

Rapporti tecnici INGV

**Note sull'uso efficiente
dei pannelli solari**

288



Istituto Nazionale di
Geofisica e Vulcanologia

Direttore Responsabile

Stefano Gresta

Editorial Board

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (INGV - RM1)

Luigi Cucci (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM1)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Marcello Vichi (INGV - BO)

Sara Barsotti (INGV - PI)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (Seconda Università di Napoli, INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici

INGV

NOTE SULL'USO EFFICIENTE DEI PANNELLI SOLARI

Giovanni Romeo

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

288

Indice

1. Generatore fotovoltaico	7
2. MPPT	8
3. Un modulatore sincrono come MPPT	12
4. MPPT, ne abbiamo bisogno?	14
5. Array cilindrico di pannelli solari	17
6. MPPT su pannelli multipli	20
7. MPPT in parallelo	22
8. Un MPPT per pigri	23
9. Per i giorni di pioggia	24
Conclusioni	25
Ringraziamenti	25
Bibliografia	25

Introduzione

Queste note derivano dalla mia esperienza nell'uso di pannelli solari, maturata in installazioni in Africa, in Antartide e sui palloni stratosferici. Si tratta di considerazioni, essenzialmente votate a trarre dal fotovoltaico tutta l'energia possibile, nate sul campo dalle necessità del problema tecnico, ed organizzate per scrivere questa nota. Si parla di installazioni fisse o su veicolo, e non si trattano i sistemi ad inseguimento. Tutte le considerazioni sono di principio, e non si scende troppo nei dettagli realizzativi. Sono convinto che il lettore tecnico cui sono destinate sia abbastanza smaliziato da non richiedere minuzie circuitali.

1. Generatore fotovoltaico

È giusto iniziare dicendo che cos'è un generatore fotovoltaico, solo l'essenziale (dal punto di vista dell'utente, e non da quello del fisico dei solidi), per stabilire una base per tutte le considerazioni successive. Un generatore fotovoltaico è un dispositivo che converte direttamente la luce in energia elettrica. Quelli che siamo abituati ad usare sono fatte da serie di giunzioni di semiconduttori, e il loro schema equivalente approssimato è rappresentato in fig. 1.

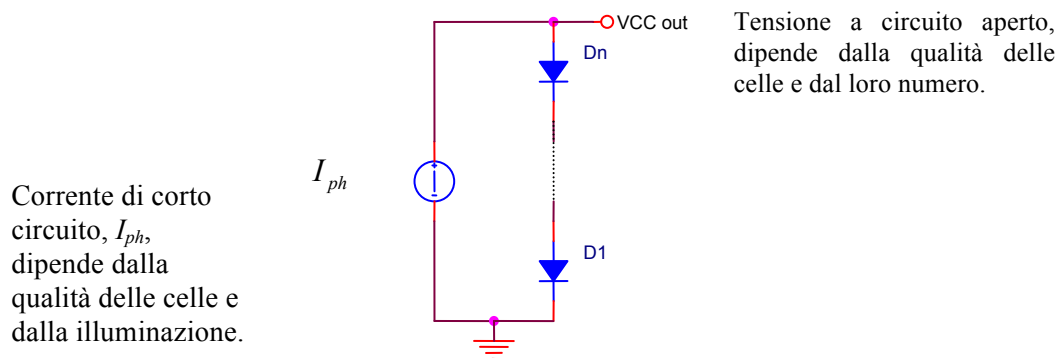


Figura 1.1 Schema equivalente di un generatore fotovoltaico.

L'equazione che descrive questo circuito è:

$$I(V, I_{ph}) = \left(I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{KTm}} - 1 \right) \right) \cdot \Phi \left(I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{KTm}} - 1 \right) \right) \quad (1.1)$$

Dove:

$I(V, I_{ph})$	corrente in uscita dal pannello
V	tensione in uscita dal pannello
I_{ph}	corrente indotta dall'illuminazione
I_s	corrente di saturazione inversa
m	fattore di correzione
e	carica dell'elettrone
K	costante di Boltzmann

La funzione di Heaviside (Φ) è stata introdotta per impedire alla corrente di assumere valori negativi. In prima approssimazione trascuriamo la dipendenza dalla temperatura. La dipendenza dalla temperatura è più complessa di quanto appaia nella (1.1): sia I_{pk} che I_s ne sono dipendenti. Possiamo definire i valori di I_s ed m in modo da ottenere arbitrariamente un comportamento di un pannello plausibile:

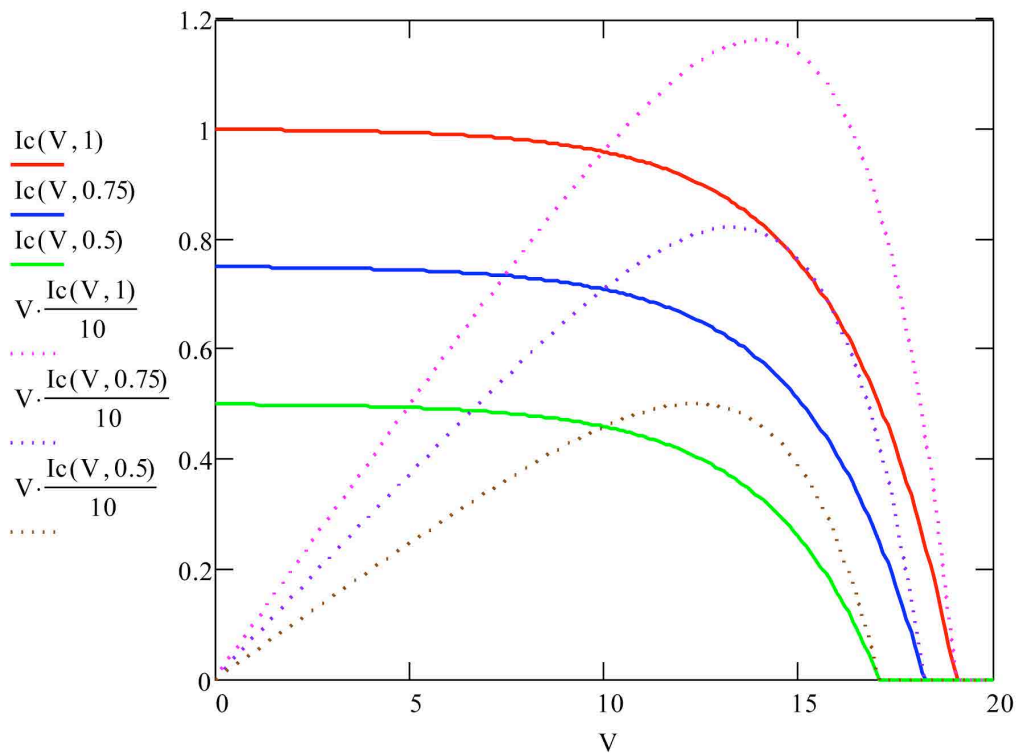


Figura 1.2 Curve corrente tensione e relative curve di potenza massima di un pannello plausibile definito dall'equazione (1.1).

Dall'esame della fig. 1.2 è evidente che:

- più illuminiamo e più otteniamo energia;
- la potenza che riusciamo a trasferire dipende dal carico.

Il primo punto è evidente, il secondo ha avuto bisogno di un po' di tempo perché si decidesse di prenderlo in considerazione.

2. MPPT

Negli anni '80 l'allora Istituto Nazionale di Geofisica (ING) iniziò ad installare stazioni sismiche a larga banda in giro per il Mediterraneo (MedNet). Le stazioni di quei tempi erano un esempio di avidità energetica, pur avendo la potenza di calcolo di un cellulare asfittico. Per alimentarle in zone disagiate (non ricordo una che non lo fosse...) si richiedeva una seria installazione solare, capace di fornire 100 W medi.

Come si vede dal diagramma di fig. 1.2 i pannelli solari sono dei generatori piuttosto volubili e, a loro volta, le batterie al piombo o al piombo-stagno (allora l'unica soluzione ragionevole per immagazzinare energia) mostrano una tensione dipendente dalla temperatura (Fig. 2.1).

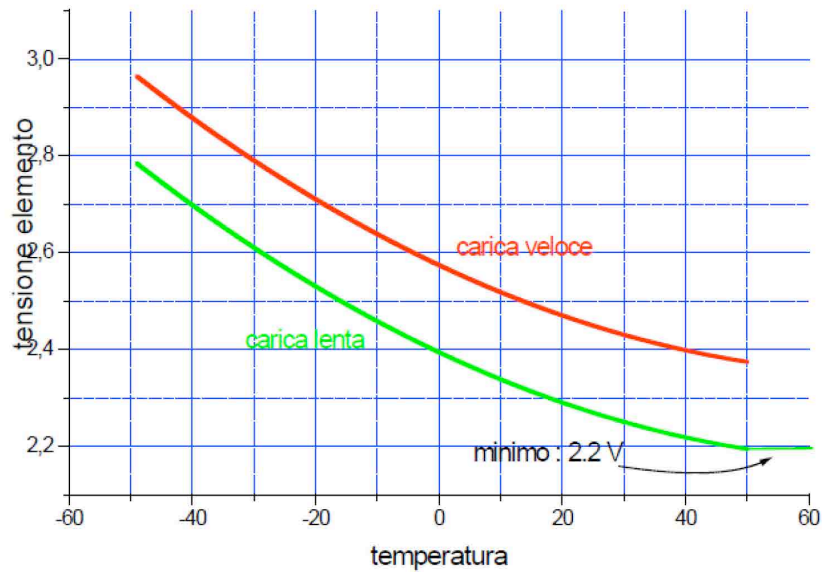


Figura 2.1 Tensioni di carica veloce e lenta in funzione della temperatura per un accumulatore Pb-Sn.

Per mettere d'accordo sia il generatore (serie di pannelli) che l'utenza (batteria tampone e carico) venne esaminata la possibilità di costruire un adattatore di impedenza in grado di garantire il massimo del trasferimento di energia, quello che chiamiamo adesso MPPT (Maximum Power Point Tracker). Il prototipo costruito funzionava egregiamente ed era una macchina squisitamente analogica. Conservo ancora i disegni e le considerazioni fatte all'epoca. Fig. 2.2.

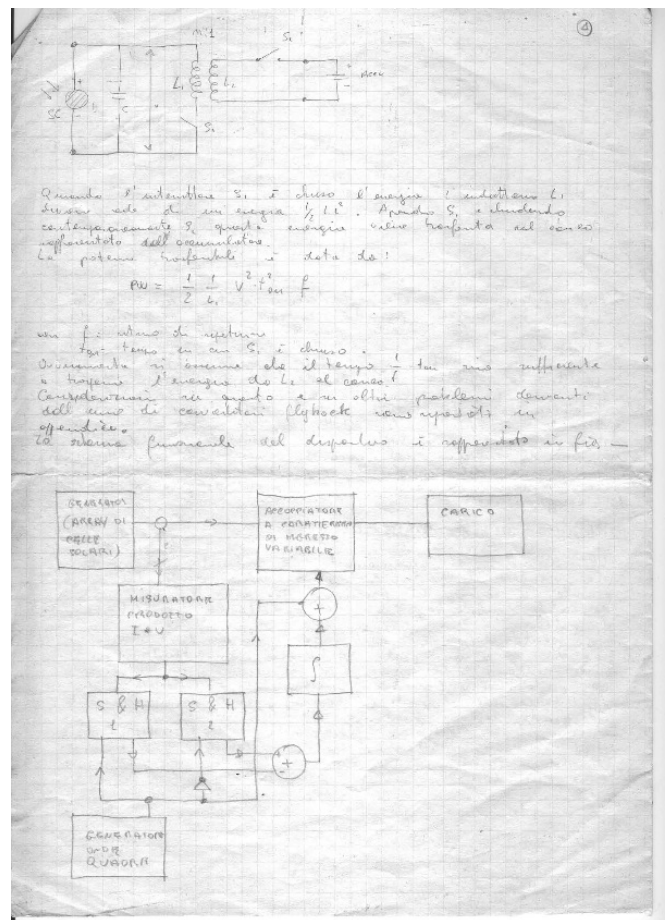


Figura 2.2. Appunti dell'MPPT dell'ING (anni '80).

Per le considerazioni che faremo nel seguito non sempre un MPPT rappresenta la panacea, soprattutto in un'installazione fissa, ed il costo dell'elettronica in grado di produrre un rendimento accettabile all'epoca era piuttosto alto. Bastava un pannello in più per ottenere la stessa energia che l'aumento di rendimento dovuto all'MPPT avrebbe fatto guadagnare, con un costo minore ed un'affidabilità maggiore. Quest'affermazione si può verificare intuitivamente: se costruisco il mio impianto perché trasferisca la massima energia possibile, lo progetto perché funzioni egregiamente accoppiando al meglio quando l'energia solare è massima. A questo punto l'MPPT lavorerebbe soltanto ai crepuscoli, dove l'energia in gioco è minore; il rendimento certo aumenta moltissimo, ma per un tempo ed un'illuminazione limitati. Quindi un po' di superficie solare in più avrebbe risolto il problema senza elettronica aggiuntiva e ad un prezzo minore. Venne fatta questa scelta, e così l'invenzione dell'MPPT-ING rimase nel cassetto, come simpatica curiosità tecnica, senza che fosse stata pubblicata o brevettata. Un esempio di qualcosa che non bisognerebbe mai fare con le buone idee.

Un MPPT ricerca il massimo di una funzione, nel nostro caso una potenza. I circuiti a retroazione cui siamo abituati lavorano generalmente cercando un punto su una funzione monotona. È tutto facile quando la pendenza non cambia. La presenza di un massimo indica che la funzione non è monotona, e la ricerca del massimo è piuttosto intricata. Certo, se pensiamo ad una soluzione con un microprocessore è semplice. Se vogliamo una soluzione analogica, dove il disegno sposa elegantemente il problema (senza comodamente rinviarlo ad una successiva scrittura del codice), non lo è più. Non cerco di spiegare lo schema di fig. 2.2, ma esamino il modo più semplice che ho pensato per costruire un MPPT. Le due cose coincidono.

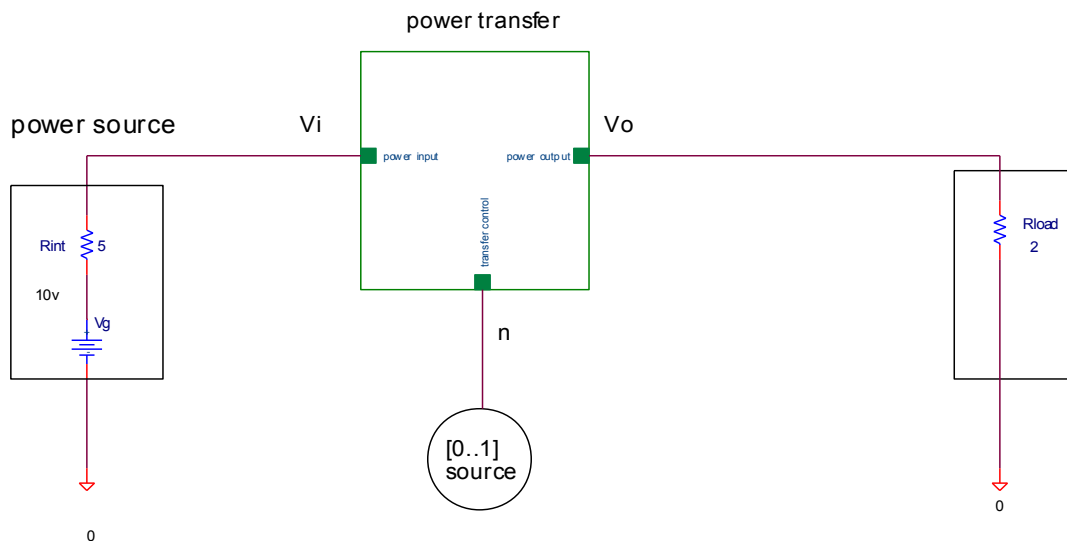


Figura 2.3 Una sorgente (power source), schematizzata con un generatore e con una resistenza interna, è collegata ad un carico (load) attraverso un accoppiatore (power transfer).

Esaminiamo la fig. 2.3. Un generatore reale (power source), schematizzato come un generatore ideale con una resistenza in serie, è collegato ad un carico attraverso un accoppiatore controllato.

L'accoppiatore è una sorta di "trasformatore per corrente continua" che come ogni trasformatore (ideale) trasferisce completamente la potenza:

$$W_{input} = W_{output}$$

ed ha un rapporto di trasformazione:

$$V_{output} = V_{input} \cdot n \quad \text{dove} \quad 0 \leq n \leq 1$$

dipendente dal segnale di controllo n

e, quindi

$$I_{output} = I_{input} \cdot \frac{1}{n}$$

Il fatto di aver scelto $0 \leq n \leq 1$ è arbitrario, e deriva dalla tecnica costruttiva dell'accoppiatore. Se si usa l'accoppiatore *fly-back* (che appare in alto nella fig. 2.2) non esiste alcuna limitazione. Se si usa un accoppiatore *step-down* (che offre dei rendimenti più alti) la tensione di uscita non può superare quella d'ingresso, e questo implica una limitazione del valore di n . Una bella introduzione alle tecniche *switching*, necessarie per la costruzione dell'accoppiatore si può trovare in rete: *Switch-Mode Power Supply-reference manual* [ON semiconductor, 2014].

Se scriviamo la potenza trasferita nello schema di fig. 2.3 in funzione di n otteniamo:

$$W(n) = \frac{\left(\frac{\frac{R_{load}}{n^2}}{\frac{R_{load}}{n^2} + R_{int}} \cdot V_g \right)^2}{\frac{R_{load}}{n^2}} \quad (2.1)$$

Osserviamo che, se uguagliamo a 0 la derivata della potenza trasferita rispetto ad n

$$\frac{dW}{dn} = V_g^2 \cdot (-2)R_{load} \cdot n \cdot \frac{n^2 \cdot R_{int} - R_{load}}{(R_{load} + n^2 \cdot R_{int})} = 0 \quad (2.2)$$

troviamo che questa funzione ammette un massimo (trascuriamo le soluzioni banale e negativa) per

$$n = \sqrt{\frac{R_{load}}{R_{int}}}$$

Vediamo che se $R_{load} < R_{int}$, allora $n < 1$. Questo è molto ragionevole (significa che la tensione all'uscita dell'adattatore di impedenza è minore della tensione dei pannelli) perché si preferisce mettere i pannelli in serie per aumentare la tensione diminuendo le perdite di trasferimento sui cavi.

Osserviamo anche che, se calcoliamo il massimo della tensione di uscita in funzione di n la funzione derivata si annulla (a parte le soluzioni banali)

$$\frac{dV_0}{dn} = \frac{d}{dn} \left(V_g \frac{\frac{R_{load}}{n^2}}{\frac{R_{load}}{n^2} + R_{int}} \right) = -R_{load} \cdot V_g \frac{n^2 R_{int} - R_{load}}{(n^2 R_{int} + R_{load})^2} \quad (2.3)$$

Sempre per $n = \sqrt{\frac{R_{load}}{R_{int}}}$, mostrando che, per carichi resistivi (comunque generalizzabili a carichi nei

quali la corrente sia una funzione crescente della tensione) non è necessario usare la potenza come parametro per il calcolo del massimo trasferimento di potenza [Romeo, 2009; Romeo and Iarocci, 2011].

3. Un modulatore sincrono come MPPT

Questa strategia implementa l'MPPT più semplice che mi è venuto in mente (ed è praticamente una descrizione dello schema di fig. 2.2). Lo scopo dell'MPPT è quello di fornire il massimo del trasferimento di potenza, cioè di risolvere il problema della ricerca del massimo della funzione $W(n)$ o di una funzione di $U(n)$ con la posizione (sull'asse n) del massimo coincidente con quello di $W(n)$.

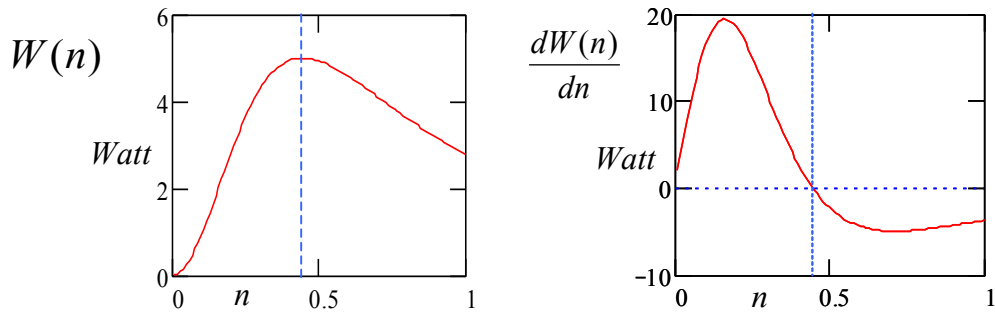


Figura 3.1 La potenza trasferita al carico nel circuito di fig. 2.3 (a sinistra) e la sua derivata a destra. Il fatto che la derivata non sia monotona non suscita preoccupazioni: esiste un unico passaggio per lo zero, e l'ampiezza della derivata governa solo la velocità con cui raggiungeremo lo zero: il segno della pendenza della derivata non ha alcun effetto.

La fig.3.1 mostra la potenza trasferita $W(n)$ (a sinistra), e la sua derivata $dW(n)/dn$ (a destra). È evidente che non possiamo usare un feedback tradizionale (che lavora cercando un valore su una funzione monotona) per la ricerca del massimo della $W(n)$ usandola direttamente, ma possiamo sicuramente usarlo sulla derivata, che nell'intervallo di esistenza di n ha un unico passaggio per lo 0.

Questa cosa la possiamo realizzare semplicemente in maniera squisitamente analogica, secondo lo schema di fig. 3.2.

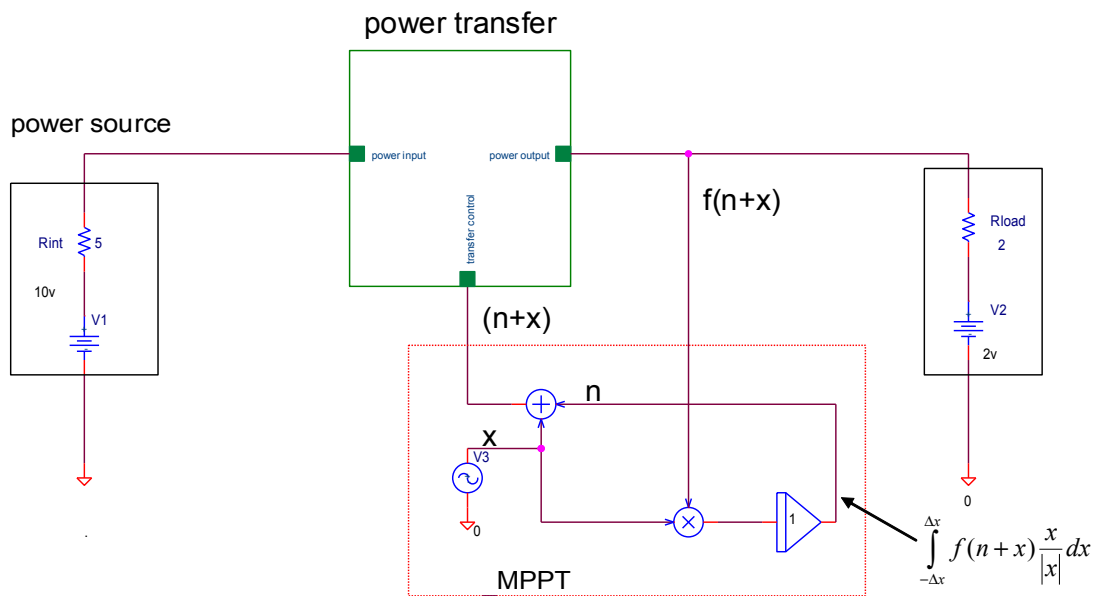


Figura 3.2 Il MPPT più semplice del mondo. In questo caso un anello di reazione tradizionale viene chiuso utilizzando il segnale: $\int_{-\Delta x}^{\Delta x} f(n+x) \frac{x}{|x|} dx$.

Il blocco contrassegnato con MPPT comprende un modulatore ed un demodulatore sincrono. Quello che in pratica viene fatto è aggiungere un piccolo segnale di errore x al segnale n con cui controlliamo il trasferimento di potenza. Questo, ovviamente, si riflette sulla potenza erogata dal trasferitore di potenza e, analizzando la direzione della variazione possiamo valutare in che direzione modificare n . In pratica valutare che cosa succede alla variazione di potenza a causa della variazione del segnale di controllo è fare la derivata della potenza rispetto ad n : quello che, come abbiamo visto nella fig. 3.1, ci permetterebbe di utilizzare un feedback tradizionale per trovare il punto del massimo trasferimento di potenza. Se segnale x è ad onda quadra, simmetrica rispetto allo zero, lo schema di fig. 3.2 diviene una rappresentazione del blocco di modulazione-integrazione di fig. 3.3.

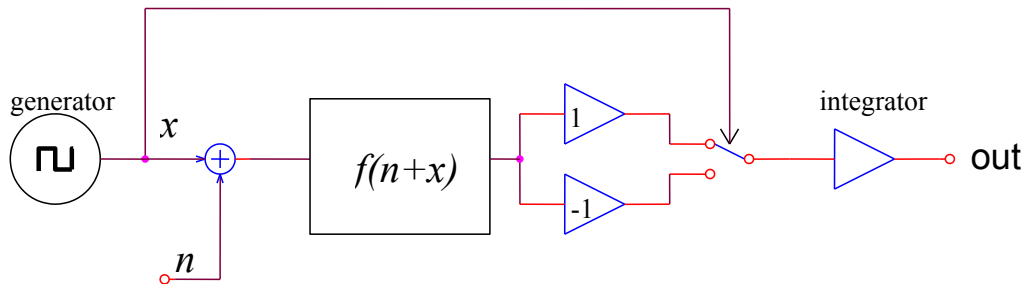


Figura 3.3 Un'implementazione circuitale del blocco MPPT in fig. 3.2 nel caso che il segnale x sia un'onda quadra simmetrica. In questo caso il commutatore di segno in uscita opera il cambiamento di segno implicito nell'operazione di moltiplicazione in fig. 3.2.

Lo schema di figura 3.3 può essere rappresentato dall'equazione:

$$out(n, \Delta x) = \int_{-\Delta x}^{\Delta x} f(n+x) \frac{x}{|x|} dx \quad (3.1)$$

Dal punto di vista del progettista elettronico questo può apparire inusuale: manca ogni riferimento temporale. Certamente la (3.1) esiste benissimo senza il tempo, e noi possiamo calcolarne la derivata qualunque sia la natura della variabile indipendente. In un circuito reale il tempo è di solito la variabile d'integrazione. Se x è una funzione del tempo (es. $x(t)=at$) l'integrazione diviene un'integrazione nel tempo. In un circuito reale x sarà un segnale periodico, e l'operazione d'integrazione potrà essere fatta come di consueto nel tempo, su almeno un periodo completo.

Possiamo giustificare il funzionamento dello schema di fig. 3.3 dimostrando che:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{(\Delta x)^2} \int_{-\Delta x}^{\Delta x} f(n+x) \frac{x}{|x|} dx = \frac{df(n)}{dn}$$

Infatti:

$$\int_{-\Delta x}^{\Delta x} f(n+x) \frac{x}{|x|} dx = \int_0^{\Delta x} f(n+x) dx - \int_{-\Delta x}^0 f(n+x) dx$$

assumendo: $\frac{d(g(x))}{dx} = f(x)$
 $u = n + x$

$$\int_n^{n+\Delta x} f(u) du - \int_{n-\Delta x}^n f(u) du = g(u)|_n^{n+\Delta x} - g(u)|_{n-\Delta x} = g(n+\Delta x) + g(n-\Delta x) - 2g(n)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{(\Delta x)^2} (g(n+\Delta x) + g(n-\Delta x) - 2g(n)) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\frac{d}{d\Delta x} (g(n+\Delta x) + g(n-\Delta x) - 2g(n))}{\frac{d}{d\Delta x} (\Delta x)^2} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(n+\Delta x) - f(n-\Delta x)}{2\Delta x} = \frac{df(n)}{dn}$$

Questo ci dice che ciò che esce dal modulatore asincrono è proporzionale alla derivata della funzione $f(n)$. Il coefficiente di proporzionalità è legato all'ampiezza del segnale di modulazione, che è costante, qualcosa che possiamo inglobare nel guadagno in continua dell'anello di reazione senza che ci disturbi più di tanto. Questo dimostra che il circuito di fig. 3.2 tende allo zero della derivata della $W(n)$, quindi al massimo della potenza trasferita.

4. MPPT, ne abbiamo bisogno?

La prima parte delle considerazioni che seguono sono quelle che, negli anni '80, hanno fatto accantonare il progetto del MPPT dell'allora ING. Il pannello generico, il cui comportamento è rappresentato in fig 1.2, è quello che viene preso in considerazione nei calcoli che seguiranno.

Immaginiamo di voler caricare un pannello solare con la resistenza migliore possibile dal punto di vista del trasferimento di potenza (per un uso terrestre, che preveda un periodico sorgere e tramontare del Sole). Per far questo dobbiamo cercare quella resistenza che dissipi la massima quantità di energia per una rotazione completa del pannello davanti alla sorgente luminosa.

Definiamo la funzione

$$W_{\max}(I_{ph}) \quad (4.1)$$

come il massimo della funzione potenza, parametrizzata con I_{ph}

$$W(V, I_{ph}) = V \cdot I(V, I_{ph})$$

nell'intervallo di tensione di lavoro del pannello; l'energia erogabile nell'arco di un ciclo di illuminazione dal pannello sarà proporzionale a:

$$E_{\max} = t \int_{-\pi}^{\pi} W_{\max}(I_{ph}(\theta)) d\theta \quad (4.2)$$

dove t è l'unità di tempo, ed $I_{ph}(\theta) = I \cos(\theta)$ (con I unità di corrente).

Quando carichiamo un pannello fotovoltaico con una resistenza R , la tensione ai suoi capi è data dalla 4.1:

$$V(R, I_{ph}) = R \left(I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{KTm}} - 1 \right) \right) \cdot \Phi \left(I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{KTm}} - 1 \right) \right) \quad (4.3)$$

e, quindi, la potenza erogata sulla resistenza diviene: $P(R, I_{ph}) = V(R, I_{ph})^2 / R$. La Figura 4.1 mostra i diagrammi di tensione e di potenza per un pannello solare (per tre differenti valori di illuminazione) al variare della resistenza di carico.

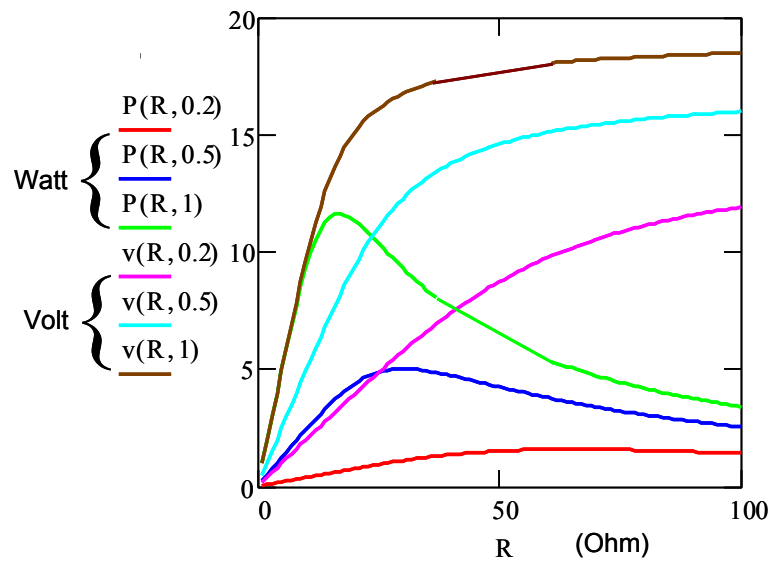


Figura 4.1 Andamento di potenza e tensione in funzione di R per tre parametri di illuminazione.

L'energia erogata dal pannello su un carico resistivo per una rotazione completa sarà, analogamente alla 4.2:

$$E_R(R) = t \int_{-\pi}^{\pi} P(R, I_{ph}(\theta)) d\theta \quad (4.4)$$

La fig. 4.2 mostra la curva di rendimento $\eta(R) = E_R(R) / E_{max}$, calcolata numericamente a partire dalle (4.2) e (4.4),

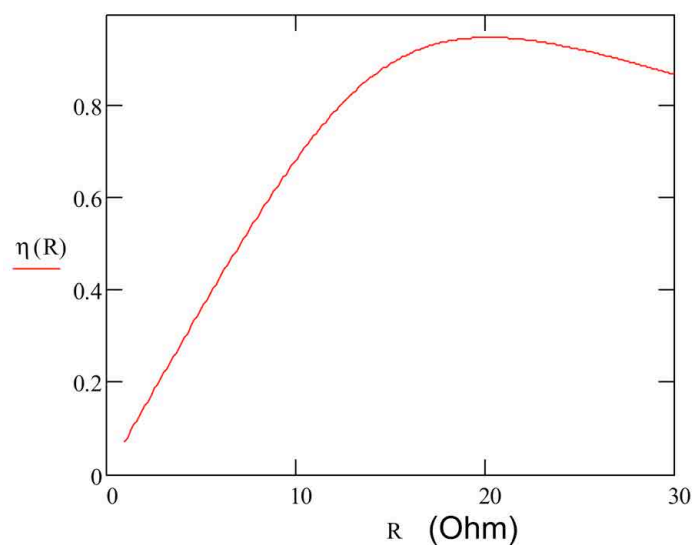


Figura 4.2 Curva di rendimento dell'accoppiamento resistivo. L'accoppiamento resistivo ottimo comporta una perdita del 5% rispetto all'accoppiamento ideale.

Nella Fig. 4.3 si vede che esiste un valore di resistenza per il quale l'accoppiamento resistivo approssima entro il 5% l'accoppiamento ideale; Questo valore arriva al 10% quando si introduce nelle formule la dipendenza dalla temperatura e si considera la temperatura dei pannelli proporzionale all'illuminazione (grossolano ma ragionevole). È comunque un valore accettabile, considerando che il rendimento dei convertitori *switching* [ON Semiconductor, 2014] che vengono utilizzati per costruire l'accoppiatore è di poco migliore del 90%.

Come abbiamo considerato nel paragrafo 2, se il carico del nostro array solare è calcolato per ottenere il massimo del trasferimento energetico nell'arco di una intera giornata dovremo rendere migliore l'accoppiamento nel momento della migliore illuminazione, l'MPPT darà il meglio di se ai crepuscoli, quando il bilancio energetico è ridotto e, quindi, non influenza troppo il computo generale dell'energia. La fig. 4.3 mostra il diagramma ottenuto dalla differenza tra la potenza massima erogabile dal nostro pannello campione e la potenza trasferita ad un carico resistivo per differenti valori dell'angolo di incidenza della luce.

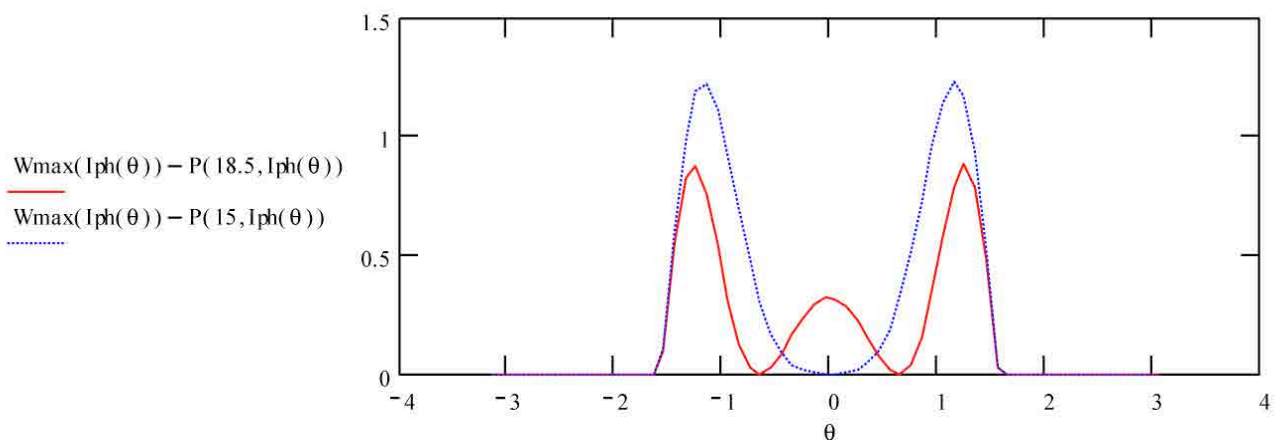


Figura 4.3 Differenza tra la potenza erogabile dal pannello campione e la potenza trasferita su un carico resistivo al variare dell'angolo di incidenza della luce e per due valori di resistenza.

Considerazioni analoghe possono essere condotte per un carico a tensione costante (tipicamente una batteria). L'energia erogata alla batteria per una rotazione completa del pannello è:

$$E_V(V) = t \int_{-\pi}^{\pi} V \cdot I(V, I_{ph}(\theta)) d\theta \quad (4.5)$$

In questo caso la tensione fornita dal pannello è imposta essere quella della batteria alla quale è collegato. Il diagramma della (4.5) è riportato in figura 4.4.

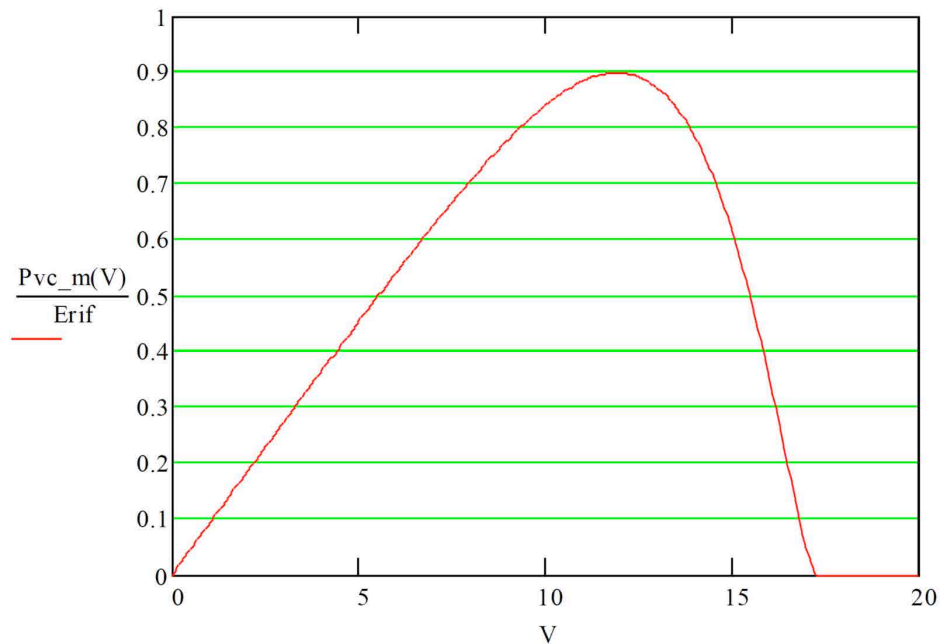


Figura 4.4 Rendimento in funzione di un carico a tensione costante (batteria), su un ciclo completo ideale di illuminazione. La scala verticale $E_{V_{const}}/E_{max}$ indica il rapporto tra l'energia erogata alla batteria e la massima energia erogabile.

La condizione è peggiore del sistema a resistenza costante, e peggiora ancora introducendo la dipendenza dalla temperatura. Se il carico a tensione costante è rappresentato da una batteria, il disaccoppiamento è ancora più grave perché il pannello eroga meno potenza a batteria scarica, quando ce ne sarebbe più bisogno. Sempre nel caso della batteria dobbiamo ricordare che c'è una ampia variabilità di tensione su una batteria, che dipende dallo stato di carica e dalla temperatura. Le batterie Pb-Sn utilizzate nel dispositivo PSM#1 [Romeo et al, 2008], passano da 12V a 15V al variare della temperatura da -50°C a $+50^{\circ}\text{C}$, con un rendimento di accoppiamento che va dal 90% al 50%.

In queste condizioni è evidente che l'uso di un sistema di accoppiamento intelligente (MPPT + controllo in temperatura) è indispensabile.

5. Array cilindrico di pannelli solari

Queste considerazioni sono state fatte al momento di progettare il payload PEGASO (Polar Explorer for Geomagnetism and Other Scientific Observations), nato per essere alimentato da batterie solari in volo stratosferico polare diurno [Iarocci et al, 2007]. In un payload non orientato il Sole può assumere qualsiasi posizione azimutale rispetto alla navicella, e la disposizione dei pannelli deve garantire l'indipendenza dell'erogazione dell'energia dall'azimuth solare. In un volo polare diurno il Sole è sempre presente con un'elevazione variabile. La geometria più adatta è quella conica, con l'angolo d'inclinazione delle pareti calcolato sull'altezza media del Sole. Per semplicità costruttiva si è preferito costruire un array solare cilindrico utilizzando pannelli solari flessibili. L'efficienza è appena minore dell'array conico (dell'ordine del 95% per una variazione dell'altezza del Sole di $\pm 20^{\circ}$). Il vantaggio dei pannelli solari flessibili (a parte la facilità con la quale possono essere sagomati nella forma desiderata) è quello (almeno questo vale per i pannelli a giunzione tripla di Unisolar) di essere costruiti con celle lunghe l'intero lato del pannello (Fig. 5.1): se si sceglie di arrotolare i pannelli con le celle ortogonali alle direttrici del cilindro (il cilindro ha l'asse parallelo alla catena di volo) si elimina completamente il fenomeno delle celle parzialmente illuminate con conseguenti *hotspot* e perdite di rendimento. Inoltre si può sfruttare l'albedo del suolo, non trascurabile in voli su ghiaccio e neve.

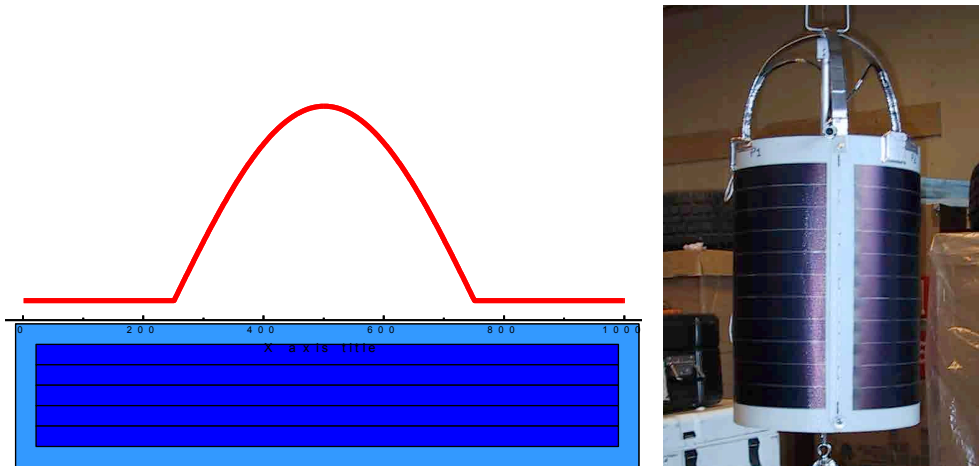


Figura 5.1 Pannello solare flessibile a giunzione tripla. Le celle, elettricamente in serie, singole e lunghe quanto il pannello sono sempre illuminate allo stesso modo (il diagramma in rosso nella fig. a sinistra mostra l'intensità del sole sullo sviluppo dell'array cilindrico) se il pannello viene disposto come nella parte destra della figura.

Nel caso si desideri, per motivi di disponibilità o di rendimento, utilizzare dei pannelli rigidi è necessario disporli in una simmetria che approssimi quella cilindrica. Naturalmente questo vale per navicelle non orientate. I voli di PEGASO hanno mostrato che una navicella in stratosfera ruota sempre, con velocità variabile. In questo modo tutti i pannelli cilindrici verranno esposti al Sole in maniera equivalente.

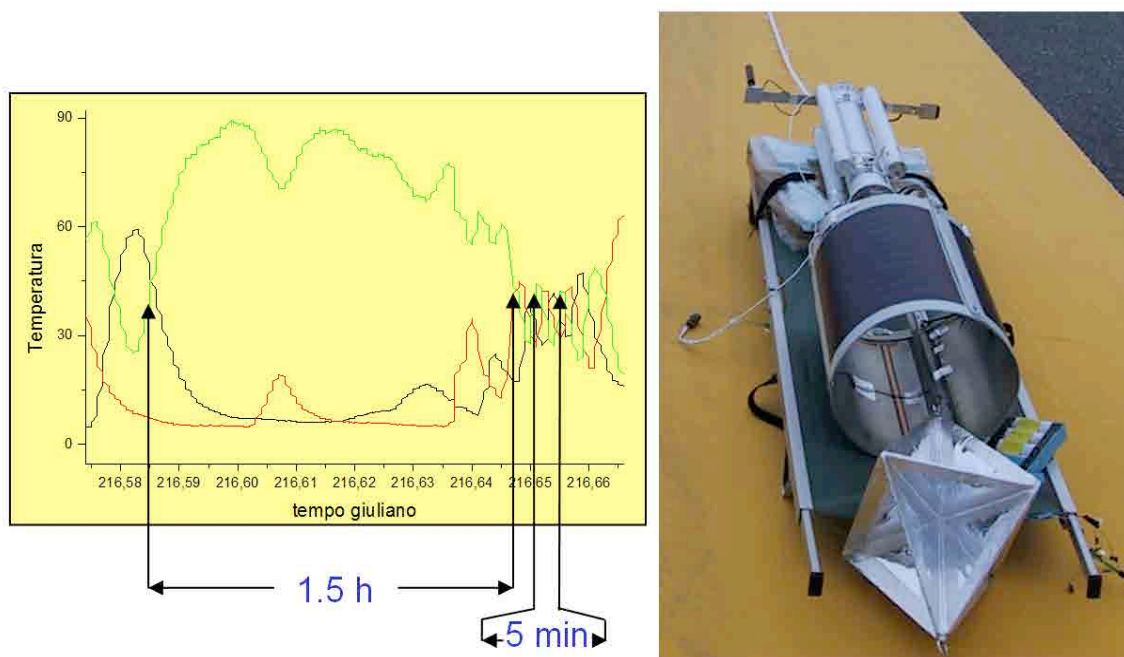


Figura 5.2 Pegaso utilizzava tre pannelli solari (a destra). Il diagramma a sinistra mostra l'andamento della temperatura (in °C) di ciascuno dei tre pannelli nel tempo dovuto alla rotazione della navicella. Nel segmento di tempo esaminato vediamo un periodo di rotazione variabile da 1.5 ore a 5 minuti.

Un pannello solare piano che ruota davanti ad una sorgente di luce riceve un'illuminazione che ha la forma:

$$I(\alpha, \beta) = \cos(\alpha - \beta) \cdot \Phi(\cos(\alpha - \beta)) \quad (5.1)$$

Dove gli angoli α e β rappresentano rispettivamente l'angolo della normale al pannello e l'angolo della radiazione luminosa. La relazione (5.1) è rappresentata in fig. 5.3 (una forma identica a quella del flusso sulla parete di pannello cilindrico, come mostrato in fig. 5.1).

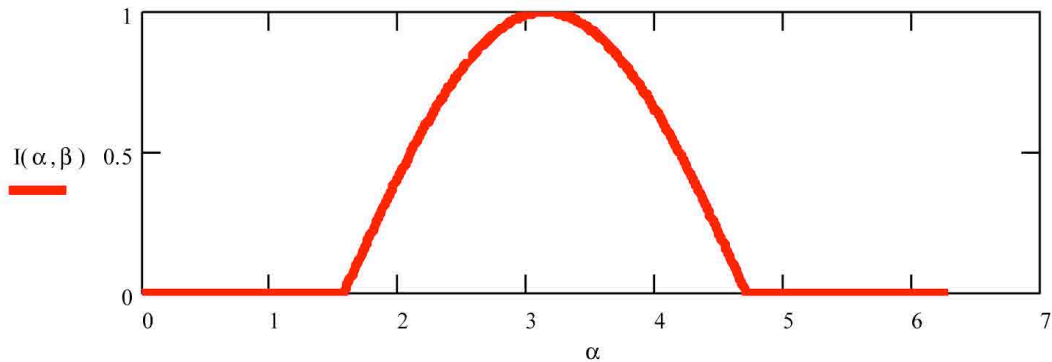


Figura 5.3 Rappresentazione dell'illuminazione normalizzata di un pannello rotante: l'illuminazione ha un andamento sinusoidale quando il Sole illumina il lato sensibile, e nulla quando questo è in ombra.

Se si utilizza un pannello solare cilindrico questo si comporta come un pannello sempre ortogonale alla sorgente di superficie equivalente ad un rettangolo avente per lati $2r$ ed h , (r =raggio del cilindro, h =altezza del cilindro). Il rapporto tra la superficie efficace e la superficie totale del pannello cilindrico è:

$$\frac{2rh}{2\pi r h} = \frac{1}{\pi} \quad (5.2)$$

Il rapporto tra il valor medio dell'energia prodotta da un pannello solare piano di superficie s fatto ruotare (in modo da avere un'illuminazione come in fig. 5.3) e quella prodotta dal pannello di superficie s orientato per l'illuminazione massima è:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(\alpha, \beta) d\alpha = \frac{1}{\pi} \quad (5.3)$$

In pratica non c'è alcuna differenza nella produzione di energia, a parità di superficie, tra un pannello solare cilindrico e un pannello solare piano rotante, purchè la rotazione interessi in maniera statisticamente uniforme tutto l'angolo giro. L'unica differenza si ha nel *ripple* sull'erogazione dell'energia; questo può essere mitigato montando più pannelli solari con angoli uniformemente distribuiti su tutto l'angolo giro. La funzione $S(\alpha, p)$ descrive l'illuminazione normalizzata di una distribuzione circolare di p pannelli piani, con angolo di orientazione α .

$$S(\alpha, p) = \frac{1}{p} \sum_{n=1}^p \frac{1}{2\pi} I\left(\alpha + \pi, \frac{2n\pi}{p}\right) \quad (5.4)$$

Ovviamente, come nel caso del singolo pannello, si ha un'equivalenza media con il pannello cilindrico, infatti:

$$\int_0^{2\pi} S(\alpha, p) d\alpha = \frac{1}{\pi} \tag{5.5}$$

La fig. 5.4 mostra il *ripple* dovuto al collegamento di più pannelli. Dalla condizione inaccettabile data da 1 o 2 pannelli si passa ad una ottima condizione con 3 pannelli:

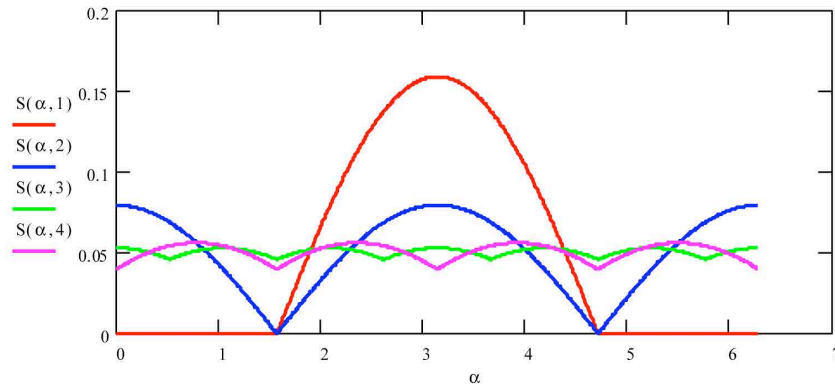


Figura 5.4 Il *ripple* indotto dalla rotazione su una disposizione cilindrica di pannelli solari piani. Sono mostrati i casi di 1, 2, 3 e 4 pannelli.

Il diagramma della fig. 5.5 mostra il rapporto del valore picco-picco, diviso il valore medio per numero di pannelli variabile da 1 a 10. È evidente che tre pannelli rappresentano un risultato soddisfacente: con tre pannelli non si ha mai un'uscita nulla ed il *ripple* offerto rappresenta soltanto il 14% del valore medio.

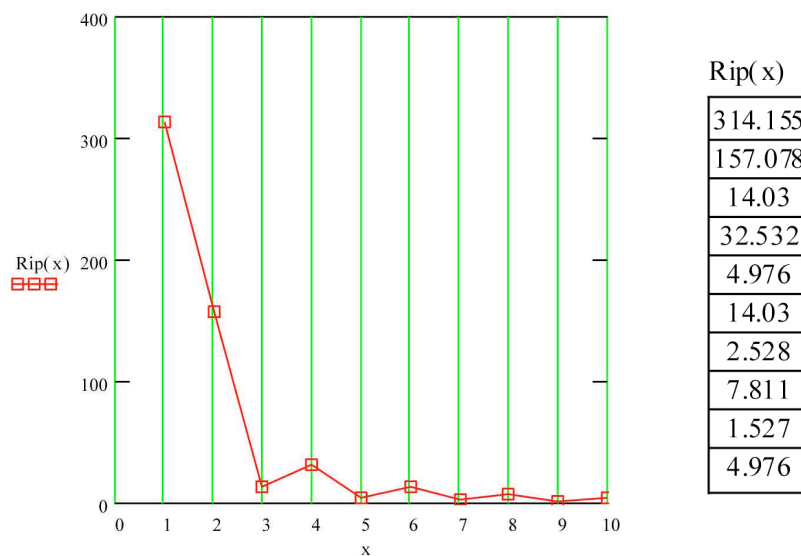


Figura 5.5 *Ripple* sull'illuminazione per una serie di pannelli piani posti in simmetria circolare; il *ripple* è calcolato come il rapporto del valore picco-picco, diviso il valore medio.

Quanto esposto ci porta a concludere che la disposizione circolare di pannelli piani può vantaggiosamente sostituire i pannelli cilindrici. Tre pannelli forniscono un *ripple* accettabile; un numero dispari di pannelli fornisce un *ripple* inferiore a quello offerto dal numero pari immediatamente superiore. Inclinando i pannelli piani rispetto alla verticale, in modo da orientare la loro normale verso l'altezza media del Sole otteniamo la disposizione energeticamente ottima.

6. MPPT su pannelli multipli

Nel caso si disponga di più pannelli solari (come nel caso delle geometrie discusse nel paragrafo precedente) qual È la differenza tra utilizzare MPPT singoli o un unico MPPT con i pannelli collegati in parallelo? Prendiamo in esame la geometria a p pannelli nella geometria circolare. Ponendo i pannelli in parallelo la corrente fotovoltaica, proporzionale all'illuminazione, è data da:

$$I_{ph}(\alpha, p) = \frac{1}{p} \sum_{n=1}^p \frac{1}{2\pi} I_0 \cos\left(\alpha - \frac{2n\pi}{p}\right) \cdot \Phi\left(\cos\left(\alpha - \frac{2n\pi}{p}\right)\right)$$

dove I_0 rappresenta la corrente massima. Questa scelta è stata fatta perché dispone i pannelli a tutte le angolazioni possibili, e ci aiuta nell'evidenziare la differenza di rendimento quando si intervenga con MPPT individuali sui singoli pannelli, oppure si usi un unico MPPT per tutto l'impianto solare. È evidente che, se i pannelli hanno tutti la stessa angolazione (come in un tipico impianto fisso), le due cose si equivalgono.

La corrente complessiva sui pannelli in parallelo è data da:

$$I(V, I_{ph}(\alpha, p)) = \left(I_{ph}(\alpha, p) - pI_s \left(e^{\frac{qV}{kTm}} - 1 \right) \right) \cdot \Phi \left(I_{ph}(\alpha, p) - pI_s \left(e^{\frac{qV}{kTm}} - 1 \right) \right)$$

e l'energia prodotta in una rotazione completa è:

$$E(p) = t \int_{-\pi}^{\pi} V \cdot I(V, I_{ph}(\alpha, p)) d\alpha$$

Nel caso di pannelli con MPPT indipendente, la corrente sui pannelli è data da $p \cdot E_{max}$ dove E_{max} è il valore definito per il calcolo dell'energia di riferimento: con un MPPT ideale si sfrutta tutta l'energia del pannello.

Nel caso di pannelli collegati in parallelo la corrente è uguale alla somma delle correnti fornite dai pannelli, e la tensione è la stessa per tutti (imposta dal collegamento in parallelo). In queste condizioni è impossibile che la tensione sui tutti i pannelli sia quella tale che $W = W_{max}$ (che viene invece imposta dall'uso del MPPT).

Il confronto è stato fatto numericamente per una disposizione di pannelli circolare, utilizzando (4.1), $W_{max}(I_{ph})$, che restituisce il massimo della potenza nell'intervallo di tensione di funzionamento.

La potenza fornita da p pannelli in parallelo è data da:

$$W_{par}(\alpha) = W_{max} \left(\frac{1}{p} \sum_{n=1}^p I\left(\alpha, n \frac{2\pi}{p}\right) \right)$$

(dove la corrente fotovoltaica $I(\alpha, \beta) = \cos(\alpha - \beta) \cdot \Phi(\cos(\alpha - \beta))$ è quella definita nella 5.1.); la potenza con gli MPPT individuali per ogni pannello è:

$$W_{ind}(\alpha) = \frac{1}{p} \sum_{n=1}^p W_{max}(I(\alpha, n \frac{2\pi}{p}))$$

Una stima del guadagno medio del MPPT individuale rispetto a quello collettivo è stato ottenuto risolvendo numericamente il rapporto:

$$g(p) = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} W_{par}(\alpha, p) d\alpha}{\int_{-\pi}^{\pi} W_{ind}(\alpha, p) d\alpha} \approx 0.82 \quad \text{per } p > 3$$

Il guadagno che si ottiene non è trascurabile, dell'ordine del 20% della potenza in gioco.

Anche da un punto di vista dell'affidabilità avere degli MPPT individuali associati ad ogni singolo pannello può essere una scelta vincente perché permette di distribuire comodamente la potenza su più dispositivi. In questo caso il cedimento di un singolo MPPT degrada il sistema ma non ne compromette completamente il funzionamento.

7. MPPT in parallelo

Gli MPPT individuali descritti nel paragrafo precedente possono essere dei dispositivi qualsiasi messi in parallelo. Un MPPT non ha modo di accorgersi se la batteria è collegata ad un altro dispositivo di carica, e trasferisce comunque la massima potenza erogabile dal pannello, rispettando (speriamo!) i vincoli imposti da tensione e temperatura.

Le cose, invece, non funzionano se tentiamo di collegare in parallelo anche gli ingressi degli MPPT. Il tentativo di collegare in parallelo senza precauzioni due regolatori MPPT alla stessa sorgente è descritto in fig. 7.1. Se supponiamo che i carichi a e b si comportino in modo da inseguire il punto di massima potenza, ciascuno di essi cercherà di assumere l'impedenza del generatore che vede ai propri capi (condizione di massimo trasferimento di potenza) e che, per il teorema di Thévenin, è dato dal parallelo della resistenza interna del generatore e dei carichi collegati.

Il sistema di equazioni che descrive questa condizione (a destra in fig. 7.1) porta al risultato $a=0$ e $b=0$, con potenza dissipata nei carichi ben lontana (è nulla!) dal punto di massima potenza.

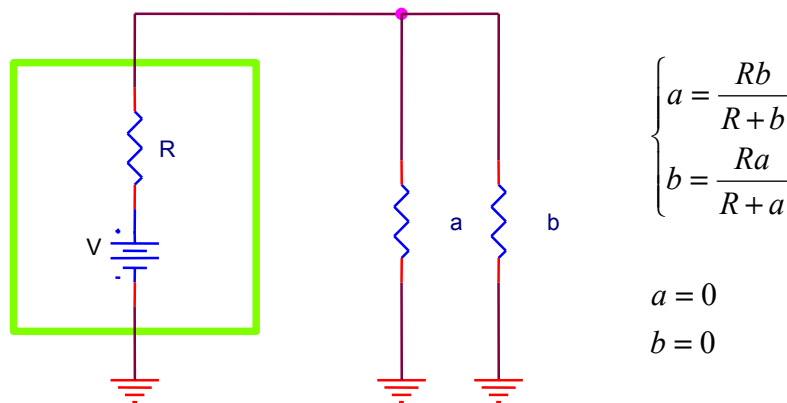


Figura 7.1 Il tentativo di collegare insieme due carichi ad inseguimento del punto di massima potenza (a e b) porta i carichi ad assumere una resistenza nulla.

8. Un MPPT per pigri

Nella fig. 1.2 sono riportate le curve di potenza del generatore fotovoltaico descritto nell'equazione 1. Alcune curve di potenza (parametrizzate con la corrente fotovoltaica) sono tracciate in fig. 8.1.

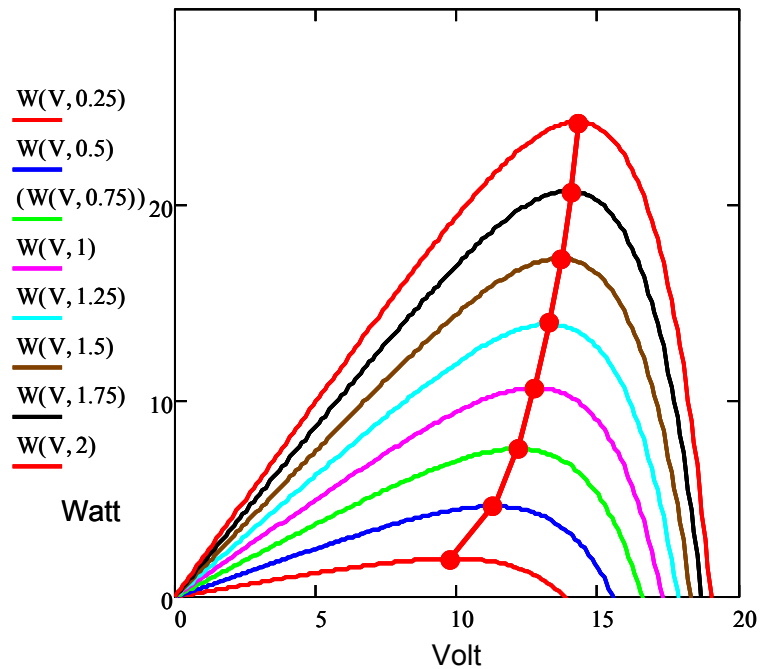


Figura 8.1. Famiglia delle curve di potenza di un pannello fotovoltaico in funzione dell'illuminazione. La linea rossa evidenzia il luogo dei massimi della potenza.

Se potessimo prendere in considerazione una sola curva di potenza, e non una famiglia, o se il luogo dei massimi fosse una linea verticale, sarebbe possibile costruire un MPPT con un *feedback* semplicissimo, come descritto in fig. 8.2:

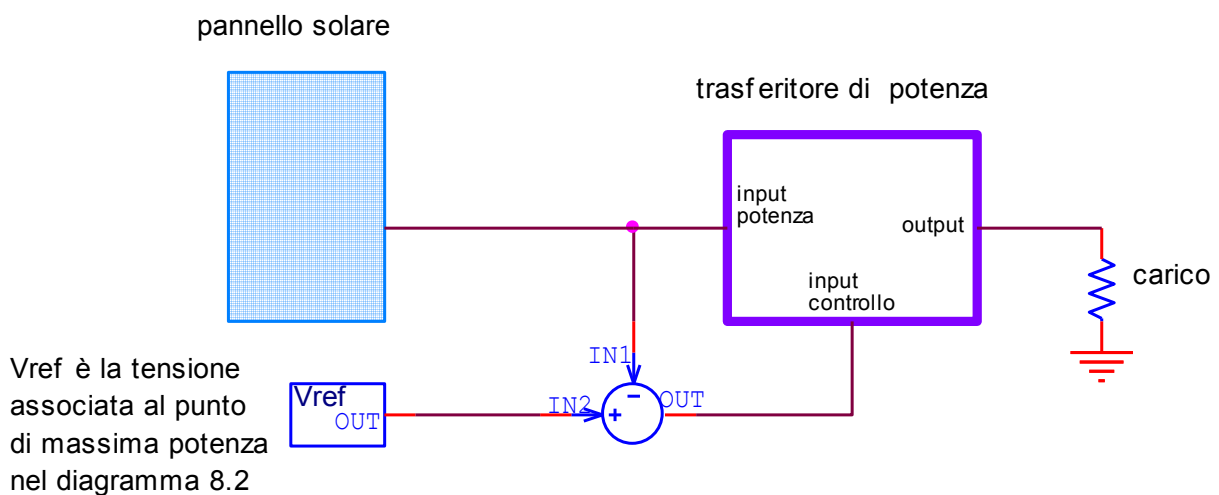


Figura 8.2 Feedback semplice ottenuto con la misura diretta della tensione sul pannello solare. Se la caratteristica tensione-corrente del pannello fosse circoscritta ad una sola curva (e non ad una famiglia di curve come in fig. 8.1) questo schema offrirebbe il sistema più diretto per inseguire il punto di massima potenza.

La fig. 8.2 descrive un circuito che opera sul trasformatore di potenza imponendo che la tensione all'uscita del pannello sia quella che, nella curva di potenza, corrisponde al punto di massimo trasferimento. Questa cosa funzionerebbe benissimo, se avessimo una sola curva di potenza o se il luogo dei massimi delle curve fosse una linea verticale. Purtroppo nessuna di queste condizioni è rispettata. Quello che ci serve è una misura che ci permetta di valutare periodicamente il valore di della tensione corrispondente al punto di massima potenza ($V_{pwrmax}(I_{ph})$) da utilizzare all'ingresso del differenziale di fig. 8.2.

Questo è abbastanza semplice. Se proviamo a confrontare la tensione alla massima potenza con la tensione ad anello aperto, otteniamo il diagramma di fig. 8.3

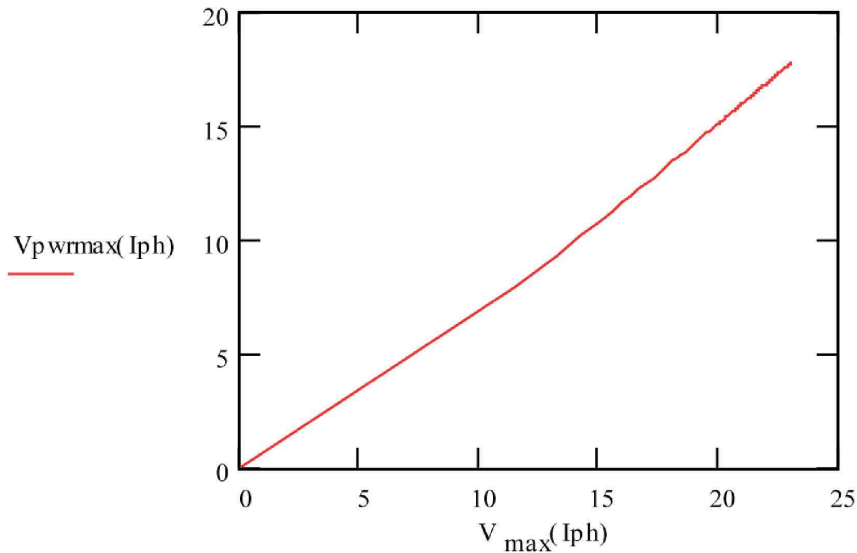


Figura 8.3 Relazione tra la tensione ad anello aperto (V_{max}) e la tensione nel punto di Massimo trasferimento di potenza $V_{pwrmax}(I_{ph})$.

Il diagramma 8.3 evidenzia una relazione quasi lineare tra la tensione ad anello aperto e la tensione nel punto di massima potenza, quindi una periodica misura della tensione senza carico permette di fissare semplicemente il riferimento del comparatore di fig. 8.2. Il punto negativo di questa soluzione è che pretende che i pannelli vengano disconnessi periodicamente per fare la misura che determina il punto di lavoro e, durante la misura (che possiamo rendere il più breve possibile) i pannelli non erogano energia. Comunque questo metodo pretende una conoscenza a priori della relazione tra tensione del pannello senza carico e la tensione a potenza massima, e non accoppia un generatore arbitrario come ci aspettiamo da un MPPT di qualità.

9. Per i giorni di pioggia

Per verificare il buon funzionamento di un MPPT possiamo pensare ad un generatore che simuli il comportamento di un generatore fotovoltaico. La fig. 1.1 mostra lo schema equivalente di un generatore fotovoltaico. È evidente che il modo più facile per produrre un simulatore di generatore fotovoltaico è quello di prendere un adeguato numero di diodi si potenza ed alimentarli con un generatore di corrente che possa fornire in uscita la potenza che desideriamo. Una soluzione piuttosto rozza, che dissipa energia a vuoto. Uno schema così lo troviamo su EDN [Blanes and Garrigós, 2011], citato come esempio di dispositivo da non realizzare. Il problema può essere affrontato in maniera più elegante (e non dissipativa!). La Figura 9.1 mostra, a sinistra, un modello di pannello solare (realizzato con una piccola corrente ed una piccola dissipazione), seguito da un trasformatore di caratteristica, che scala le grandezze in gioco in modo da produrre un'uscita di potenza che rispetti la caratteristica del modello. Il dispositivo che effettivamente fornisce la potenza in uscita è l'amplificatore A. Siccome possiamo realizzare A con metodi non dissipativi (può essere un'amplificatore in classe D) otteniamo un simulatore di pannello compatto e freddo.

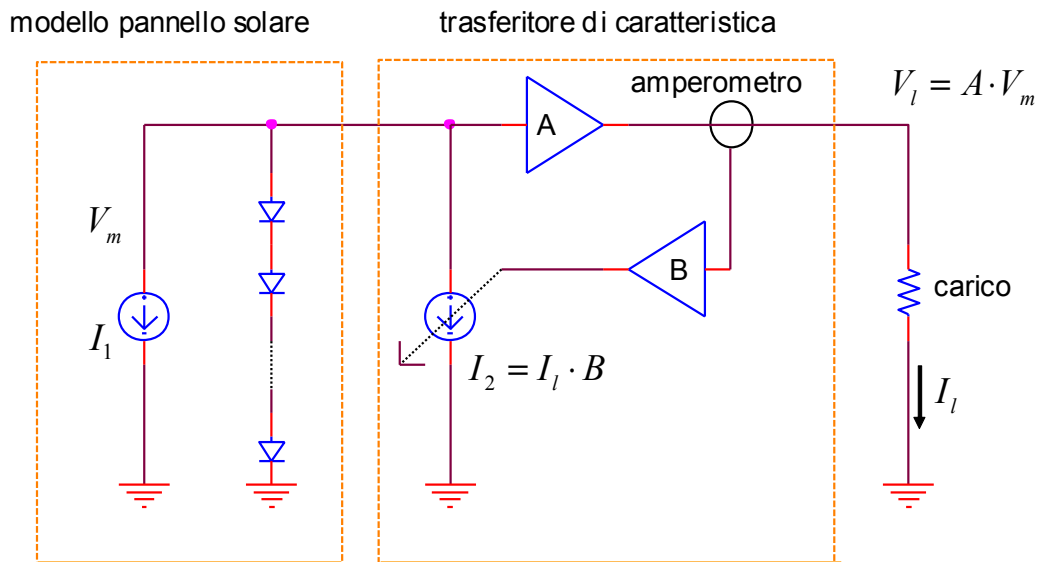


Figura 9.1 La caratteristica tensione-corrente può essere scalata a piacimento usando il trasferitore di caratteristica rappresentato nella figura.

Un esempio di implementazione elettrica del principio di fig. 9.1 si può trovare in [Romeo and Urbini, 2009]. Il circuito offre una compensazione in temperatura ed un'indicazione visiva del raggiungimento del massimo trasferimento di potenza.

Una piccola nota polemica, che ha confermato l'idea negativa che ho sui criteri di valutazione delle riviste. La soluzione di fig. 9.1 era stata rifiutata nel 2009 da EDN, che ha successivamente pubblicato Blanes and Garrigós, 2011.

Conclusioni

L'articolo è una rassegna di quanto il laboratorio elettronico dell'ING (LNTS dell'INGV) ha pensato e fatto riguardo all'uso dei pannelli solari: difficile trarre una singola conclusione. Nell'articolo sono state esaminate varie soluzioni per ottimizzare l'uso del fotovoltaico, alcune prodotte quando l'unica idea che si aveva dell'ottimizzazione era quella di orientare bene il pannello, e lo scopo di un regolatore di carica era di non cuocere le batterie. Se c'è una conclusione vera che si può trarre è questa: se si riconosce una buona idea non la si deve dimenticare nel cassetto, e le idee che perseguono l'efficienza sono particolarmente appetitose per la nostra civiltà energeticamente avida.

Ringraziamenti

Un ringraziamento particolare a Paolo Benedetti, che ha seguito il montaggio di buona parte dei prototipi, e ad Alessandro Iarocci che, a partire dal Payload PEGASO, ha cura delle applicazioni di potenza.

Bibliografia

- Blanes J.M., Garrigós A., (2011). *Circuit implements photovoltaic-module simulator*. <http://www.edn.com/design/analog/4369621/Circuit-implements-photovoltaic-module-simulator>
- Iarocci A., Benedetti P., Caprara F., (2007). *PEGASO: An ultra light long duration stratospheric payload for polar regions flights*. *Advances in Space Research*. 42(10), 1633-1640.
- ON Semiconductor, (2014). *Switch-Mode Power Supply-reference manual*. http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/SMPSRM-D.PDF, rev 4 April 2014.

- Romeo G., Iarocci A., Benedetti P., Mari M., (2008). *Un alimentatore solare per stazioni remote*. Rapporti Tecnici INGV, n. 77.
- Romeo G., (2009). *Achieve MPPT Control Without Power Calculation*. Electronic Design, Nov 10, 2009.
- Romeo G., Urbini G., (2009). *“Unstable” Power Supply Simulates Solar Panel Behavior*. Electronic Design, March 10, 2009, p. 57.
- Romeo G., Iarocci A., (2011). *No-Multiplier MPPT Monitors Power From Solar Array’s Switch Converter*. Electronic Design, Sep 16, 2011.

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2014 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