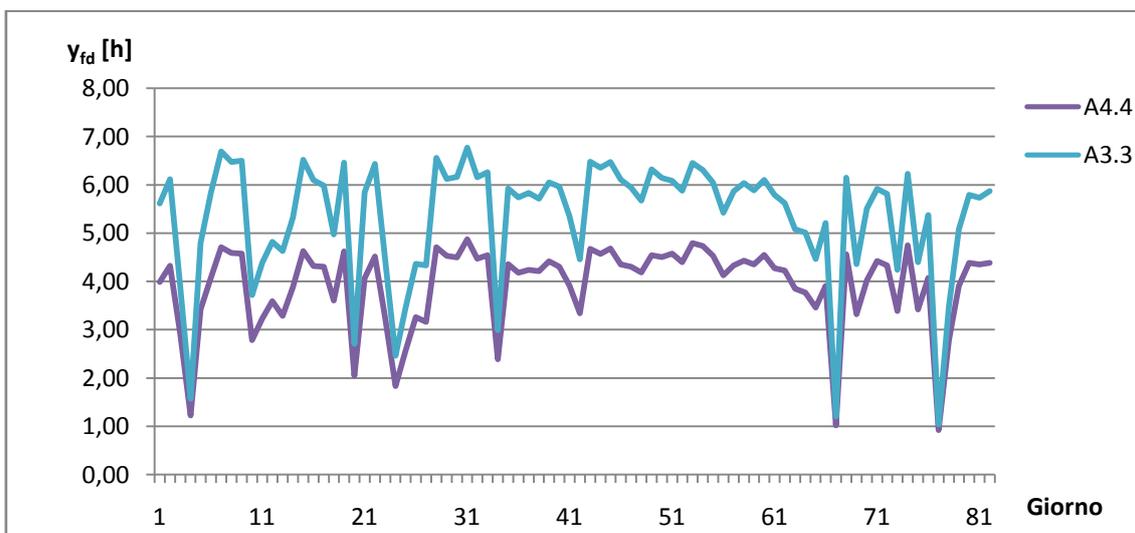


Figura 7.2 (d)

Figura 7.2: valori di y_{fd} dei moduli A4.1 (a), A4.2 (b), A4.3 (c), A4.4 (d), confrontati con i valori di y_{fd} del modulo A3.3

La Figura 7.3 mostra il legame tra y_{fd} dei moduli affetti da snail trails e y_{fd} del modulo di riferimento A3.3. Tale legame mostra un trend di tipo lineare per tutti i moduli, anche se viene mostrato in seguito⁶ che lo scostamento di y_{fd} dal valore di riferimento diminuisce nelle giornate con bassi valori di y_r . Sono inoltre rappresentati con una linea tratteggiata anche i valori di y_{fd} del modulo A3.3 per avere un riscontro immediato con il funzionamento in condizioni di modulo sano. Si può notare che lo scostamento di y_{fd} dal valore di riferimento è maggiore per i moduli A4.3 e A4.4, i cui andamenti sembrano molto vicini tra loro. Tali moduli hanno quindi una maggiore riduzione dell'energia prodotta rispetto ai moduli A4.2 e, soprattutto, A4.1.

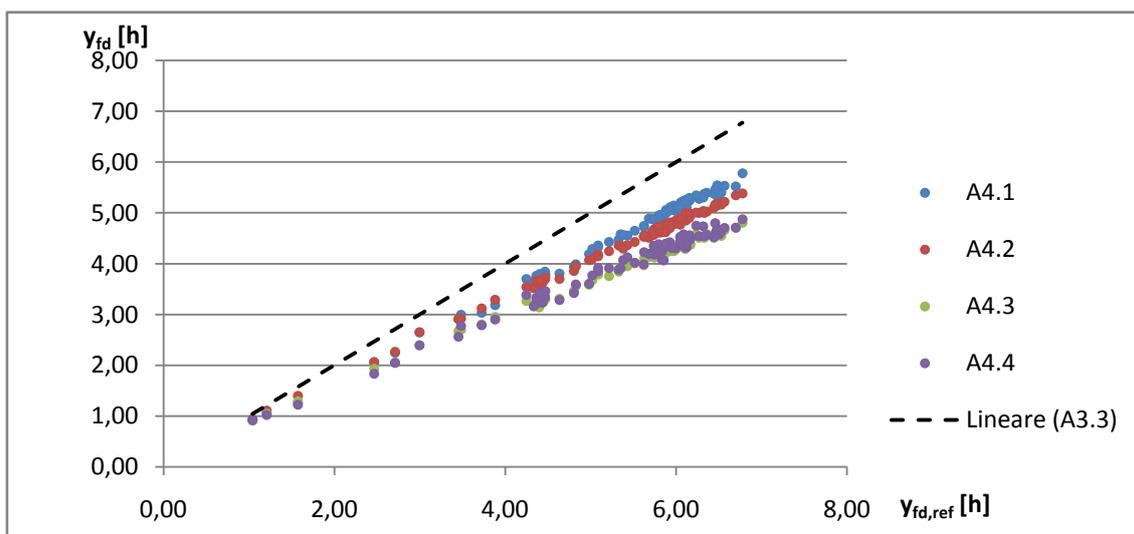


Figura 7.3: andamento di y_{fd} dei moduli affetti da snail trails in funzione di y_{fd} di riferimento

⁶ Si veda la Figura 7.6

7.3 Valutazione dell'influenza di y_r sulla produzione di energia

L'indice y_r esprime le ore equivalenti di irraggiamento giornaliero che incidono sul modulo. Un valore di y_r elevato è indice di una giornata soleggiata; al contrario, un basso valore di y_r suggerisce una giornata con molte nubi e una quota consistente di radiazione diffusa. Questo criterio deve comunque tenere conto del fatto che le ore di luce in una giornata variano durante l'anno, pertanto il valore limite di y_r che permette di classificare le giornate va scelto in modo dinamico. Lo stesso valore di y_r può infatti indicare una giornata soleggiata se ottenuto nel periodo invernale, o una giornata parzialmente nuvolosa se ottenuto nel periodo estivo.

Vengono ora prese in considerazione, a titolo di esempio, due giornate del mese di Agosto 2015: una soleggiata, con un valore di y_r elevato, ed una nuvolosa, con y_r basso (Tabella 7.2 e Tabella 7.3). Si può notare come lo scostamento del daily final yield index dal valore di riferimento sia più contenuto nella giornata nuvolosa rispetto alla giornata soleggiata. Inoltre, nella giornata nuvolosa tale scostamento assume valori simili per i quattro moduli affetti da snail trails, mentre nella giornata soleggiata assume valori evidentemente differenti.

23/08/15	$y_r=1,19$		
modulo	y_{fd} [h]	E_{out} [Wh]	ErrA33 [%]
A3.3 (rif)	1,04	254,83	-
A4.1	0,93	203,89	10,90
A4.2	0,94	207,19	9,46
A4.3	0,91	199,98	12,60
A4.4	0,92	201,75	11,83

Tabella 7.2: confronto con il modulo di riferimento in una giornata nuvolosa

06/08/15	$y_r=6,95$		
modulo	y_{fd} [h]	E_{out} [Wh]	ErrA33 [%]
A3.3 (rif)	5,92	1451,11	-
A4.1	5,04	1109,31	14,87
A4.2	4,70	1033,95	20,65
A4.3	4,28	942,00	27,71
A4.4	4,42	973,47	25,29

Tabella 7.3: confronto con il modulo di riferimento in una giornata soleggiata

Tale risultato quantifica quanto deducibile a partire dalle curve di instantaneous final yield. Nelle giornate con y_r basso, esse sono molto simili e di poco al di sotto della curva di riferimento. Nelle giornate con y_r elevato, le curve di instantaneous final yield sono differenti tra di loro e parecchio al di sotto della curva di riferimento.

In Figura 7.4 e Figura 7.5 sono riportati gli andamenti delle curve di instantaneous final yield per i due giorni considerati.

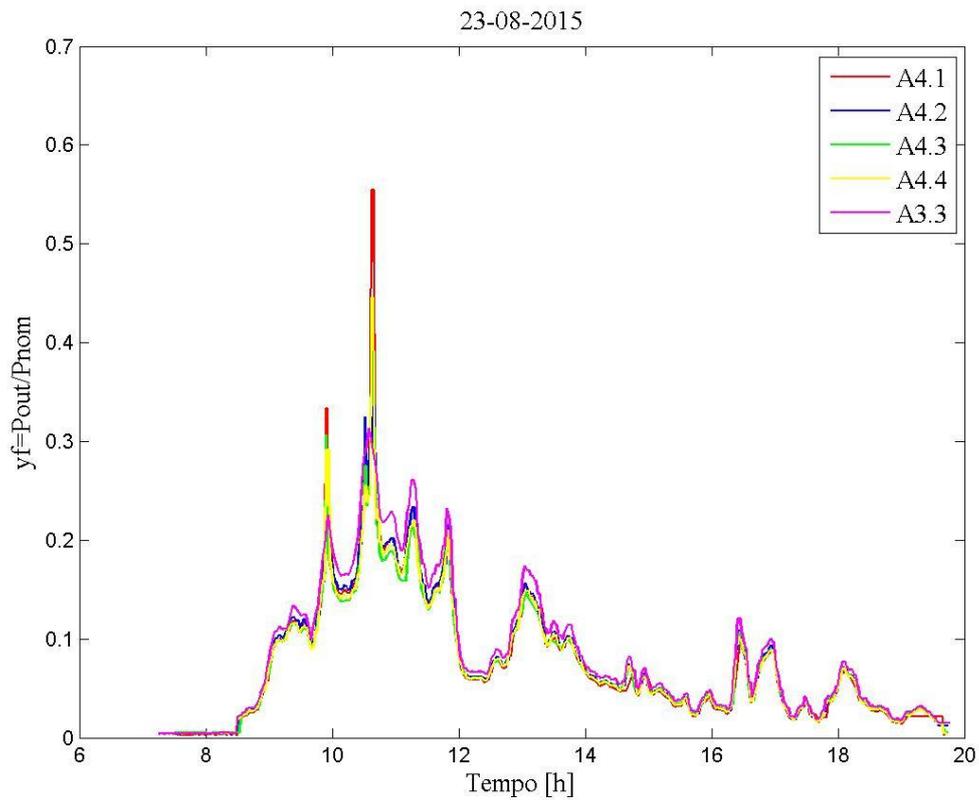


Figura 7.4: andamento di y_f in una giornata nuvolosa

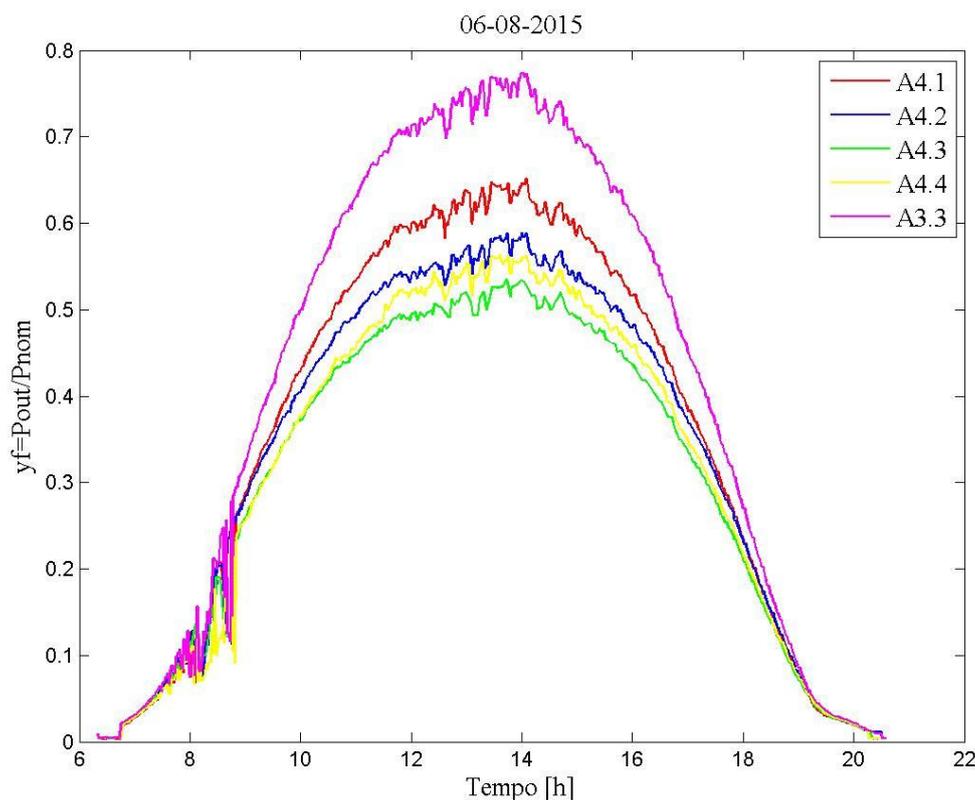


Figura 7.5: andamento di y_f in una giornata soleggiata

Il valore di y_{fd} dei moduli dipende dalle condizioni di irraggiamento e il suo scostamento dal valore di riferimento dipende da y_r . Tuttavia, per evidenziare le differenze che intercorrono tra le prestazioni dei moduli affetti da snail trails ed il comportamento in condizioni sane, è utile analizzare lo scostamento di y_{fd} dal valore di riferimento, calcolato sull'intero periodo di monitoraggio (dal 14 Aprile al 30 Agosto 2015), pur sapendo che le giornate hanno y_r diversi (Tabella 7.4).

modulo	ErrA33 [%] sull'intero periodo
A4.1	15,40%
A4.2	19,13%
A4.3	27,50%
A4.4	26,44%

Tabella 7.4: scostamento di y_{fd} dal valore di riferimento, calcolato sull'intero periodo di monitoraggio (14/04/15-30/08/15)

I moduli A4.3 ed A4.4 presentano uno scostamento sull'intero periodo di monitoraggio superiore al 26%, segno evidente che sono fortemente influenzati dalla presenza delle snail trails. I moduli A4.1 ed A4.2 mostrano perdite inferiori, ma comunque significative.

In Figura 7.6 sono mostrati i grafici di dispersione di $Err\%$ in funzione di y_r :

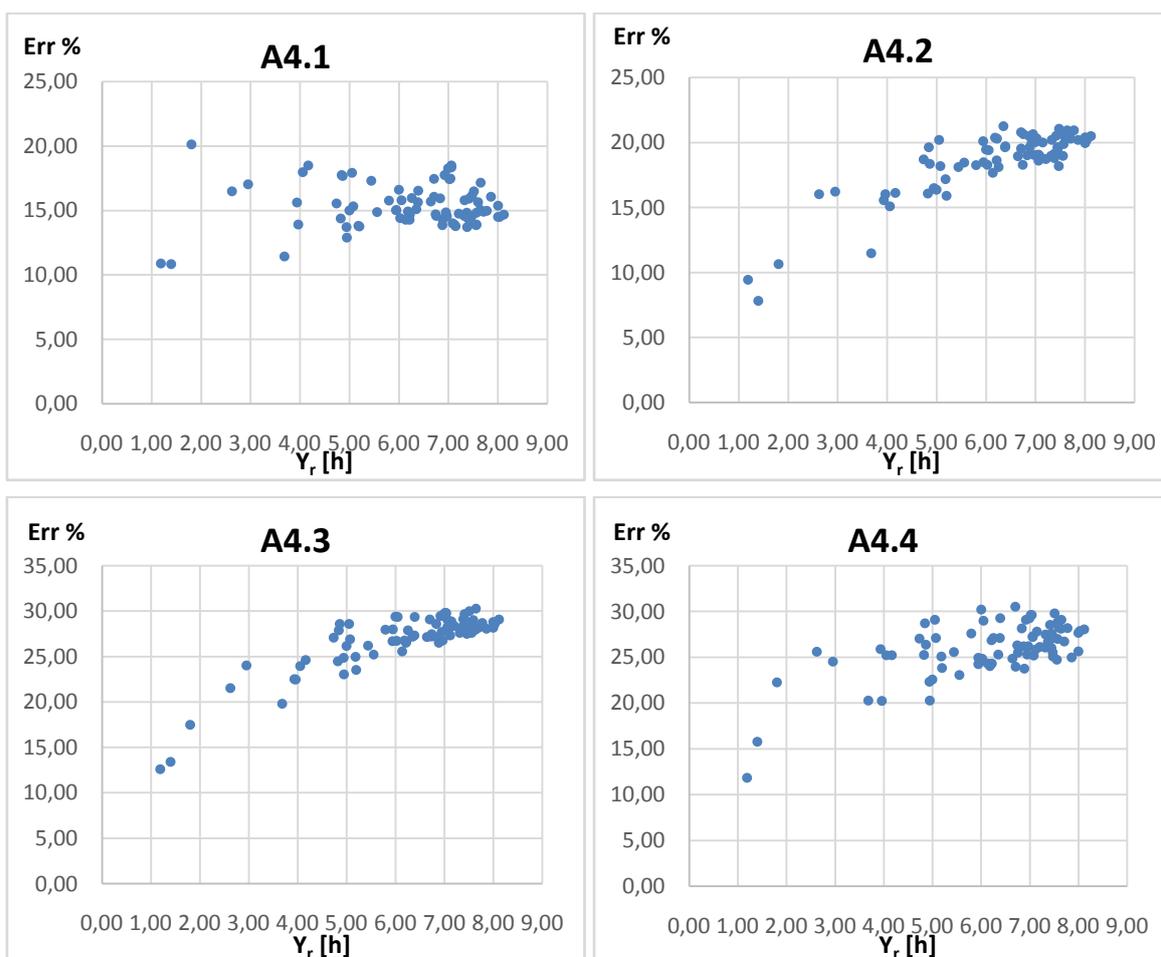


Figura 7.6: grafici di dispersione di $Err\%$ in funzione di y_r per i moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 nel periodo 14/04/15-30/08/15

Lo scostamento del daily final yield index dei moduli A4.2, A4.3 e A4.4, rispetto alla quantità di radiazione giornaliera (rappresentata in termini di ore equivalenti mediante indice y_r), ha un andamento mediamente crescente con y_r , mentre per il modulo A4.1 l'andamento è pressoché costante e non sembra dipendere in maniera significativa da y_r . Nelle giornate soleggiate, considerando un $y_r > 6$, si nota che lo scostamento assume un

andamento costante (vedi moduli A4.1 ed A4.4) o poco crescente (vedi moduli A4.2 ed A4.3), con valori compresi tra il 14%-18% per il modulo A4.1, 17%-21% per il modulo A4.2, 25%-30% per il modulo A4.3 e 24%-31% per il modulo A4.4. Per bassi valori di y_r , quindi in giornate che nel periodo analizzato sono state da parzialmente a completamente nuvolose, si hanno a disposizione pochi dati, ma si può comunque osservare come per i moduli A4.2, A4.3 e A4.4 lo scostamento dell' y_{fd} si riduca rispetto a quanto osservato per giornate sicuramente soleggiate.

Anche in questa analisi, come già sottolineato nei paragrafi 6.5 e 6.5.1, risulta evidente che il difetto di tipo snail trails influenza maggiormente la conversione in energia elettrica quando il modulo opera ad elevato irraggiamento, e quindi quando la radiazione globale è formata principalmente dalla componente diretta. Nelle giornate nuvolose, caratterizzate da bassi valori di y_r , la componente diffusa rappresenta la quota maggiore della radiazione e le prestazioni dei moduli affetti da snail trails risultano meno compromesse, con uno scostamento del daily final yield index dal valore del modulo di riferimento che si riduce rispetto alle giornate soleggiate.

8 Analisi termica dei moduli

In questo capitolo viene presentata l'analisi termica dei moduli affetti da snail trails al fine di verificare come tale difetto abbia un impatto sul campo di temperatura misurato sulla superficie dei moduli.

Poiché le celle dei moduli A4.1, A4.2, A4.3 e A4.4 mostrano parecchie snail trails, significa che in esse sono presenti parecchie microfratture. Quest'ultime costituiscono una resistenza al passaggio di corrente e quindi ci si attende una distribuzione disomogenea della temperatura superficiale (7). Inoltre, è stato verificato, con la prova di elettroluminescenza, che le microfratture presenti nelle celle dei moduli in test sono anche responsabili dell'isolamento di alcune aree all'interno delle celle. In un modulo sano, senza particolari problemi, la temperatura dovrebbe risultare uniforme su tutta la superficie. L'analisi termica sui moduli è stata svolta il giorno 27 Luglio 2015, alle ore 10:30, in una giornata con cielo sereno, con i moduli in produzione. È stata utilizzata una termocamera modello FLIR T335, le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella 8.1.

Termocamera FLIR T335	
Sensibilità termica	50 mK a 30°C
Risoluzione	320 x 240 pixels
Misurazione	da -20°C a 650°C
Campo spettrale	7,5-13 μm
Accuratezza	$\pm 2\%$ della lettura
Temp. ambiente	da -15°C a +50°C

Tabella 8.1: principali caratteristiche della termocamera FLIR 335

Le immagini raccolte si riferiscono ai quattro moduli affetti da snail trails e al modulo A4.5, per avere un confronto qualitativo con un modulo sano sulla distribuzione della temperatura superficiale. In Figura 8.1 sono mostrati i moduli A4.1, A4.2 e A4.3 e si nota come la temperatura sia distribuita in modo disomogeneo. Molte celle infatti appaiono più calde delle circostanti e rappresentano le zone maggiormente danneggiate per la presenza di microfratture. Dalla scala delle temperature si può notare che la superficie dei moduli ha delle zone che variano da 45°C a 52°C.

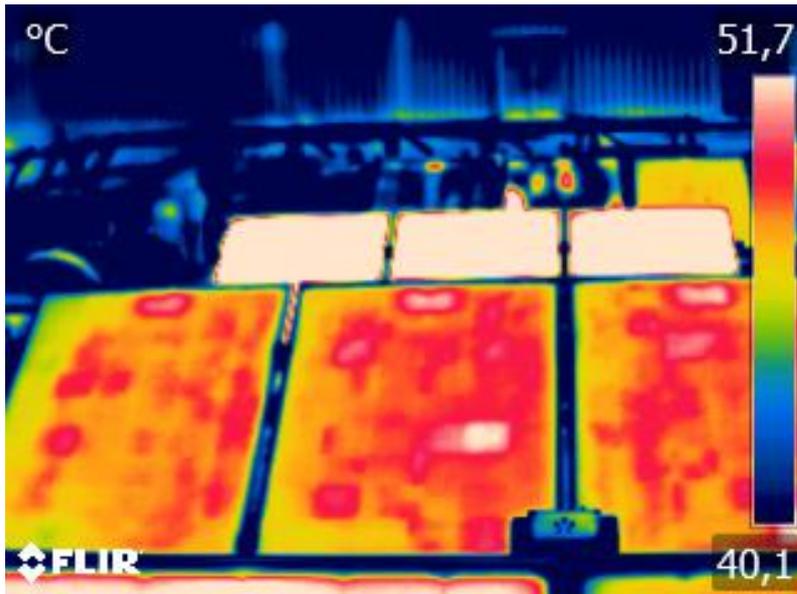


Figura 8.1: termografia dei moduli A4.1, A4.2 e A4.3

In Figura 8.2 è mostrata la termografia dei moduli A4.4 ed A4.5. Il modulo A4.5 è stato scelto per comodità come riferimento per avere un confronto termografico, trovandosi sulla stessa struttura dei moduli affetti da snail trails. Si tratta di un modulo sano, di un costruttore diverso da quello dei moduli oggetto di studio. Tuttavia il confronto è puramente qualitativo e serve ad evidenziare come per un modulo sano la temperatura sia distribuita uniformemente su tutta la superficie, con una zona più calda in corrispondenza della junction box. La temperatura superficiale del modulo A4.4 appare invece distribuita in modo irregolare, come avviene per gli altri moduli affetti da snail trails.

Il modulo A4.5 è mostrato in Figura 8.3, in cui si nota che la temperatura è uniforme e prossima ai 45°C, salvo effetti di bordo.

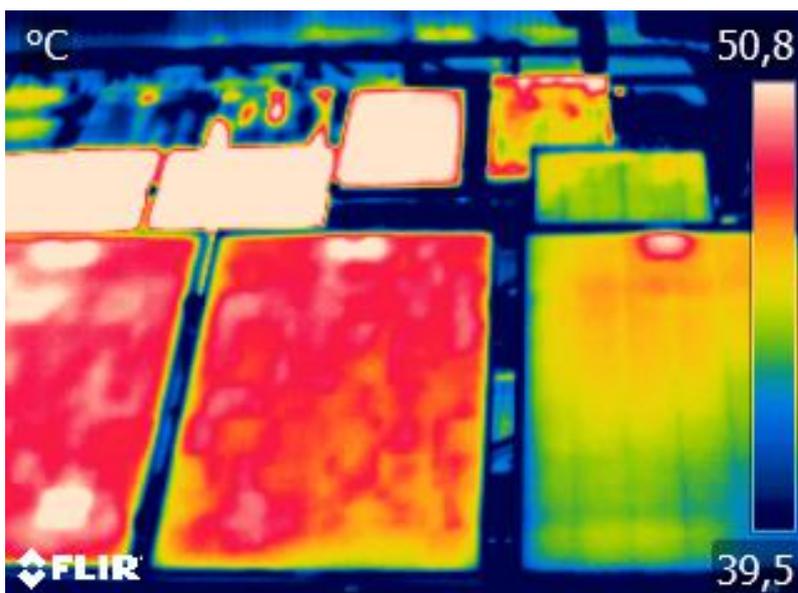


Figura 8.2: termografia dei moduli A4.4 (al centro) e A4.5 (a destra)

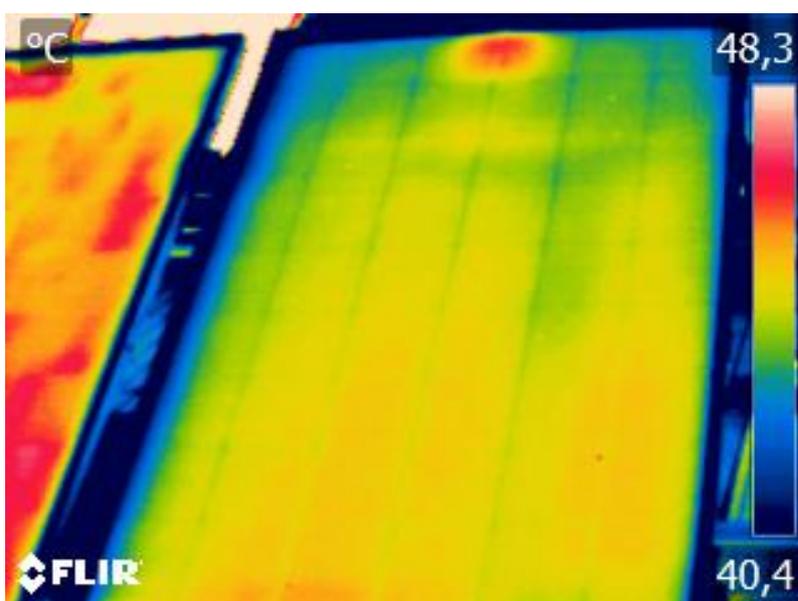


Figura 8.3: termografia del modulo A4.5

Come già accennato, in corrispondenza della junction box la temperatura del modulo è più elevata. Questo avviene sia per i moduli con snail trails, sia per il modulo A4.5 e ciò è dovuto al fatto che la presenza della junction box riduce localmente lo scambio termico

delle celle che sono posizionate al di sopra di essa. Questo effetto si può notare in Figura 8.1, Figura 8.2 e Figura 8.3 nella parte superiore dei pannelli.

8.1 Analisi delle disomogeneità termiche

I moduli affetti da snail trails presentano una distribuzione di temperatura superficiale molto irregolare, come già visto nel paragrafo precedente. In Figura 8.4 viene analizzata una parte del modulo A4.2 particolarmente disomogenea dal punto di vista termico e viene confrontata con l'immagine di elettroluminescenza effettuata dal laboratorio Kiwa Cermet Italia e con l'immagine fotografata nel visibile.

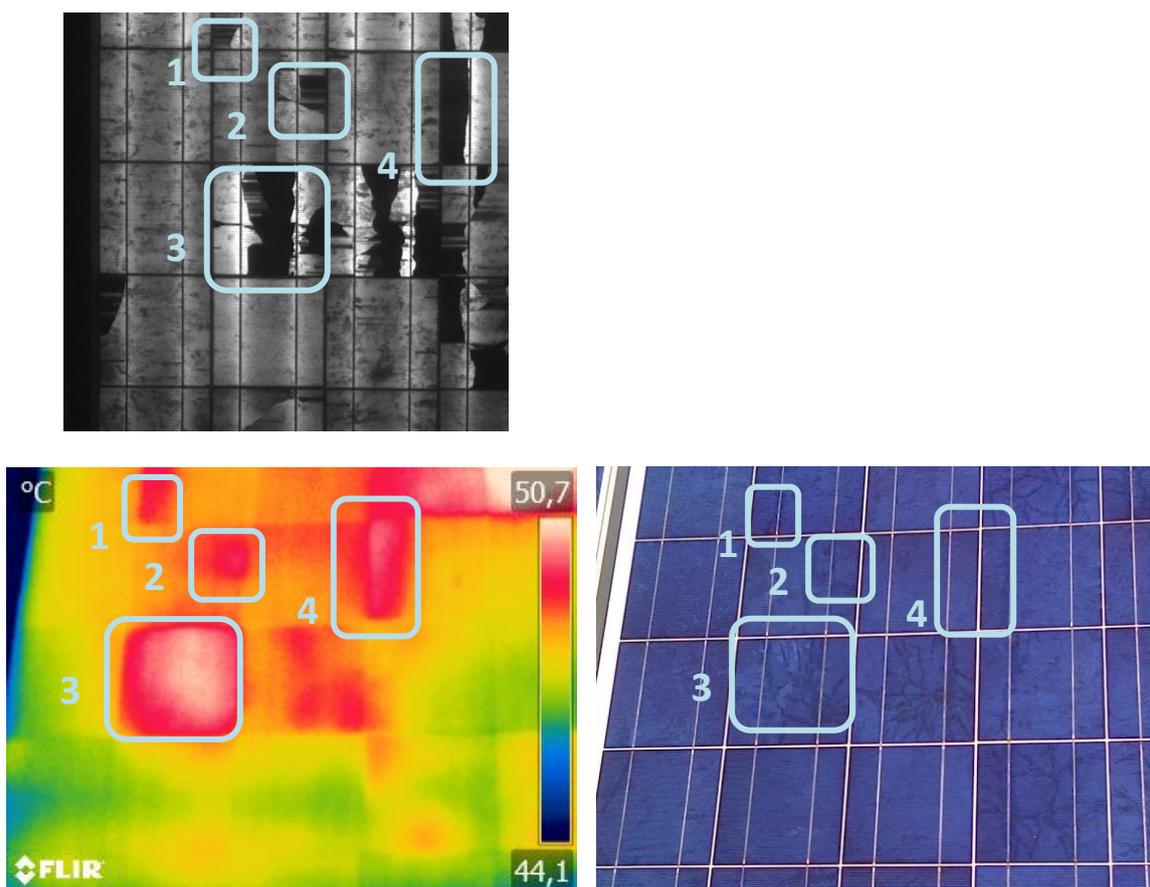


Figura 8.4: confronto tra elettroluminescenza (in alto a sinistra), termografia (in basso a sinistra) e immagine fotografata nel visibile (in basso a destra) di una parte del modulo A4.2

La Figura 8.4 mostra una chiara correlazione tra il campo termico e quanto ottenuto dal test di elettroluminescenza: le zone nere evidenziate nell'immagine di elettroluminescenza corrispondono alle zone più calde evidenziate dalla termocamera. Le zone più scure rappresentano parti di cella isolate elettricamente dalle microfratture e risultano più calde per effetto della totale conversione della radiazione solare in energia termica in quanto, in queste aree, non vi è conversione in energia elettrica.

Le immagini termografiche evidenziano quindi quelle zone della matrice di celle che risultano isolate a causa dalle microfratture.

Le zone più calde non rappresentano dei particolari problemi dal punto di vista termico e dell'integrità delle celle. Infatti la temperatura superficiale, pur essendo disomogenea, varia di 4-5° C su tutta la superficie e non si può quindi parlare di zone fortemente surriscaldate, ma solo di zone più calde, come mostrato in Figura 8.5 e Figura 8.6. Le temperature massime misurate sui moduli affetti da snail trails durante le prove termografiche sono di poco superiori ai 52°C, mentre il funzionamento medio si attesta sui 45-49°C.

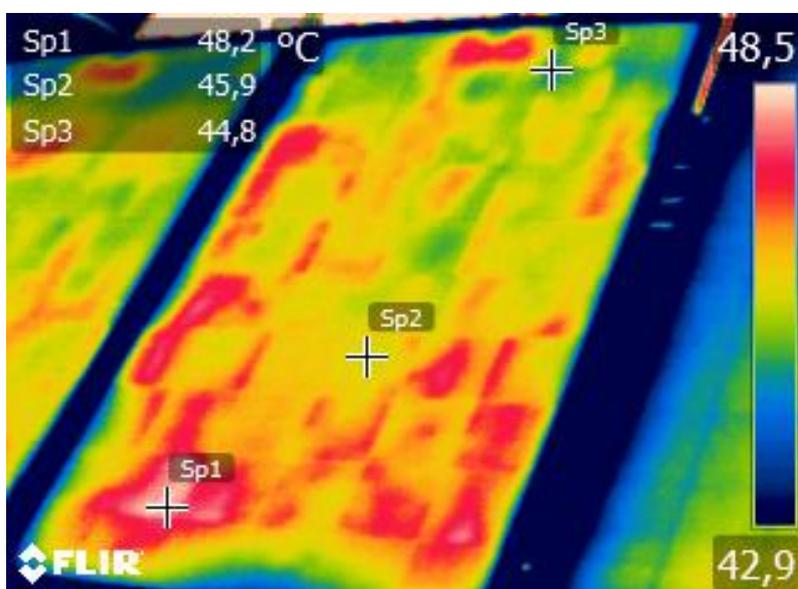


Figura 8.5: temperature in alcuni punti del modulo A4.4

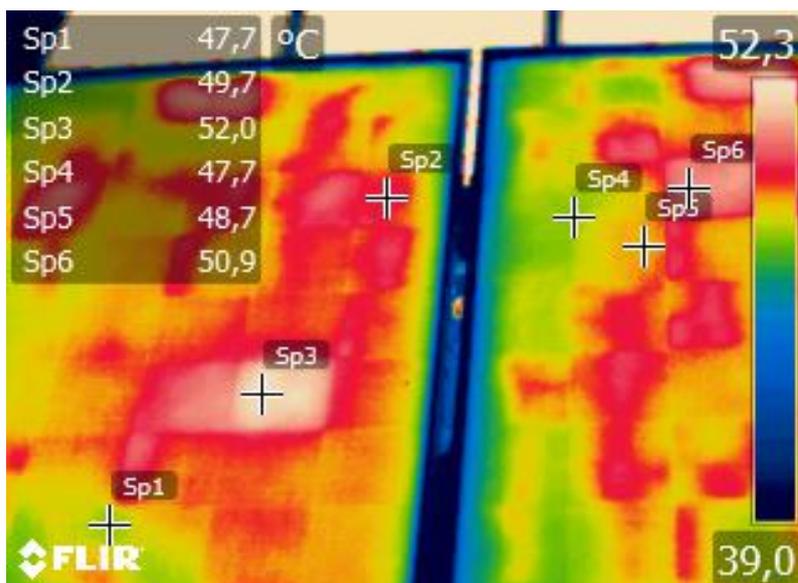


Figura 8.6: temperature in alcuni punti dei moduli A4.2 (a sinistra) e A4.3 (a destra)

La Figura 8.5 mostra le temperature in tre punti differenti del modulo A4.4. Pur essendo distribuita in modo disomogeneo, la temperatura varia da 44,8°C a 48,2°C, senza eccessivi gradienti termici. Gli effetti dovuti al bordo del modulo, di emissività molto diversa rispetto alla superficie, non vengono considerati in questa analisi. Anche per i moduli A4.2 e A4.3 le differenze di temperatura sulla superficie risultano contenute, come si può notare in Figura 8.6. Infatti, per il modulo A4.2 la temperatura varia da 47,7°C a 52,0°C, mentre per il modulo A4.3 da 47,7°C a 50,9°C.

I punti caratteristici della curva di funzionamento della cella sono influenzati dall'irraggiamento incidente e dalla temperatura della cella stessa. Al variare di quest'ultima la corrente di cortocircuito e, soprattutto, la tensione a vuoto modificano il proprio valore e di conseguenza anche il punto di potenza a cui la cella dovrebbe funzionare viene modificato. Questo avviene, chiaramente, nelle zone di celle affette da snail trails ma non isolate da microfrazioni, dove la presenza delle snail trails costituisce una resistenza che provoca localmente una generazione di calore. Essendo comunque le differenze termiche tra una cella e l'altra abbastanza contenute, le prestazioni delle celle non si differenziano tra loro tanto per la temperatura, piuttosto per la presenza delle snail trails. Esse infatti sono responsabili del degrado dei contatti d'argento e, tramite le microfrazioni, dell'isolamento elettrico di alcune zone della cella.

9 Conclusioni

Il presente lavoro ha valutato l'effetto del difetto di tipo snail trails sulle prestazioni di quattro moduli al silicio policristallino. L'analisi si è concentrata sulla caratterizzazione elettrica dei moduli affetti da snail trails, sia in termini di curva I-V che di produzione energetica. I due tipi di snail trails presenti sui moduli, le 'framing snail trails' e quelle legate alle microfratture, sono stati analizzati nel loro complesso, non potendo distinguere l'effetto che ciascuno ha singolarmente sulle prestazioni in termini di riduzione della massima potenza del modulo e, di conseguenza, sulla produzione energetica.

Sono state effettuate due campagne di misura, la prima relativa alla caratterizzazione voltamperometrica dei moduli affetti da snail trails e la seconda relativa alla valutazione della produzione di energia da parte degli stessi moduli; i risultati ottenuti in entrambe le campagne di misura sono stati confrontati con i valori di riferimento.

Le prove di caratterizzazione voltamperometrica sono state effettuate in diverse giornate al fine di valutare il comportamento del modulo fotovoltaico in diverse combinazioni di temperatura ed irraggiamento. Per quanto riguarda le curve I-V ed i valori di V_{oc} , I_{sc} , P_{mpp} , V_{mpp} ed I_{mpp} e la curva P-V da esse ricavati, il riferimento è il comportamento atteso dallo stesso modulo non affetto da snail trails e calcolato con due differenti metodologie sviluppate a partire dai valori pubblicati sul datasheet del modulo. La prima metodologia si basa sulla correzione in temperatura ed irraggiamento dei valori nominali del modulo dichiarati alle STC, la seconda prevede la costruzione della curva I-V attesa, utilizzando il modello elettrico del modulo a cinque parametri, caratterizzato a partire dai valori nominali del modulo dichiarati alle STC. Tale analisi ha dimostrato che i moduli affetti da snail trails sono caratterizzati da una potenza massima inferiore rispetto a quella attesa, sia che essa venga calcolata a partire dai valori nominali corretti in irraggiamento e temperatura, sia che venga calcolata con il modello a cinque parametri. La riduzione di potenza varia da un modulo all'altro, a seconda della quantità di snail trails presente su di essi e della loro distribuzione sulle celle. Si è notato che la riduzione della massima potenza del modulo, rispetto all'atteso, è influenzata principalmente dalla temperatura di cella e dalla quantità di irraggiamento diretto incidente rispetto all'irraggiamento globale. In generale, la riduzione della massima potenza del modulo è tanto maggiore quanto la temperatura e

L'irraggiamento sono elevati. Essa è legata soprattutto alla riduzione della corrente fotogenerata, essendo i valori teorici di tensione a vuoto prossimi ai valori misurati. Le prestazioni peggiori sono risultate essere quelle dei moduli A4.3 e A4.4, con riduzioni di potenza rispetto al datasheet che hanno raggiunto rispettivamente il 35,24% e il 34,10%. Questa riduzione è dovuta per circa il 3,5% all'invecchiamento, essendo i moduli in produzione dal 2012 e per la restante parte all'unico problema accertato sui moduli: le snail trails.

La riduzione della massima potenza dei moduli affetti da snail trails porta ad una riduzione dell'energia elettrica prodotta. La seconda campagna sperimentale ha indagato questo aspetto, analizzando la produzione energetica dei moduli in condizioni reali di funzionamento e comparandola con quella di un modulo sano, sottoposto alle stesse condizioni di irraggiamento, preso a riferimento. Essendo il modulo di riferimento di stessa tecnologia ma di potenza nominale differente rispetto ai moduli affetti da snail trails, l'analisi della produzione energetica si basa sull'analisi comparativa del daily final yield index. Esso risulta inferiore al valore di riferimento per tutti i moduli affetti da snail trails e la riduzione di tale indice raggiunge un valore massimo del 30,5%. L'analisi termica ha evidenziato una distribuzione di temperatura disomogenea sulla superficie di tutti i moduli affetti da snail trails. Le immagini termografiche sono state confrontate con le immagini del test di elettroluminescenza e si è notata un'interessante analogia, che ha evidenziato come le zone più calde dei moduli corrispondano alle zone di cella isolate elettricamente dalle microfratture. Tali zone sono molto scure nelle immagini di elettroluminescenza perché corrispondono a parti di cella che non partecipano attivamente alla produzione di energia elettrica. Esse risultano più calde perché la radiazione incidente, anziché essere convertita in energia elettrica, viene convertita in energia termica. Le disomogeneità termiche, così come la diversa luminosità di alcune celle elettricamente attive evidenziata nel test di elettroluminescenza, documentano un comportamento anomalo delle celle.

Le snail trails sono a tutti gli effetti un fenomeno di degrado che incide sulle prestazioni dei moduli fotovoltaici e sulla produzione attesa di energia, avendo così conseguenze negative anche sul piano economico in termini di rientro dell'investimento. Tale problematica è, nella maggior parte dei casi, dovuta ai processi di preinstallazione del modulo fotovoltaico; per prevenire il problema è necessaria una particolare attenzione

nella fase di produzione, di trasporto e di installazione dei moduli fotovoltaici. In particolare, in fase di produzione la scelta di materiali e delle loro caratteristiche, nonché il loro corretto utilizzo e la loro qualità, sono di assoluta importanza per garantire un corretto funzionamento dei moduli. Il backsheet deve isolare gli strati che compongono il modulo fotovoltaico ed avere quindi una ridottissima permeabilità al vapor d'acqua. Le composizioni chimiche dell'EVA e dell'argento che costituisce i fingers devono avere limitate impurità e l'aggiunta di additivi nel film di EVA, che può causare reazioni chimiche con i contatti d'argento dei fingers, deve tenere conto di tutte le possibili reazioni chimiche che si possono attivare a contatto di altre specie.

Dal punto di vista statistico, il numero di campioni analizzati non è tale da portare a considerazioni generali certe sul difetto di tipo snail trails. Tuttavia, dalle analisi svolte, è risultato che esse costituiscono un importante problema di cui tenere conto riguardo all'affidabilità dei sistemi fotovoltaici.

10 Bibliografia

1. Terna. rapportomensile.aspx. www.terna.it. [Online] Dicembre 2014. <http://www.terna.it/it-it/sistemaelettrico/dispacciamento/datiesercizio/rapportomensile.aspx>.
2. Terna. rapportomensile.aspx. www.terna.it. [Online] Dicembre 2010. <http://www.terna.it/it-it/sistemaelettrico/dispacciamento/datiesercizio/rapportomensile.aspx>.
3. Marchesi R., Bombarda P., Bresciani F., Casalegno A., Guilizzoni M. Costo di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Milano : Politecnico di Milano, 2013.
4. Dolara A., Leva S., Manzolini G., Ogliari E. Investigation on performance decay on Photovoltaic Modules: Snail Trails and Cell Microcracks. IEEE Journal of photovoltaics. Settembre, 2014, Vol. 4, 5.
5. Philipp, C. Ferrara and D. Why do PV modules fail? Energy Procedia. 2012, Vol. 15 pag 379-387.
6. S.Meyer, S. Richter, S. Timmel, M. Glaser, M. Werner, S. Swatek, and C. Snail trails: Root cause analysis and test procedures. Energy Procedia. 2013, Vol. 38, pag 498-505.
7. M.Munoz, M. C. Alonso-Garcia, N. Vela, and F. Chenlo. Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions. Solar Energy. 2011, Vol. 85, pag 2264-2274.
8. Understanding the snail trail effect in silicon solar modules on structural scale. S. Richter, M. Werner, S. Swatek, and C. Hagendorf. Frankfurt : 27th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhib., 2012.
9. Matz, I. Rutshmann and M. D. Unlocking the secret of snail tracks. Photon. January, 2012, pag 82-89.
10. Ecoprogetti. 196-la-struttura-di-un-modulo-fotovoltaico.html. www.ecoprogetti.com. [Online] 2015. <http://www.ecoprogetti.com/it/novit%C3%A0/tech/196-la-struttura-di-un-modulo-fotovoltaico.html>.
11. Mike Nowlan, Mark Willingham. Lamination Key to Module Reliability. Renewable Energy World. October, 2010.
12. S. Meyer, S. Timmel, S. Richter, M. Werner, M. Glaser, S. Swatek, U. Braun, and C. Hagendorf. Silver nanoparticles cause snail trails in photovoltaic modules. Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2013, Vol. 121, pag. 171-175.
13. P. Schissel, A. W. Czanderna. Reaction at the silver/polymer interface, a review. San Francisco : Solar Energy Research Institute, 1980.

BIBLIOGRAFIA

14. Snail tracks (Schnecken Spuren), worm marks and cell cracks. M. Köntges, I. Kunze, V. Naumann, S. Richter, C. Hagendorf, J. Berghold, M. Roericht. Frankfurt : 27th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhib., 2012.
15. S.Leva. scheda_laboratorio.php. www.energia.polimi.it. [Online] 2015.
http://www.energia.polimi.it/ricerca/scheda_laboratorio.php?id=32.
16. Duffie J., Beckman W. Solar Engineering of Thermal Processes, pag 3-229. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2013.
17. Dolara A., Leva S., Manzolini G. Comparison of different physical models for PV power output prediction. Solar Energy. 2015, Vol. 119 pag.83-99.
18. W. De Soto, S.A. Klein , W.A. Beckman. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. SolarEnergy. 2006, Vol. 80 pag 78-88.
19. P.Silva. Fotovoltaico-la Tecnologia. s.l. : Solar Energy Report – Energy & Strategy Group, 2013.

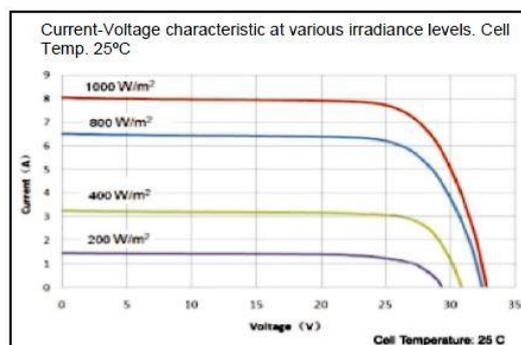


Quality criteria and certificates

- IEC 61215, IEC 61730, CE-Certification, ISO 9001 and ILB-ISO 14001
- Tolerance $\pm 3\%$
- 5 years product-warranty
- years 90% and 25 years 80% performance warranty

Type	NA200W-PB	NA210W-P	NA220W-P	NA230W-P
Electrical Specification				
Peak Power (P _{mpp})	200 W	210 W	220 W	230 W
Open Circuit Voltage (V _{oc})	34.66 V	35.22 V	35.72V	36.18 V
Short Circuit Current (I _{sc})	7.85 A	8.08 A	8.32 A	8.57 A
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	27.95 V	28.38 V	28.70V	29.00 V
Maximum Power Current (I _{mpp})	7.15 A	7.41 A	7.67 A	7.95 A
No. of Diodes	3			
Maximum System Voltage	1000 VDC			
Working Temperature	-40°C to +85°C			
Storage Temperature	-40°C to +85°C			
Mechanical Characteristics				
Dimension (AxBxC) mm	1650x990x40			
Weight	25.5 kg			
Cabel	Ø 4mm ² ; length: 1000 mm			
Connector	MC4			
Container Capacity	20 feet 252 pcs / 40 feet 504 pcs			
Cell	Poly Crystalline 156 x 156 mm			
No. of cells and connections	60 (6x10)			
Temperature/Coefficients (TÜV measurement)				
NOCT	45.30°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)			
Temperature Coefficient VOC (β_2)	-0.3277 %/K			
Temperature Coefficient I _{sc} (α_2)	0.0822 %/K			
Temperature Coefficient P _{mpp} (γ_2)	-0.4594 %/K			

Standard test conditions emittance 1000W/m²; module temperature 25°C; AM=1,5





PHOTOVOLTAICS



Materials

Our ILB Helios-Modules are manufactured only with top material on the highest technology standards.

ILB Helios uses only the best supplier, qualified, and approved materials to make sure that we can guarantee the highest performance and the longest life time. All used materials are international certified and the whole manufacturing process is under a total quality control (TQM), to make sure we can guarantee a Suisse-Quality-Product.

Components	Producer	Location
Aluminum Frame	Jiang Su Kailun / Xixia	China
Backside Cover (TÜV)	DNP / Madico / Isovolta	Japan / USA / Austria
Cells	Mosel Vitelic Inc. / JA / Motech	Taiwan / China
Cable	LAPPKABEL	Germany
Connector	MC4	Switzerland
Diodes	ON Semiconductor	USA
EVA Film	Bridgestone	Japan
Front Glass	Beijing Huamei Glass	China
Interconnecting and Buss Ribbon	Sunlight	China
Junction Box (TÜV)	ILB Helios	German Patent
Silicon	Shin Etsu	Japan

ImpP Class

To improve the efficiency of the array on the installation (up to 5% of the total output per year), ILB Helios is preselecting the modules according to the ImpP range list as shown below. Moreover, to ensure an easy handling on the installation side, all modules are marked with an ImpP Class tag and a sticker with the specific measurement of ImpP and PmpP.

Class	A	B	C	D
ImpP range	< 7.00A	7.00 A – 7.29 A	7.30 A – 7.60 A	> 7.60 A



ILB Helios Aluminum Junction Box

Technical Data

IEC 61215 2nd ed and IEC 61730 1st ed

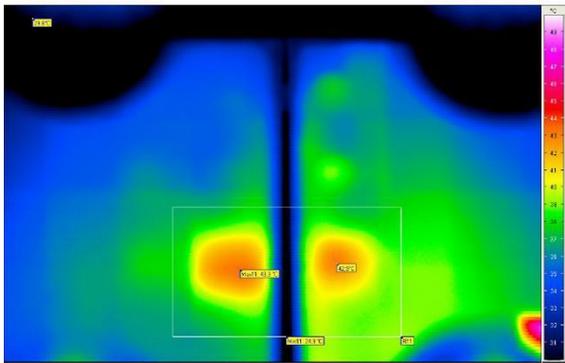
Dimension _____	150 x 131 x 25 mm
Rated current _____	16 A
Maximal current* (3 Diodes / 4 Diodes) _____	12.5 A / 11 A
Test current* (3 Diodes / 4 Diodes) _____	15.60 A / 13.75 A
Rated voltage _____	1000 V DC
Protection type** _____	IP 67
Safety class _____	Class II
Connecting capacity _____	4-6 mm ²
Flat cable _____	3-6 mm
Operating temperature range _____	-40°C to +85°C
Schottky Diodes _____	3 or 4

*IEC 61215, 2ndED. "Bypass-Diode Test"

**max 1.0m/30min



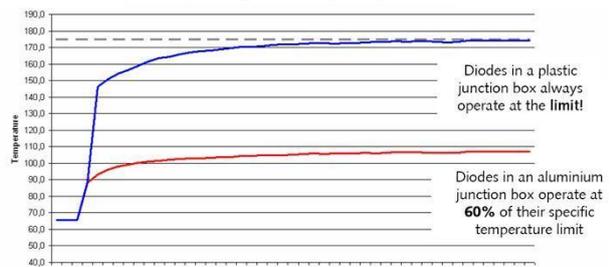
Thermal Advantage of Aluminum Junction Box



Plastic Junction Box

Aluminium Junction Box

Aluminium Junction Box at 8A (red)
Plastic Junction Box at 8A (blue)
(according to IEC 61215, 2nd Ed.)



Every day ... for over 20 years ... for over 7.300 days!
With the Aluminium Junction Box you are far below the limit!

Advantage Aluminum Junction Box

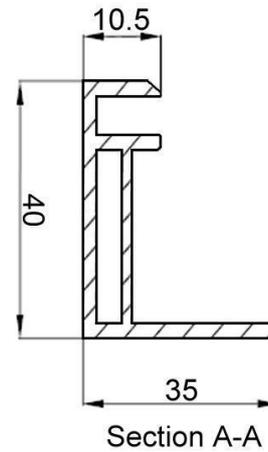
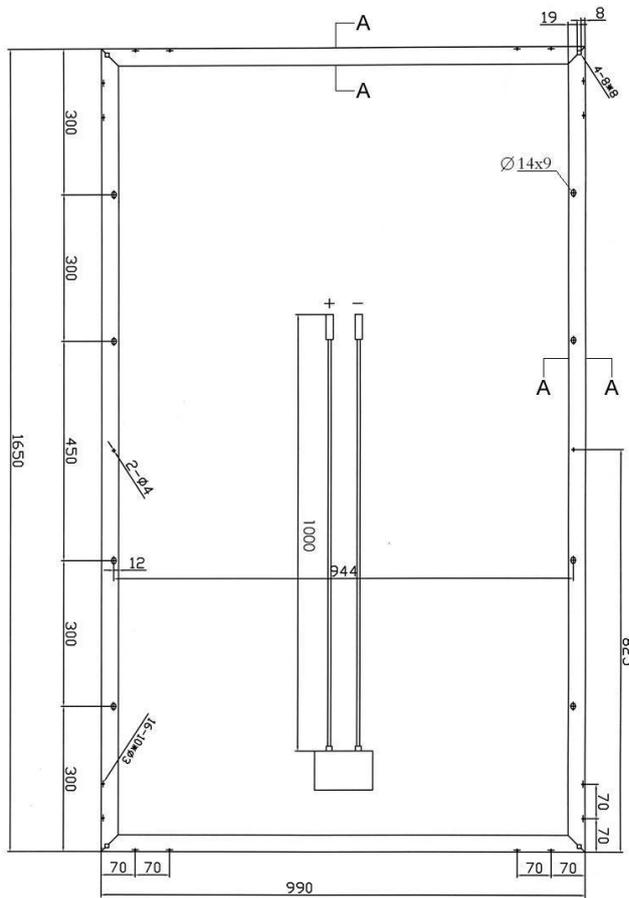
- Top Performance over live time
- Aluminum case is not flammable
- Up to 8x increased life time due to cooled down diodes
- Extreme resistance in a harsh lifelong ambient due to aluminium
- Corrosion free contacts due to Goretex® membrane
- Schottky Diodes

PHOTOVOLTAICS



Dimensions

NA200W-PB to NA230W-P



(Unit of measurement is mm)