

Simulatore solare mobile innovativo per l'analisi in situ dell'efficienza di moduli fotovoltaici

Fabio Capezzuto*, Giuseppe Starace**

*Corresponding author: Geatecno Srl – Via Vigili del Fuoco caduti in Servizio, 14, 70026 Modugno (BA), f.capezzuto@geatecno.com

**Università del Salento, Dip. di Ingegneria dell'Innovazione, via per Monteroni, 73100 Lecce (LE) giuseppe.starace@unisalento.it

ABSTRACT

Con il progressivo invecchiamento del parco di impianti fotovoltaici ormai largamente diffusi, le necessarie operazioni di manutenzione sono diventate più frequenti e costose e necessitano di strumenti nuovi ed intelligenti per essere condotte velocemente e con bassissima probabilità di insuccesso. Le modalità di collegamento elettrico dei moduli fotovoltaici costituiscono un ostacolo all'immediata individuazione di un singolo elemento malfunzionante eventualmente unico responsabile di una ridotta produzione energetica. In questo lavoro si riportano i risultati di un progetto di ricerca e sviluppo condotto da Geatecno Srl di Modugno (BA) e da Laserinn Scarl di Valenzano (BA) tra i cui risultati si annovera la realizzazione di un simulatore solare mobile in grado di testare nel luogo di installazione le performance effettive di ogni singolo modulo fotovoltaico nel confronto con le prestazioni nominali dichiarate dal costruttore, senza richiedere alcuna analisi in laboratorio.

NOMENCLATURA

@OPC - condizioni operative (variabili con la misura)

@STC - condizioni standard (temperatura=25 [°C] e AM (air mass)=1,5; Potenza specifica =1000 [W/m²])

AM - Air mass coefficient, coefficiente di densità di radiazione variabile in funzione dello strato di atmosfera

P_{max} - Valore di potenza elettrica massima prodotta durante la prova – @STC la P_{max} coincide con la potenza nominale del modulo fotovoltaico [W]

V_{oc} - Tensione ai morsetti del modulo illuminato a circuito aperto [V]

$V_{mpp,@OPC}$ - Tensione ai morsetti del modulo illuminato a circuito chiuso e al punto di massima potenza @OPC [V]

$I_{mpp,@OPC}$ - Corrente generata dal modulo illuminato a circuito chiuso e al punto di massima potenza, @OPC [A]

$I_{sc,@OPC}$ - Corrente di corto circuito generata dal modulo illuminato @OPC [A]

$P_{irr,@OPC}$ - Valore di potenza specifica incidente sul modulo fotovoltaico. [W]

alfa - Coefficiente correttivo % della corrente che tiene conto della sua variazione con la temperatura

beta - Coefficiente correttivo % della tensione che tiene conto della sua variazione con la temperatura

tol tolleranza sulla potenza nominale [W]

T Temperatura [°C]

INTRODUZIONE

Durante l'ordinario svolgimento delle attività di installazione e manutenzione degli impianti fotovoltaici è necessario controllare che i singoli moduli garantiscano le prestazioni di targa e, cioè, non presentino deficit di efficienza, fuori tolleranza rispetto a quanto dichiarato e garantito dal costruttore.

Sono sempre più numerosi gli episodi per cui un impianto fotovoltaico, benché perfettamente installato e correttamente mantenuto, presenti una produzione di energia inferiore alle attese, la cui causa non è di facile individuazione. Ciò è del tutto comprensibile se si considera che il malfunzionamento dell'intero impianto dipende, nella maggior parte dei casi, da quello di una percentuale ridottissima di moduli.

I moduli in serie costituiscono le stringhe; l'inefficienza di un singolo modulo abbatte quella dell'intera stringa, quella di una stringa limita quella di altre in parallelo, con il risultato di una riduzione della produzione energetica dell'intero impianto.

A meno che non si tratti di guasti evidenti, individuabili con ispezione visiva, come il caso di cornice, vetro, tedlar, scatola di giunzione, cavi e connettori danneggiati o il cosiddetto fenomeno di *hot spot* (caso in cui una cella fotovoltaica presenti una resistenza interna considerevolmente più elevata delle altre con cui è in serie, determinando una limitazione al passaggio della corrente e contemporaneamente punto caldo di dissipazione della potenza []), l'attività diagnostica è complicata dalla presenza di molteplici fattori tra i quali grande importanza rivestono le condizioni ambientali. Sulle prestazioni hanno, infatti, effetto determinante la radiazione solare incidente istantanea sul piano dei moduli e la temperatura effettiva delle celle.

Quando non è possibile individuare facilmente il modulo guasto è allora inevitabile sottoporre i singoli moduli a verifica. A questo scopo, si è progettato e realizzato un simulatore solare innovativo, qui descritto allo stadio prototipale, facilmente trasportabile per analisi *in situ*, atto a verificare con precisione le prestazioni di un modulo fotovoltaico in condizioni operative di funzionamento note e controllate, perfettamente riconducibili a quelle di riferimento dichiarate dal costruttore.

IL SIMULATORE SOLARE

In assenza di guasti evidenti è indispensabile ricorrere a un test che consenta di ricostruire in condizioni operative tipiche la curva caratteristica corrente tensione (I-V) del singolo modulo e di normalizzarla secondo le condizioni standard di prova dichiarate dal produttore (STC, radiazione solare pari a 1000 W/m², AM 1,5 e temperatura di cella di 25°C). Questo compito è svolto dal simulatore solare mobile sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca "SIMULATORE SOLARE MOBILE E VERIFICA DI PRODUCIBILITÀ DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI", condotto dalla capofila GEATECNO Srl di Modugno (BA) e dal L.A.SER.INN Scarl (già Centro laser Scarl) di Valenzano (BA) e finanziato a valere sui fondi P.O. PUGLIA FESR 2007-2013 Linea 1.2 – Azione 1.2.4 Bando "Aiuti a Sostegno dei Partenariati Regionali per l'Innovazione".

In commercio esistono già varie tipologie di simulatori solari, principalmente pensati e realizzati, tuttavia, per soddisfare le esigenze produttive di collaudo di fine linea. Con essi è infatti effettuato il cosiddetto *flash test*, cioè il test in coda a tutte le operazioni di produzione che consente di classificare per la vendita il singolo modulo fotovoltaico in base alle sue prestazioni. Si tratta di strumenti di tipo industriale, molto veloci, ingombranti, che richiedono ingenti potenze di alimentazione e che forniscono risultati accuratissimi e certificati. Essi, però, presentano, tuttavia, costi proibitivi e non consentono la trasportabilità e la misura *in loco*.

L'esigenza delle aziende che curano l'installazione e la manutenzione degli impianti fotovoltaici è, al contrario, quella di disporre di una strumentazione per la verifica delle prestazioni dei moduli fotovoltaici che presenti requisiti di economicità, compattezza, sufficiente accuratezza, facile trasportabilità e assorbimenti elettrici contenuti.

La soluzione qui proposta è basata sull'utilizzo di una sorgente luminosa sviluppata *ad hoc* composta da LED (*light emitting diode*, diodi ad emissione luminosa) tra i più efficienti e durevoli attualmente disponibili sul mercato. Con la matrice led realizzata si è in grado di illuminare il modulo fotovoltaico con un adeguato livello di radiazione luminosa, molto vicino alle caratteristiche dello spettro solare, perfettamente rispondente alle specifiche necessarie per effettuare prove accurate e significative.

La progettazione e la conseguente realizzazione del prototipo di ricerca hanno risolto le difficili problematiche legate alle dimensioni, alla potenza, all'emissione spettrale, alla generazione e alla geometria del fascio luminoso (cono di illuminazione). Dopo un'analisi approfondita di quanto disponibile in commercio, la scelta è ricaduta su *strip led* SMD (strisce adesive con led miniaturizzati montati sulla superficie, fig. 1) fornite in bobine, con densità pari a 60 [led/m], assorbimento specifico di 12 [W/m], efficienza di 115 [lm/W], angolo di emissione di 120°, durata tipica 100.000 [h].



- * SMD LED 2835 with high brightness of 21-23 lm / LED
- * thermal pads (also called thermally conductive pad) on the underside of LEDs aid the conduction of heat away from the component providing longer life and high lumen output
- * reinforced, double-sided FPC
- * life time over 100 000 hours
- * fast and easy installation with 3M adhesive tape
- * no UV emission
- * wide viewing angle (120°)
- * low energy consumption 12W/m - 115 lm/W
- * high flexibility
- * cutting section: 50 mm / 3 LEDs

Figura 1 – La bobina di led utilizzati per la realizzazione del simulatore solare mobile

Forma e dimensione della matrice (1,00 x 1,80 [m x m]) sono state scelte per consentire l'analisi dei più diffusi moduli fotovoltaici.

Il sistema elettrico di alimentazione è stato opportunamente progettato e realizzato per garantire i corretti valori di tensione e corrente ai 12.720 led impiegati, per tutto il tempo necessario alla misura (circa 30 [s]) con altissimi livelli di stabilità e ripetibilità.

La sorgente è stata installata in un rack realizzato con profili strutturali in alluminio (scelti per resistenza e leggerezza in funzione della trasportabilità), pannelli di chiusura in acciaio verniciato a polveri e ruote in gomma con fermo.

Al di sotto della matrice, il rack presenta un'apposita tasca per l'alloggiamento del modulo fotovoltaico da testare, provvista di regolazione in altezza mediante manovellismo manuale atta a garantire stessa distanza dalla sorgente al variare dei modelli.

Per il rilievo dei valori elettrici di tensione e corrente e quindi per la determinazione della curva caratteristica del modulo si è utilizzata la strumentazione HT Solar I-V 400. Si tratta di un apparecchio certificato per questa tipologia di prove (CEI 82-25, IEC/EN60891) che, una volta collegato al modulo da testare, consente la rilevazione puntuale della curva nelle condizioni di misura (potenza irradiata e temperatura di cella) mediante variazione della resistenza da valore nullo (condizioni di corto circuito ($V=0, I=I_{sc}$) a valore infinito ($V=V_{oc}, I=0$) passando per le condizioni di massimo assoluto (I_{mpp}, V_{mmp}).

In tabella 1 si riportano le caratteristiche dello strumento.

Tabella 1 . Le caratteristiche dell'HT Solar I-V 400

Simbolo	Descrizione	Range	Risol.	Condizioni
Nms	Numero moduli per stringa	1 ÷ 50	1	
Pmax	Potenza massima nominale del modulo	50 ÷ 3200W	1W	$\frac{P_{max} - V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{P_{max}} \leq 0.01$
Voc	Tensione a vuoto	15.00 ÷ 99.99V 100.0 ÷ 320.0V	0.01V 0.1V	$V_{oc} \geq V_{mpp}$
Vmpp	Tensione nel punto di massima potenza	15.00 ÷ 99.99V 100.0 ÷ 320.0V	0.01V 0.1V	$V_{oc} \geq V_{mpp}$
Isc	Corrente di cortocircuito	0.5 ÷ 9.99A	0.01A	$I_{sc} \geq I_{mpp}$
Impp	Corrente nel punto di massima potenza	0.5 ÷ 9.99A	0.01A	$I_{sc} \geq I_{mpp}$
Toll -	Tolleranza negativa per la Pmax fornita dal costruttore del modulo	0% ÷ 25.0% 0 ÷ 99W	0.1% 1	$100 \cdot Tol / P_{nom} < 25$
Toll +	Tolleranza positiva per la Pmax fornita dal costruttore del modulo	0 ÷ 25% 0 ÷ 99W	0.1% 1	$100 \cdot Tol / P_{nom} < 25$
Alpha	Coefficiente di temperatura Isc	-0.100 ÷ 0.100%/°C -9.99 ÷ 9.99mA/°C	0.001%/°C 0.01mA/°C	$0.1 \cdot Alfa / I_{sc} \leq 0.1$
Beta	Coefficiente di temperatura Voc	-0.99 ÷ -0.01%/°C -0.999 ÷ 0.001V/°C	0.01%/°C 0.001V/°C	$100 \cdot Beta / V_{oc} \leq 0.999$
Gamma	Coefficiente di temperatura Pmax	-0.99 ÷ -0.01%/°C	0.01%/°C	
NOCT	Temperatura nominale di lavoro della cella	0 ÷ 100°C	1°C	
Tech.	Effetti dovuti alla tecnologia del modulo	STD (standard), CAP (eff.capacitivi)		
Rs	Resistenza serie interna	0.00 ÷ 10.00Ω	0.01Ω	

I-V: Tensione DC @ OPC

Campo [V] (***)	Risoluzione [V]	Incertezza (***)
5.0 ÷ 999.9	0.1	±(1.0%lettura + 2cifre)

I-V: Corrente DC @ OPC

Campo [A]	Risoluzione [A]	Incertezza
0.10 ÷ 10.00	0.01	±(1.0%lettura + 2cifre)

I-V: Potenza DC @ OPC ($V_{mpp} > 30V, I_{mpp} > 2A$)

Campo [W] (*, **)	Risoluzione [W]	Incertezza
50 ÷ 9999	1	±(1.0%lettura + 6cifre)

Irraggiamento (con cella di riferimento)

Campo [mV]	Risoluzione [mV]	Incertezza
1.0 ÷ 100.0	0.1	±(1.0%lettura + 5cifre)

Temperatura (con sonda di tipo PT1000)

Campo [°C]	Risoluzione [°C]	Incertezza
-20.0 ÷ 100.0	0.1	±(1.0%lettura + 1°C)



Figura 2 L'HT Solar I-V 400

LA CONDUZIONE DELLA PROVA SUL MODULO FOTOVOLTAICO

L'esecuzione della prova prevede il rilievo della curva caratteristica di funzionamento (I-V) del modulo fotovoltaico nelle condizioni rilevate e definite di intensità dell'energia incidente sul modulo (radiazione emessa dai led e tempo di accensione) e temperatura di cella.

Il modulo da testare, preliminarmente pulito, è collocato nell'apposito alloggiamento del simulatore, regolandone la distanza dalla matrice led su valore predefinito. Si installa, poi, sulla parte posteriore la sonda di temperatura facendo in modo che sia posizionata al centro di una cella. Si provvede, quindi, ad allineare il sensore di radiazione in modo che sia complanare alla superficie del modulo, così da rilevare esattamente la stessa radiazione che ne incide la superficie attiva. Si collegano allo strumento HT i connettori del modulo, della sonda di temperatura e del sensore radiometrico e si provvede a fornire alimentazione al quadro elettrico del simulatore, da rete se il test è effettuato in laboratorio, da generatore se effettuato in campo. Prima dell'esecuzione della prova è necessario inserire nel dispositivo HT, i dati di targa del modulo fotovoltaico da testare, così come notificati dal costruttore in condizioni STC, $V_{oc@STC}$, $I_{sc@STC}$, $V_{mpp@STC}$, $I_{mpp@STC}$, $P_{mpp@STC}$, alfa, beta, nonché l'eventuale tolleranza percentuale sulla potenza nominale: questa fase preliminare è indispensabile per il confronto tra quanto verrà rilevato in fase di misura e quanto dichiarato dal produttore.

Si imposta, quindi, lo strumento HT in posizione di test e si attiva la sorgente del simulatore; non appena, dopo qualche secondo, si stabilizzano i valori di potenza irradiata e temperatura, si procede con la misura. Il dispositivo, in automatico, chiude il circuito su una resistenza variabile il cui valore è regolato in continuità da infinito a zero; le grandezze così rilevate ($V_{oc@OPC}$, $I_{sc@OPC}$, $V_{mpp@OPC}$, $I_{mpp@OPC}$, $P_{mpp@OPC}$, $I_{@OPC}$, $V_{@OPC}$, $P_{@OPC}$) sono memorizzate e plottate su display. Trattasi di curve reali, in condizioni OPC, non immediatamente confrontabili con quelle dichiarate dal costruttore in condizioni STC. La traslazione delle curve dalle condizioni OPC alle condizioni STC è effettuata numericamente dallo strumento HT secondo la norma IEC/EN60891; dalla comparazione della curva misurata e riportata in condizioni STC con quella dichiarata è quindi possibile verificare se il modulo testato è correttamente funzionante e rispetta quanto notificato dal produttore in termini di prestazioni assolute e di decadimento nel tempo.

La strumentazione fornisce su display esito immediato del test per cui nella pratica di prova le operazioni si succedono semplicemente e sono pienamente compatibili con l'operatività e la capacità dei manutentori ordinariamente chiamati ad effettuare le ispezioni sugli impianti.

Tutti i dati delle prove effettuate sono esportabili su PC tramite apposita interfaccia hardware e software, consentendone un'analisi più accurata e l'archiviazione.

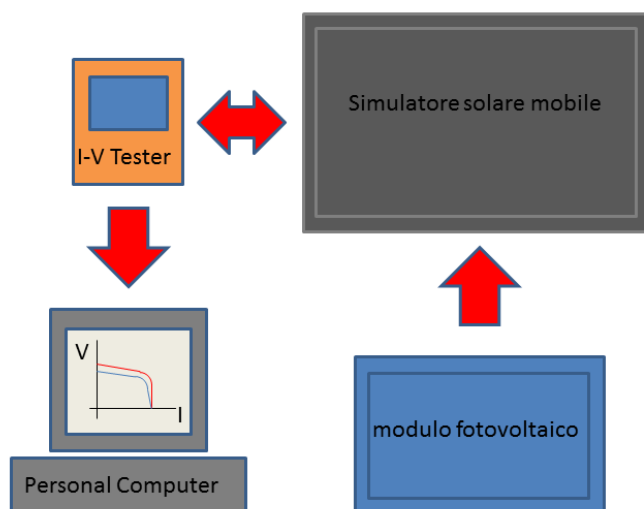


Figura 3- Schema del sistema di misura che impiega il simulatore solare mobile

I TEST DI FUNZIONAMENTO

Nelle figure 4-5 e 6-7 sono messi a confronto gli output grafici di prove effettuate al simulatore solare su moduli con gli stessi dati di targa e dello stesso fornitore, l'uno regolarmente funzionante, l'altro difettoso: trattasi di modulo fotovoltaico largamente diffuso, 60 celle, in silicio policristallino, di potenza nominale P_{nom} 250 W_p.

La prima coppia di grafici (figg. 4,5) è relativa al modulo correttamente funzionante: essa evidenzia una quasi perfetta sovrapposizione tra le curve I-V e P rispettivamente rilevate e dichiarate. Le piccole differenze riscontrabili dal confronto tra le prestazioni nominali e quelle operative nel senso di una sovra-performance del modulo, sono legate alla tolleranza positiva che lo stesso produttore dichiara per il suo modulo. La curva descrive il comportamento del pannello illuminato @STC al variare della resistenza esterna di carico. E' riconoscibile il valore della potenza massima prodotta ($P_{mmp@STC} = P_{max} = P_{nom}$) oltre il quale la prestazione del modulo decade. In tabella 2 sono riportati i principali valori misurati @OPC, @STC e nominali: si nota, evidenziato in verde, il valore di P_{max} maggiore di P_{nom} .

La seconda coppia di grafici (figg. 6,7) è relativa al modulo danneggiato: essa mostra una chiara differenza tra le curve di prestazione nominale e misurata (sia in termini di potenza prodotta, sia in termini di corrente e tensione) e consente di concludere certamente per il malfunzionamento del modulo. E' questo il caso in cui il simulatore solare trova la sua migliore applicazione, in quanto se si fosse proceduto, come di prassi, alla verifica con multimetro dei soli valori di V_{oc} e I_{sc} non si sarebbe identificato il guasto; a seguito di analisi condotta in laboratorio è risultato che una cella presentava valore di resistenza interna troppo elevato, chiaro sintomo di difetto di costruzione. D'altra parte, come riportato in tabella (3), la $P_{max@STC}$ (evidenziata in rosso) risulta sensibilmente inferiore alla P_{nom} e circa pari a 2/3: ciò si spiega considerando l'effetto dei diodi di

bypass presenti nella scatola di giunzione che hanno la funzione specifica di consentire il passaggio di energia anche quando una delle tre serie di celle del modulo è interrotta o limitata in potenza a causa di ombreggiamento o guasto.

In figg. 8 e 9 sono riportati i grafici relativi ad un altro modulo fotovoltaico malfunzionante; l'andamento delle curve I-V e P rilevate e dichiarate è sensibilmente diverso, sintomo che il modulo fosse seriamente danneggiato. Anche qui, qualora si fosse proceduto ad un test con il solo multimetro per la misura di V_{oc} e I_{sc} si sarebbe incorso in errore, in quanto i valori rilevati sarebbero risultati allineati a quelli di targa; è questo un altro caso in cui l'impiego del simulatore solare ha consentito di identificare con certezza il guasto, dovuto a difetti in più celle. Dai valori riportati in tabella (4), infatti, si evince che la P_{max} è circa pari a 1/3 della P_{nom} , indice che due delle tre serie del modulo sono improduttive.

Geatecno Srl è ora in grado di impiegare il simulatore solare mobile che intende ingegnerizzare nella sua forma finale, ogni qualvolta si verificano significative riduzioni di prestazione sugli impianti; quando tutti i principali componenti diversi dai moduli fotovoltaici (inverter, quadri, sezionatori, cavi) non presentano anomalie, il simulatore sarà un efficace ed indispensabile strumento di diagnosi in grado di individuare rapidamente il problema. Geatecno Srl ne potrà fare uso anche quando le riduzioni di funzionalità saranno di entità minore per riscontrare eventuali difformità da quanto dichiarato e garantito dal produttore nel fisiologico decadimento di prestazioni.

A fronte di una significativa casistica di rilievi presso i numerosi impianti fotovoltaici installati e mantenuti da Geatecno Srl, l'utilizzo del prototipo ha consentito ad oggi di individuare con successo il malfunzionamento di un centinaio di moduli su circa 300 impianti con un notevole risparmio sui tempi e sui costi di manutenzione.

CONCLUSIONI

Il simulatore solare mobile, così come realizzato, si è dimostrato un ottimo strumento a supporto delle sempre più frequenti operazioni di verifica del corretto funzionamento degli impianti fotovoltaici che Geatecno Srl effettua sugli impianti che ha installato, nell'ambito dell'applicazione delle garanzie e dello svolgimento delle manutenzioni. La facilità, l'affidabilità e la versatilità di impiego, inclusa la facile trasportabilità, costituiscono un elemento di vantaggio competitivo nel panorama alquanto variegato dei competitors. Ad oggi sono state effettuate con successo numerose prove che hanno permesso di individuare vizi o difetti più o meno occulti di moduli fotovoltaici apparentemente in ottimo stato.

Inoltre, il simulatore è utilizzabile ai fini di un corretto confronto, anche su base statistica, tra le prestazioni di moduli provenienti da diversi produttori, nonché tra quelle dichiarate ed effettive con notevole giovamento in termini di controllo delle forniture in ingresso di un'impresa dotata di sistema di gestione della qualità aziendale.

ACKNOWLEDGEMENTS

Il lavoro oggetto di questo articolo è stato finanziato con fondi P.O. PUGLIA FESR 2007-2013 Linea 1.2 – Azione 1.2.4 Bando “Aiuti a Sostegno dei Partenariati Regionali per l’Innovazione” nell’ambito del progetto di ricerca e sviluppo sperimentale denominato “SIMULATORE SOLARE MOBILE E VERIFICA DI

PRODUCIBILITÀ DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI” e condotto dalla capofila GEATECNO Srl di Modugno (BA) e dal L.A.SER.INN Scarl (già Centro laser Scarl) di Valenzano (BA).

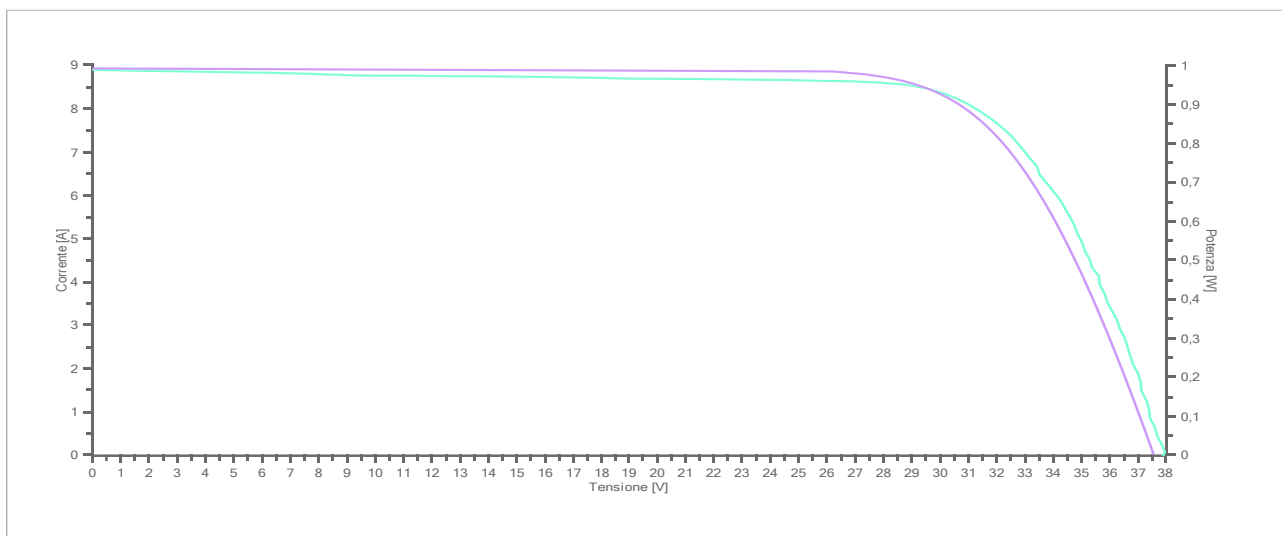


Figura 4

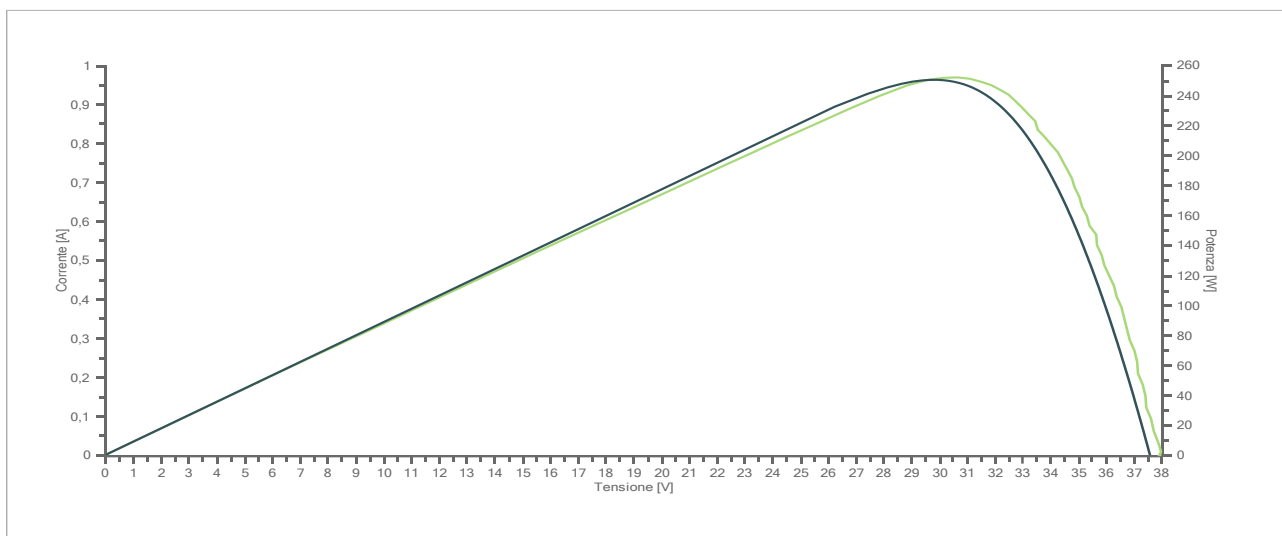


Figura 5

	P_{max}	V_{oc}	V_{mpp}	I_{mpp}	I_{sc}	Irragg.	T. Modulo	alfa	beta	tol+	tol-
Misure@OPC	127,68	35,92	29,71	4,30	4,65	524,00	31,30	0,06	-0,32	5,00	0,00
STC	251,62	37,99	30,67	8,20	8,84	1000,00	25,00	0,06	-0,32	5,00	0,00
Nominale	250,00	37,59	29,80	8,39	8,92	1000,00	25,00	0,06	-0,32	5,00	0,00

Tabella 2

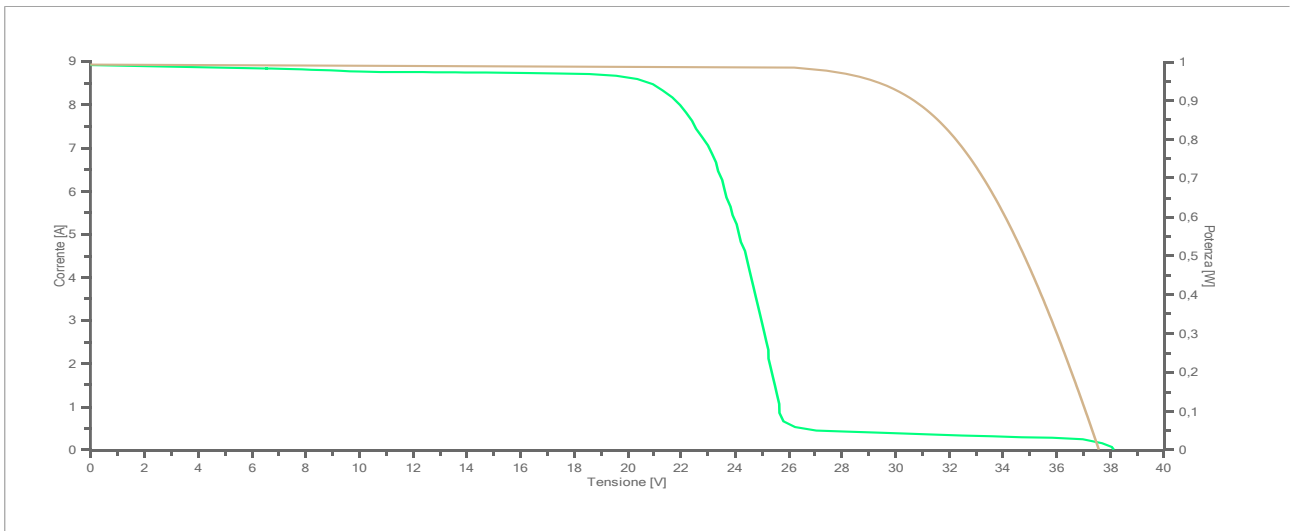


Figura 6

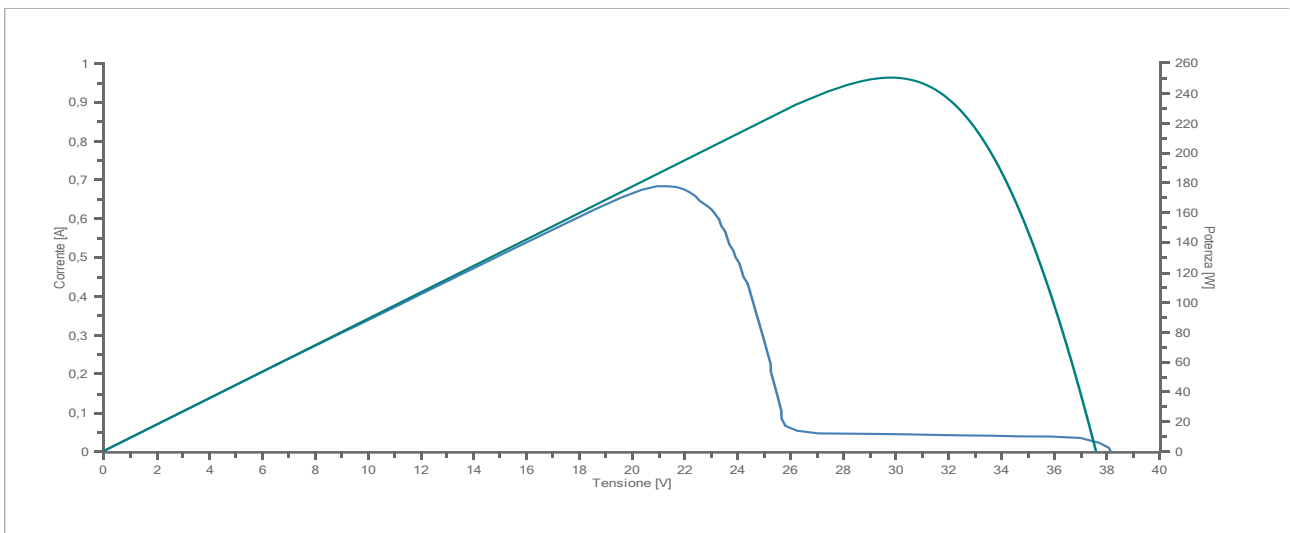


Figura 7

	P_{max}	V_{oc}	V_{mpp}	I_{mpp}	I_{sc}	Irragg.	T. Modulo	alfa	beta	tol+	tol-
Misure@OPC	84,76	35,92	19,43	4,36	4,67	524,00	32,60	0,06	-0,32	5,00	0,00
STC	177,43	38,14	21,33	8,32	8,84	1000,00	25,00	0,06	-0,32	5,00	0,00
Nominale	250,00	37,59	29,80	8,39	8,92	1000,00	25,00	0,06	-0,32	5,00	0,00

Tabella 3

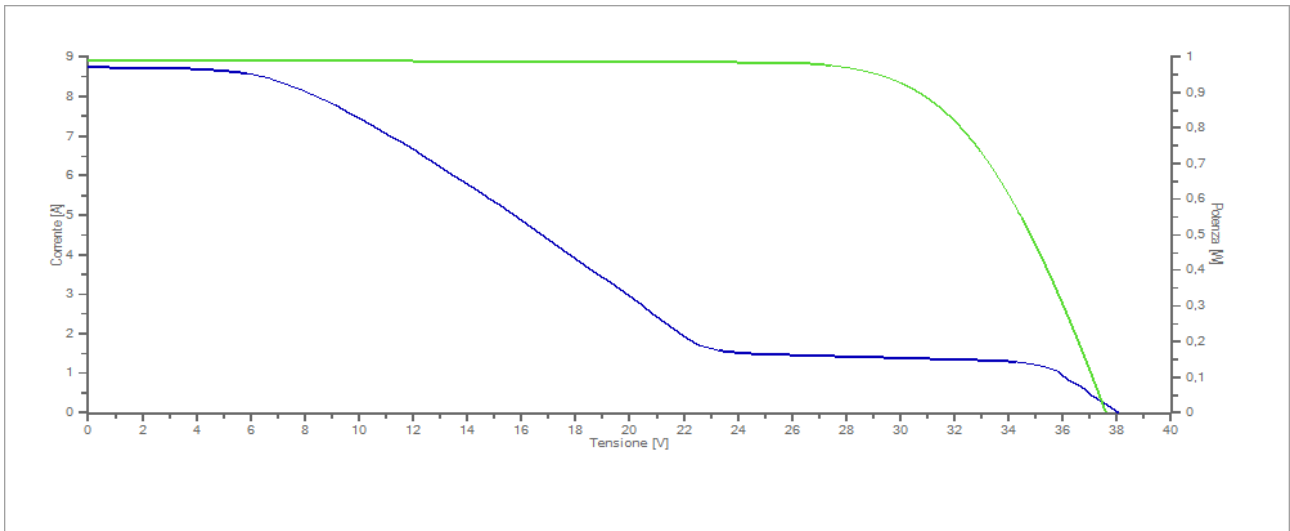


Figura 8

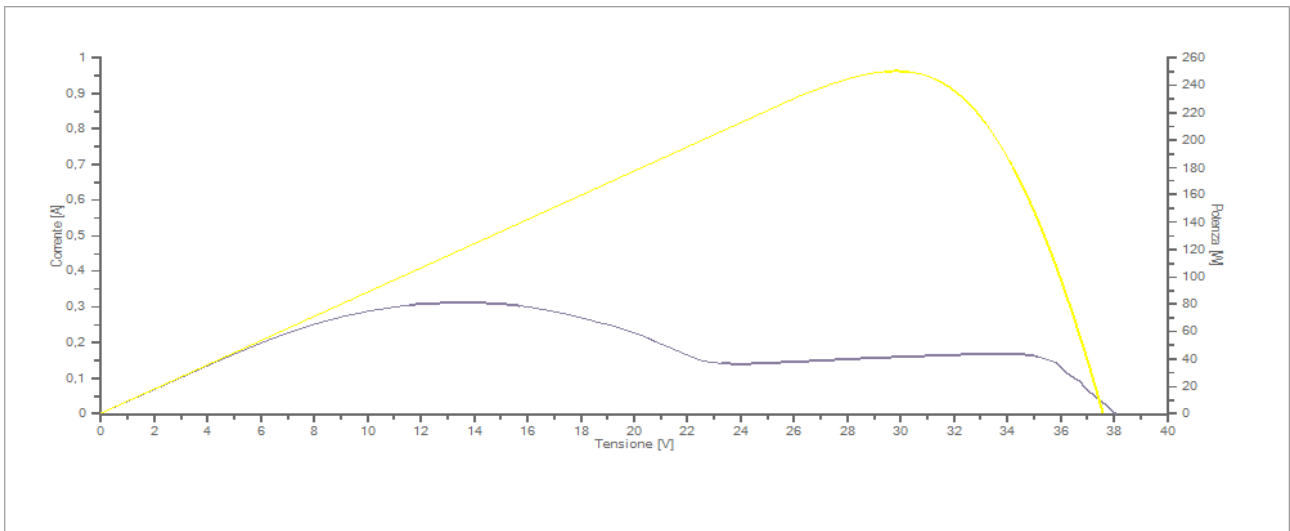


Figura 9

	P_{max}	V_{oc}	V_{mpp}	I_{mpp}	I_{sc}	Irragg.	T. Modulo	alfa	beta	tol+	tol-
Misure@OPC	84,28	35,95	19,36	4,35	4,67	524,00	31,50	0,06	-0,32	5,00	0,00
STC	80,77	38,07	13,86	5,83	8,84	1000,00	25,00	0,06	-0,32	5,00	0,00
Nominale	250,00	37,59	29,80	8,39	8,92	1000,00	25,00	0,06	-0,32	5,00	0,00

Tabella 4



Figura 10

BIBLIOGRAFIA

1. J. Wohlgemuth, W. Herrmann, **Reliability testing for PV modules**, in: Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 1994, pp. 889–892.
2. S. Kohraku, K. Kurokawa, **New methods for solar cells measurement by LED solar simulator**, WCPEC-third, 2003.
3. A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 3364–3370
4. IEC 2007 Photovoltaic Devices: Part 9. Solar Simulator Performance Requirements ed 2.0, IEC 60904-9 (Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission) IEC 2008 Photovoltaic Devices—Part 3: Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (PV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data ed 2.0, IEC 60904-3 (Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission)
5. 2013 - **Determination of solar cell electrical parameters and resistances using color and white LED-based solar simulators with high amplitude pulse input voltages**, Anon Namin, Chaya Jivacate, Dhirayut Chenvidhya, Krissanapong Kirtikara, Jutturit Thongpron - *Renewable Energy* 54 (2013) pp. 131–137
6. [3] A. Virtuani, H. Müllejans, and E. Dunlop, Comparison of Indoor and Outdoor Performance Measurement of Recent Commercially Available Solar Modules, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* (2010), DOI: 10.1002/pip.977
7. <http://www.pasan.ch/website/en/products/sun-simulators/>