

Rapporti tecnici

INGV

Misuratore di massima potenza erogabile

95



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

MISURATORE DI MASSIMA POTENZA EROGABILE

Alessandro Iarocci, Giovanni Romeo

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica)

95

Indice

Introduzione	5
1 Principio di funzionamento e caratteristiche tecniche	5
2 Schema elettrico	8
3 Alcune considerazioni sulla potenza erogata dalle celle solari	10
4 Test effettuati su pannelli solari	11
4.1 Test su pannello solare UNISOLAR FLX-11	11
4.2 Test sui pannelli solari di PEGASO	12
4.3 Test con il simulatore di pannello solare SPS	14
5 Conclusioni	15
Bibliografia	16

Introduzione

Lo strumento descritto in queste pagine è stato pensato per poter tracciare la caratteristica tensione-corrente (V-I) di un pannello solare e misurarne in ogni momento la massima potenza erogabile.

Quello che generalmente si pretende da un alimentatore, e quindi anche da un pannello solare, è che tragga il massimo dell'energia dalla sorgente primaria. Per ogni sorgente di energia elettrica vale il teorema del massimo trasferimento di potenza. Tale teorema afferma che un generatore connesso con un carico variabile R, eroga la massima potenza in corrispondenza di un solo valore del carico R. Tale valore del carico, nel caso di un pannello solare, è funzione della temperatura del pannello, dell'intensità dell'irraggiamento e dell'angolo di incidenza delle radiazioni solari [Tsuno et al. 2005]. Dunque il punto di massima potenza varia di continuo con le condizioni ambientali. Un sistema in grado di trovare e mantenere tale punto di lavoro si dice ad inseguimento del punto di massima potenza o MPPT (Maximun Power Point Tracking).

Il misuratore di massima potenza che presentiamo produce un carico variabile in grado di esplorare la curva V-I del pannello e contiene un algoritmo ad inseguimento per la misura istantanea della massima potenza erogabile.

1. Principio di funzionamento e caratteristiche tecniche

Nel misuratore di massima potenza il componente che consente di ottenere un carico variabile è semplicemente un MOSFET di potenza. Il principio di funzionamento è illustrato nella fig. 1. Lo spostamento del punto di lavoro, che determina il valore del carico, si ottiene variando la tensione gate-source del MOSFET; infatti la corrente che fluisce tra il drain ed il source di un MOSFET è controllata dalla tensione presente sul gate. Tale tensione, di valore continuo, è ottenuta filtrando opportunamente un segnale PWM (Pulse Width Modulation) generato da un microcontrollore. Questa è una tecnica molto comoda per produrre un segnale in tensione continua da un microprocessore evitando l'uso di un convertitore digitale-analogico. Infatti il valor medio di un segnale binario 0-Vmax, di periodo T, è $V_{max} * D$; dove D (duty-cycle) è il rapporto tra il tempo (in un periodo) in cui il segnale vale Vmax e il periodo T. In pratica ciò che si fa è convertire un segnale periodico ad onda quadra, il PWM, in uno equivalente di valore continuo adatto a pilotare il gate del MOSFET.

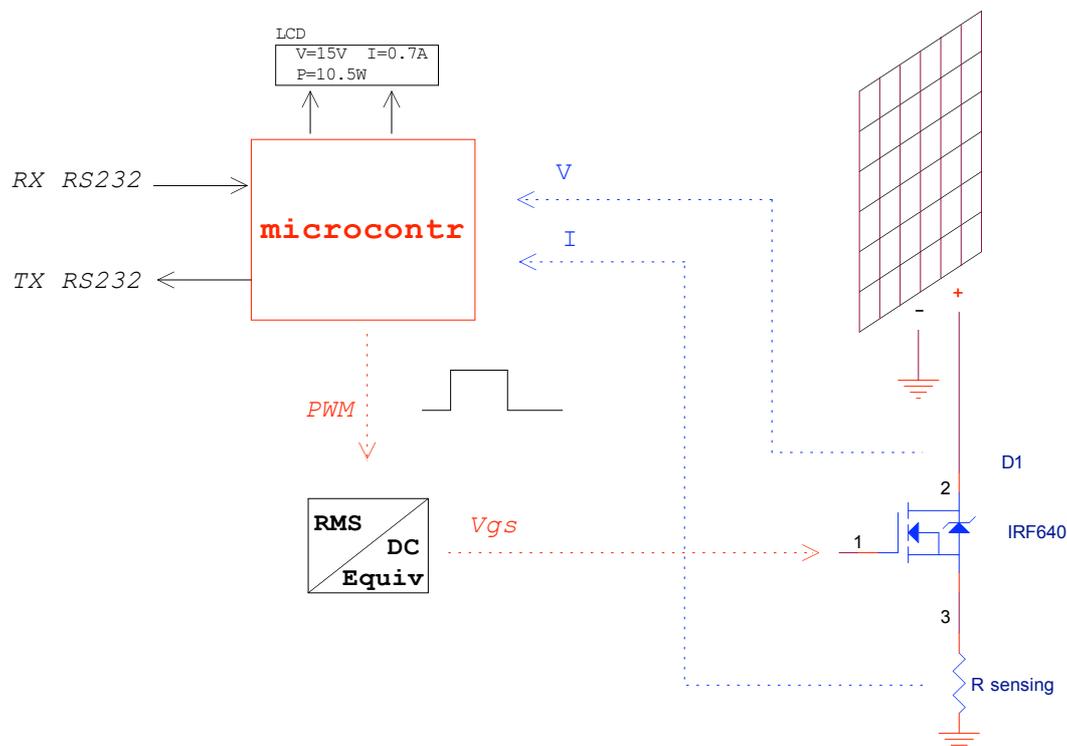


Figura 1 Principio di funzionamento del misuratore di massima potenza.

Il misuratore ha due diverse modalità di funzionamento: *sweep* e *mppt*.

- Modalità di funzionamento *sweep*.

Si usa quando si vuole determinare la caratteristica V-I di un pannello solare: il duty cycle del segnale PWM viene fatto variare da zero a uno. Si ottiene così un valore della resistenza di carico variabile da infinito (condizione di circuito aperto) a circa zero (condizione di corto circuito). Circa zero in quanto, se il duty cycle del PWM è pari ad uno, il pannello solare risulta chiuso in realtà sulla resistenza $R_{ds(on)}$ del MOSFET (0.14Ω) e sulla resistenza di shunt (0.1Ω).

- Modalità di funzionamento *mppt*.

Questa modalità consente il calcolo della massima potenza erogabile dal pannello. L'algoritmo utilizzato è quello noto come "perturba ed osserva" [Joe-Air Jiang et al. 2005]. Esso risulta di facile implementazione, di elevata affidabilità e fornisce buoni risultati in condizioni stabili di irraggiamento solare (le stesse a cui sono stati effettuati i test qui presentati). Al contrario, in condizioni di irraggiamento fortemente variabili, a seguito delle oscillazioni attorno al punto di massima potenza che l'algoritmo induce sul sistema, si hanno perdite di potenza non trascurabili.

Il metodo consiste nel perturbare il punto di lavoro, valutare la variazione di potenza erogata che ne consegue, quindi stabilire il segno e l'ampiezza della perturbazione successiva. La perturbazione viene indotta sul sistema variando il duty cycle D del segnale di PWM: ciò determina lo spostamento del punto di lavoro del MOSFET. Il diagramma di flusso dell'algoritmo è mostrato in fig. 2. La potenza $P(k)$ calcolata all'iterazione k-esima, come prodotto della tensione $V(k)$ e della corrente $I(k)$ (fig. 7), viene comparata con quella calcolata all'iterazione precedente $P(k-1)$: se risulta maggiore, si continua a perturbare il sistema nella stessa direzione, in caso contrario la perturbazione si muoverà in direzione opposta.

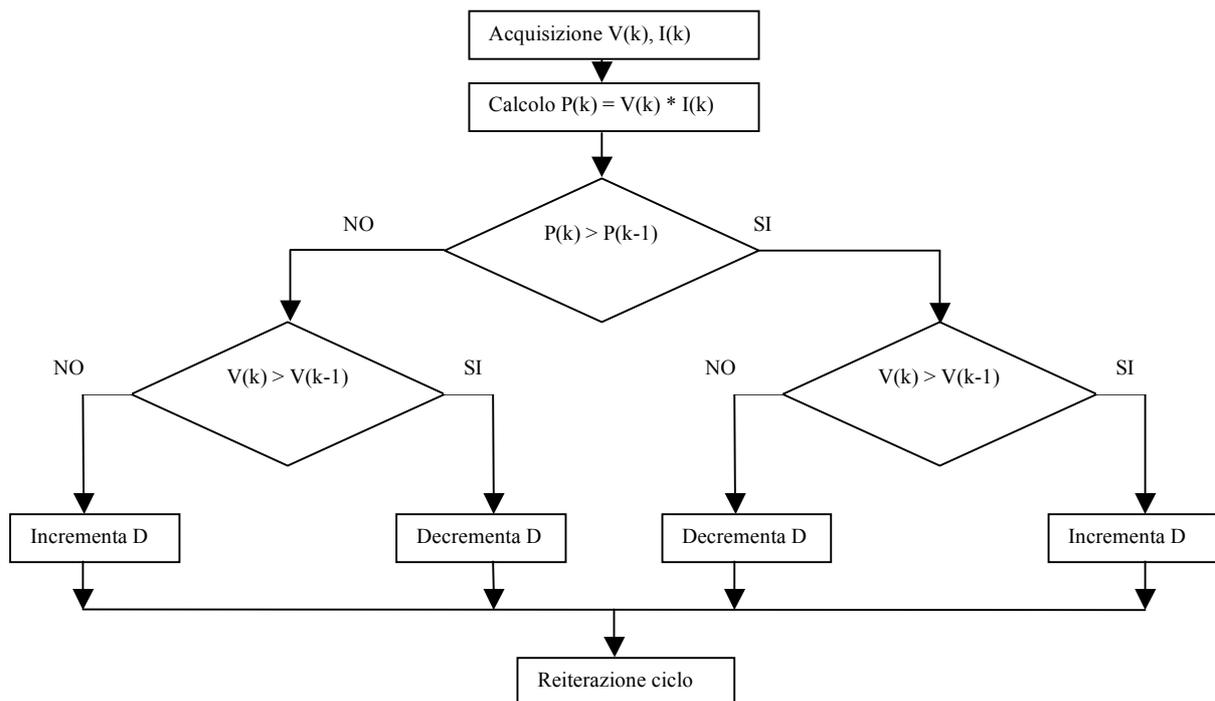


Figura 2 Diagramma di flusso dell'algoritmo "perturba ed osserva".

Il misuratore di massima potenza è dotato di un display LCD che consente la visualizzazione delle telemetrie della scheda (V, I, Temperatura) e della potenza erogata dal pannello. Tali parametri possono essere acquisiti real-time anche da PC tramite interfaccia seriale RS-232.

Lo strumento è stato pensato per essere utilizzato per misure puntuali su pannelli aventi potenze fino a 10W. L'errore di misura risulta pari a: 0,39% (1/255).

Per potenze superiori, o per misure continuative, si deve dotare il MOSFET di appropriato dissipatore e di sistema di raffreddamento. In questo caso vanno considerati i limiti elettrici e termici del modello IRF640 utilizzato, che sono di seguito riportati:

- Corrente continuativa nel drain: 18 A (con temperatura del contenitore di 25 °C);
- Tensione di *Breakdown* tra *drain* e *source*: 200V;
- Massima potenza dissipabile: 125 W (con temperatura del contenitore di 25 °C);
- Fattore di *derating* della dissipazione del calore: 1 W/°C;
- Resistenza termica giunzione/contenitore: 1 °C/W;
- Resistenza termica giunzione/ambiente: 62 °C/W.

2. Schema elettrico

Il circuito del misuratore di massima potenza, (fig. 4), è basato sull'uso di un microcontrollore (MCU) PIC16F877A (U1).

Esso consente:

- la conversione analogico-digitale delle grandezze d'ingresso (corrente e tensione del pannello);
- il calcolo del PWM per le modalità di funzionamento *mppt* e *sweep*;
- l'interfacciamento del dispositivo, tramite protocollo RS-232 (U3), con un PC;
- la visualizzazione, tramite un display (U2), dei valori delle grandezze misurate.

Il pannello solare è collegato tra la porta + gen ed il riferimento gnd (connettore JP1). I regolatori lineari di tensione U6 ed U7 forniscono i livelli di alimentazione per la MCU e per tutta la circuiteria presente; essi ricevono in ingresso una sorgente di tensione esterna di 12V (connettore JP1). Il connettore J1 consente la programmazione della MCU. Le grandezze di ingresso, corrente e tensione del pannello solare, vengono acquisite rispettivamente da: shunt R15 ed operazionale U4B, partitore R16-R17 ed operazionale U5A.

Nella modalità di funzionamento *mppt*, la MCU calcola il valore aggiornato del duty-cycle del PWM (frequenza di 5 KHz) che permette l'inseguimento del punto di massima potenza. Il convertitore PWM-tensione continua è formato da R9, R10 e C3. Il segnale di PWM, prima di giungere sul gate del MOSFET, incontra uno stadio di filtraggio passa basso (R9, C3) ed uno di amplificazione (U4A): questi due stadi consentono di ottenerne un segnale equivalente continuo (0-8 V), adatto a pilotare il MOSFET M1.

Nella modalità di funzionamento *sweep*, variando il duty-cycle del segnale PWM da 0 a 1 si ottiene per il pannello solare un carico che va da infinito (nessuna tensione di polarizzazione sul GATE del MOSFET, quindi circuito aperto) a zero (MOSFET con il canale completamente polarizzato); ne viene tracciata in questo modo la caratteristica V-I.

In fig. 3 una foto di un prototipo dello strumento.

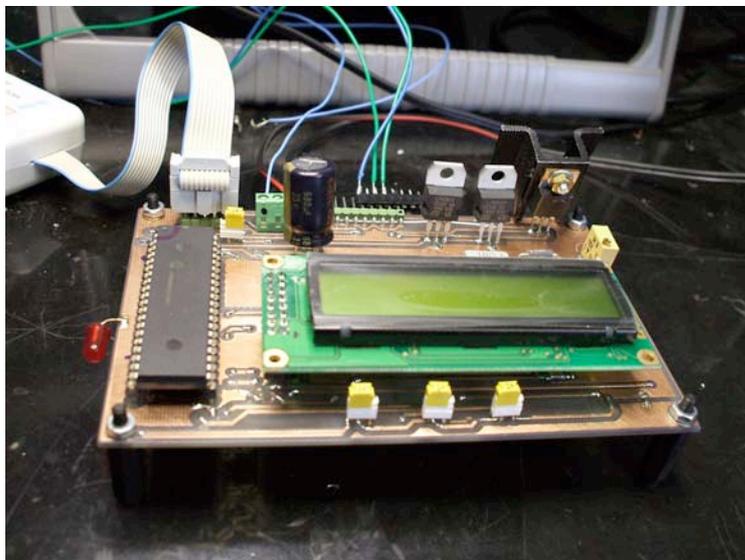


Figura 3 Un prototipo del misuratore di massima potenza.

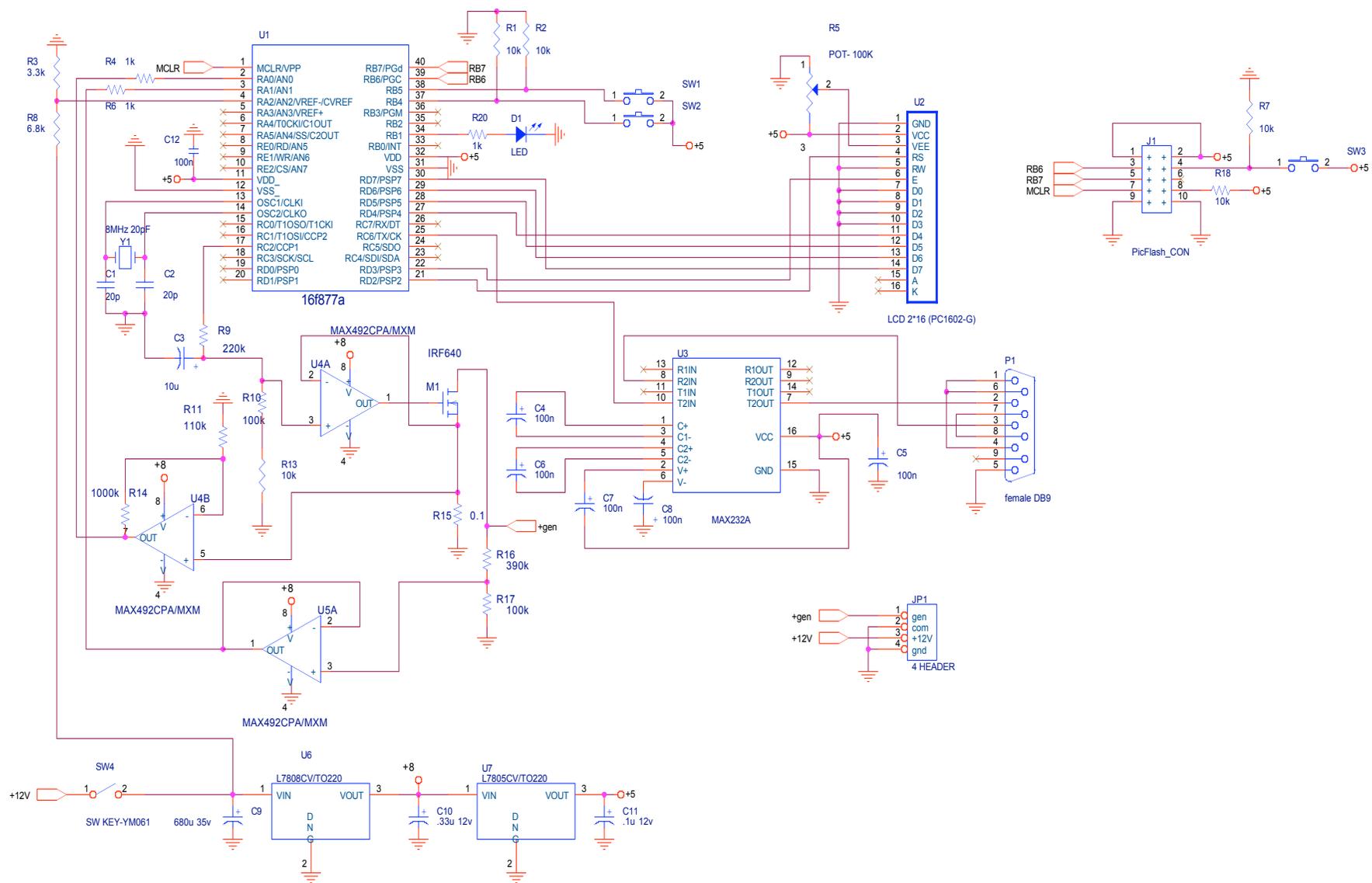


Figura 4 Schema elettrico.

3. Alcune considerazioni sulla potenza erogata dalle celle solari

Come noto una cella solare può essere schematizzata come un generatore di corrente con in parallelo un diodo (fig. 5).

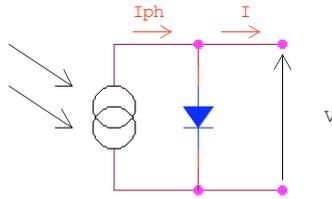


Figura 5 Circuito equivalente di una cella solare.

L'espressione della corrente I erogata dal pannello è data dalla differenza tra la corrente I_{ph} e la corrente che fluisce nel diodo:

$$I = I_{ph} - I_S \cdot (e^{V/V_t} - 1); \quad (1)$$

dove I_S è la corrente di saturazione inversa del diodo, V_t è la sua tensione termica e I_{ph} è la intensità di corrente proporzionale all'irraggiamento.

L'espressione della potenza P erogata dal pannello risulta quindi:

$$P = V \cdot I = V \cdot I_{ph} - I_S \cdot V \cdot (e^{V/V_t} - 1); \quad (2)$$

Nelle figg. 6-7 sono rappresentati i grafici delle funzioni (1) e (2), avendo assunto:

$$I_S = 10^{-15} \text{ A};$$

$V_t = 25 \text{ mV}$ (per diodi di “segnale”, temperatura ambiente di $20 \text{ }^\circ\text{C}$);

$$I_{ph} = 1 \text{ A}.$$

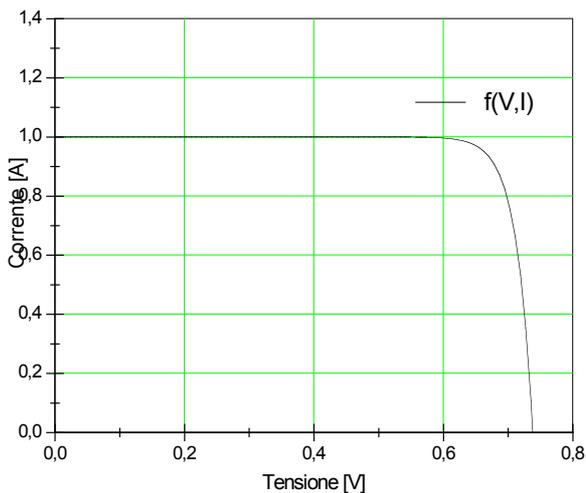


Figura 6 Grafico della funzione $I = f(V)$.

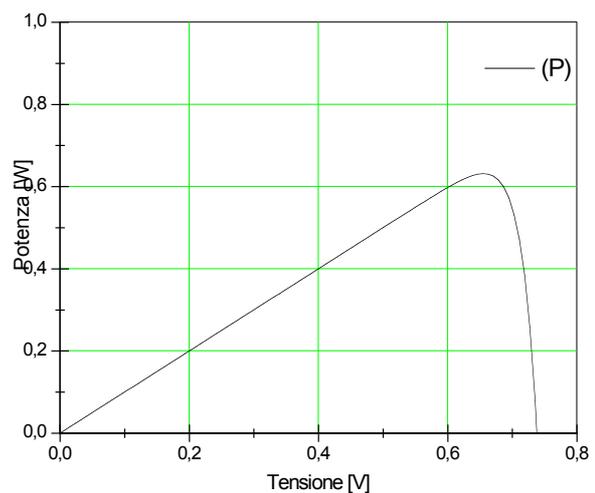


Figura 7 Grafico della funzione $P = f(V)$.

4. Test effettuati sui pannelli solari

In questo capitolo vengono presentati i risultati dei test effettuati accoppiando il misuratore di massima potenza con alcuni pannelli solari e con un simulatore di pannello solare. Scopo dei test è tracciare per ogni pannello la caratteristica V-I e la curva di potenza in determinate condizioni ambientali di volta in volta specificate.

4.1 Test su pannello solare UNISOLAR FLX-11

Il pannello solare esaminato, prodotto dalla UNISOLAR, è il modello FLX-11 (10 W). È stato scelto questo pannello perché ha trovato largo impiego in diverse applicazioni/progetti che hanno coinvolto l'INGV.

Le specifiche elettriche del pannello, fornite dal costruttore, sono basate su misure effettuate in condizioni standard di test (intensità irraggiamento 1 KW/m^2 , massa d'aria 1.5, temperatura delle celle $25 \text{ }^\circ\text{C}$) e sono:

Max Power:	10.3 W
Current Max:	0.62 A
Voltage Max:	16.5 V
Short Circuit Current:	0.78 A
Open Circuit Voltage:	23.8 V

Il test è stato effettuato il 1-10-08 alle ore 11 circa, in una giornata soleggiata leggermente velata, temperatura ambiente di circa $23 \text{ }^\circ\text{C}$, angolo di incidenza circa 90° . In tali condizioni la potenza massima che il pannello è in grado di erogare è circa 7.4 W (fig. 8).

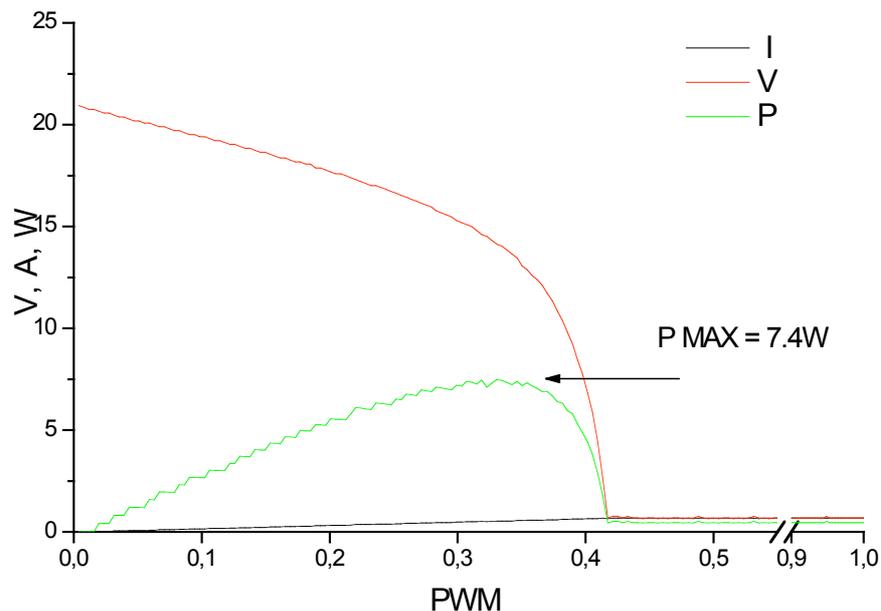


Figura 8 Caratteristica V-I del pannello UNISOLAR FLX-11, ottenuta collegando il pannello allo strumento (modalità *sweep*).

4.2 Test sui pannelli solari di PEGASO

Scopo del test è verificare se, in seguito ad irraggiamento solare in stratosfera per periodi prolungati (40 giorni), un pannello solare subisce un decadimento significativo delle prestazioni in termini di potenza erogata. Infatti nella stratosfera si trovano particelle ad alta energia, provenienti dai raggi cosmici e dal sole, che possono danneggiare le celle al silicio dei pannelli provocandone un peggioramento delle prestazioni [NATO Science Series 2003].

Il test è stato condotto su un set di tre pannelli solari (modello UNISOLAR FLX-11) che hanno circumnavigato il Polo Nord ad un'altitudine di 35 km per un periodo di circa 40 giorni. Tali pannelli facevano parte del carico utile di PEGASO [Iarocci et al. 2008], un progetto di payload stratosferico ideato e realizzato dall'INGV e dall'Università di Roma La Sapienza in collaborazione con il P.N.R.A.. Tale payload (fig. 9) utilizzava come sorgente di energia un array di pannelli solari a geometria cilindrica, per garantire un'illuminazione sicura al sistema qualunque fosse l'orientazione angolare della gondola, essendo non nota a priori la posizione del sole durante il volo.

Il test consiste nel collegare i pannelli al misuratore di massima potenza per tracciarne la caratteristica V-I e confrontarla con quella ottenuta con un analogo pannello nuovo, naturalmente a parità di condizioni ambientali (stesso livello di irraggiamento, stesso angolo di incidenza dei raggi solari e stessa temperatura ambiente).

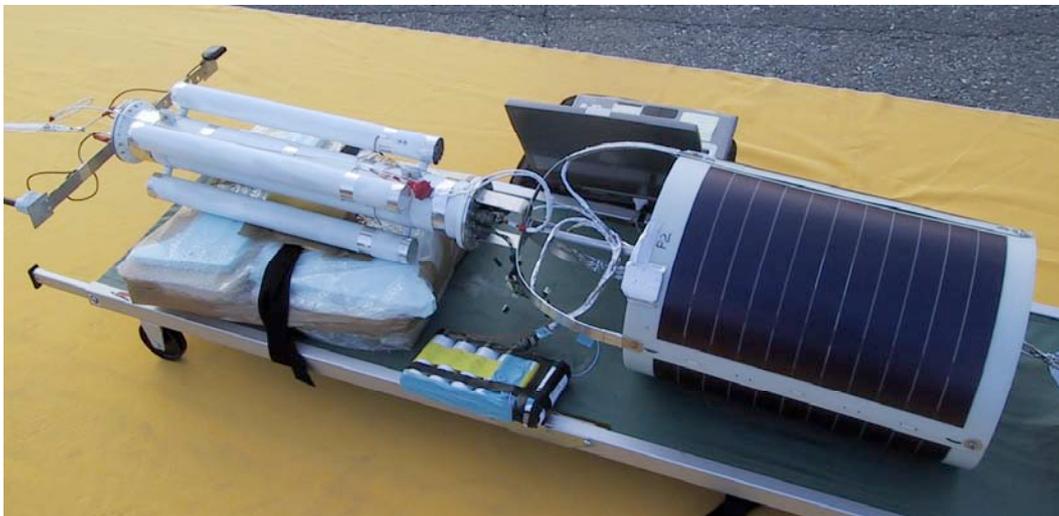


Figura 9 Il carico utile di PEGASO prima della fase di lancio. Sulla destra l'array cilindrico di pannelli solari.

Il test è stato effettuato il 30-9-08 alle ore 11:30 circa, in una giornata soleggiata leggermente velata, temperatura ambiente di circa 23 °C, angolo di incidenza di circa 90°. Come risultato della misura vengono riportate in fig. 10 le curve di potenza erogate da ciascun pannello.

Dalla loro analisi è evidente che i pannelli 1 e 3 hanno un comportamento molto simile, in termini di potenza erogata, a quello del pannello analogo (nuovo) testato nel paragrafo 4.1. Al contrario tale comportamento non si manifesta nel pannello 2, in quanto quest'ultimo risulta erogare in quelle medesime condizioni una potenza massima di 5.5 W contro valori di 7.3 W e 6.9 W ottenuti rispettivamente dal pannello 1 e dal pannello 2. Tale comportamento si spiega constatando che il pannello 2 (fig. 11) presenta delle ammaccature più marcate rispetto agli altri sulla sua superficie, che ne giustificano il suo peggioramento di efficienza. Da ciò si può concludere che l'irraggiamento nella stratosfera, a cui sono stati sottoposti i pannelli per diversi giorni, non ha provocato un deterioramento significativo delle prestazioni delle celle solari.

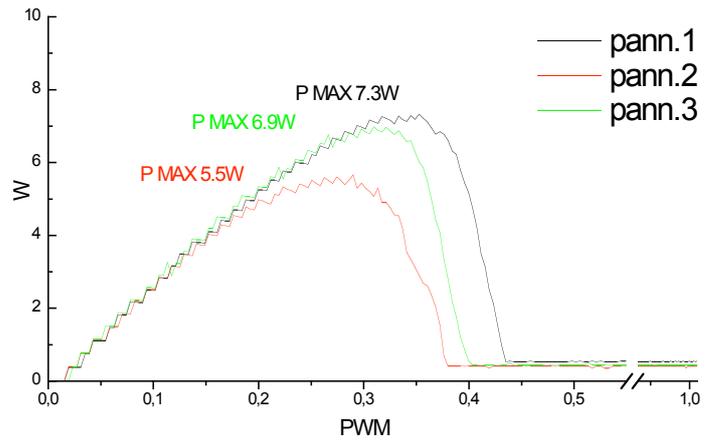


Figura 10 Foto e curve di potenza dei 3 pannelli oggetto del test.



Figura 11 Particolare del pannello 2. La freccia indica il punto del danneggiamento.

4.3 Test con il simulatore di pannello solare SPS

Il misuratore di massima potenza si è rivelato anche un utile strumento di verifica: è stato utilizzato infatti per collaudare un simulatore di pannello solare SPS [Romeo and Urbini 2008]. Quest'ultimo è un dispositivo completamente analogico che riesce a fornire in uscita la caratteristica V-I di un pannello solare; è dotato di led di segnalazione bicolori, rosso o verde che indicano la zona di lavoro in cui il pannello si trova: condizione di carico eccessivo e condizione di basso carico rispettivamente. Quando le due condizioni si verificano contemporaneamente, il pannello si trova nelle condizioni di massima erogazione della potenza. La fig. 12 mostra il comportamento del simulatore, ottenuto con simulazioni effettuate con PSpice.

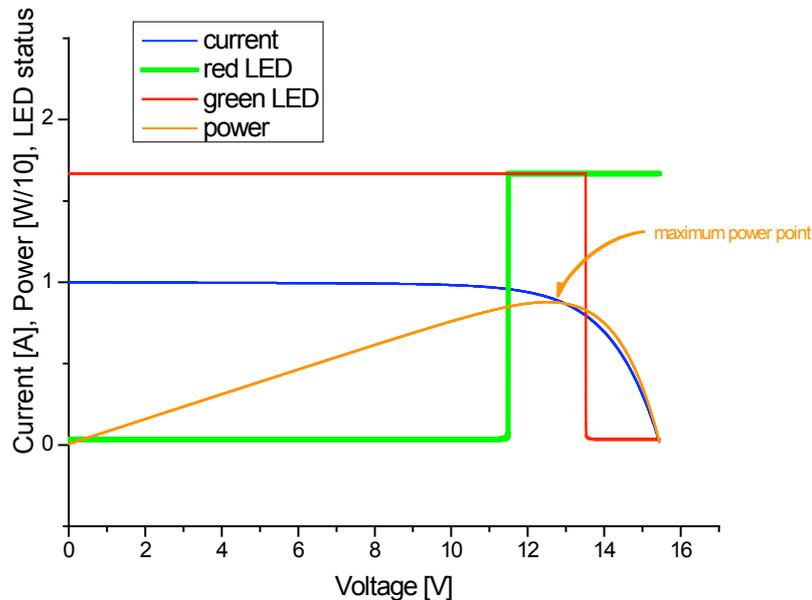


Figura 12 Comportamento del simulatore. In blu la caratteristica V-I del pannello, in arancione la curva di potenza. Led verde acceso: condizioni di basso carico; led rosso acceso: condizioni di carico eccessivo.

Per trovare un riscontro alle curve sopra esposte ottenute con simulazioni software, si è connesso il simulatore di pannello solare al misuratore di massima potenza, settato in modalità *sweep*. Il risultato del test è mostrato nella fig. 13: la caratteristica V-I e la curva di potenza del simulatore sono effettivamente quelle che la simulazione aveva mostrato.

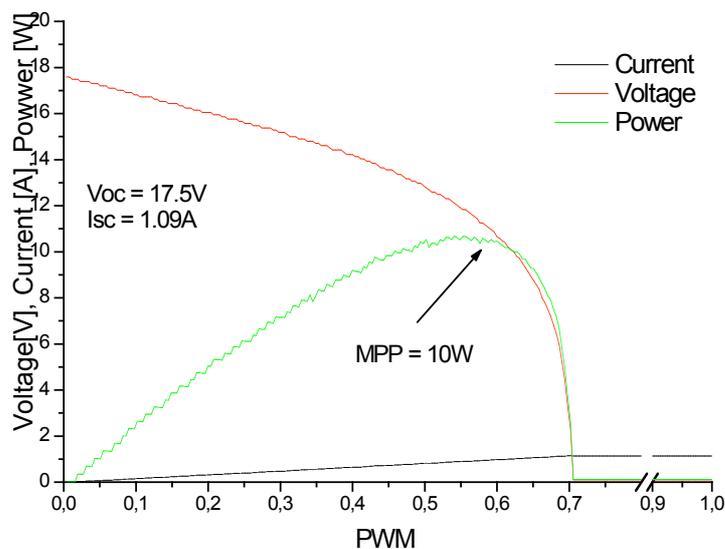


Figura 13 Caratteristica V-I del simulatore di pannello ottenuta con il misuratore di massima potenza.

5. Conclusioni

Vengono di seguito elencati i possibili impieghi e alcune caratteristiche dello strumento:

- può essere utilizzato per test comparativi: dato un set di diversi pannelli solari, di eguale potenza (fino a 10W), consente di verificare immediatamente l'efficienza di ciascuno di essi;
- durante campagne di test è utile per misurare in ogni momento qual'è la massima potenza di cui si può disporre dai pannelli per alimentare apparecchiature, strumentazioni ecc.;
- necessita per il funzionamento solamente di una sorgente continua a 12V (ad es. una batteria);
- non reperibilità in commercio di strumenti con analoghe caratteristiche.

Si possono pensare i seguenti miglioramenti alla versione attuale:

- adozione di un display grafico touch-screen e di una memoria esterna per la rappresentazione grafica e l'immagazzinamento dei dati (quindi non più indispensabile interfacciarsi con un PC);
- adozione di dissipatore e sistema di raffreddamento per il MOSFET, al fine di incrementare il livello della massima potenza misurabile.

Bibliografia

- Iarocci, A. et al., (2008). PEGASO: An ultra light long duration stratospheric payload for polar regions flights, *Advances in Space Research* 42, 1633-1640.
- Joe-Air Jiang et al., (2005). Maximum power tracking for photovoltaic power systems. *Tamkand Journal of Science and Engineering*, Vol. 8, No 2, pp. 147-153.
- NATO Science Series (2003). *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*, vol. 176 p. 116.
- Romeo, G. and Urbini, G., (2008). Solar panel Simulator. *Electronic Design*, in press. <http://hdl.handle.net/2122/3999>.
- Tsuno, Y., Hishikawa, Y. And Kurokawa, K., (2005). Temperature and irradiance dependence of the I-V curves of various kinds of solar cells, 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-15), Shangai China.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2008 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia