



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**STUDIO DI TECNICHE PER LA MASSIMIZZAZIONE DELLA POTENZA
ESTRATTA IN SISTEMI FOTOVOLTAICI (MPPT)**

Relatore: Prof. Tommaso Caldognetto

Laureando: Marco Toniollo

Correlatore: Prof. Marco Stellini

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

Data di laurea 25/09/2023

Indice

Capitolo 1: Introduzione	1
1.1) La cella fotovoltaica	1
1.2) Caratteristica I-V e P-V di un pannello fotovoltaico	3
1.3) Caratteristica P-V in condizioni di illuminazione parziale	4
1.4) Struttura generale di un sistema fotovoltaico	5
Capitolo 2: Convertitore DC/DC.....	7
2.1) Regolazione della potenza con variazione di tensione	8
2.2) Regolazione della potenza con variazione di corrente	9
Capitolo 3: Algoritmi MPPT.....	11
3.1) $0.8 V_{OC}$	11
3.2) Hill Climbing e Perturbation and Osservation (P&O).....	11
3.3) Tecnica della Conduttanza Incrementale	13
3.4) Particle Swarm Optimization (PSO)	15
3.5) Hybrid MPPT Algorithms	18
3.6) Neural Network (NN).....	18
3.7) Genetic Algorithm (GA)	19
Capitolo 4: Simulazione Algoritmi	21
4.1) $0.8 V_{OC}$	23
4.2) Hill Climbing.....	23
4.3) Tecnica della conduttanza incrementale	26
4.4) PSO	27
4.5) PSO - P&O	27
Capitolo 5: Risultati finali.....	31
Bibliografia	33

Capitolo 1: Introduzione

Con il continuo tentativo di decarbonizzazione delle fonti di energia e con la crisi del metano si sta sempre più affermando l'importanza dell'energia solare e quindi dei pannelli fotovoltaici.

L'energia solare è la fonte rinnovabile ad oggi più potente e non produce agenti inquinanti, ed è per questo importante poterla sfruttare al massimo convertendola in energia elettrica per poi utilizzarla nei più svariati campi che possono andare dalla semplice abitazione all'alimentazione di un satellite in orbita.

Le celle solari al silicio sono state inventate solo nel 1954 e, con il loro continuo sviluppo, si è passati da rendimenti del 6% circa fino al 25% sui moderni pannelli sviluppati in laboratorio: i pannelli attualmente in commercio arrivano ad efficienze massime del 19% circa.

Per questo motivo è molto importante sviluppare qualcosa che possa estrarre tutta l'energia convertita dal pannello senza sprechi e a questo scopo è nato il Maximum Power Point Tracking (MPPT): un algoritmo applicato ad un convertitore di tensione capace di estrarre la massima potenza possibile dal pannello.

1.1) La cella fotovoltaica

I pannelli fotovoltaici sono composti, come illustrato in Figura 1, da un insieme di celle fotovoltaiche collegate in serie, così da creare delle stringhe che, a loro volta, vengono collegate in parallelo, così da comporre un generatore fotovoltaico. Quindi, per studiare le caratteristiche di un pannello, è necessario studiare il funzionamento di una singola cella.

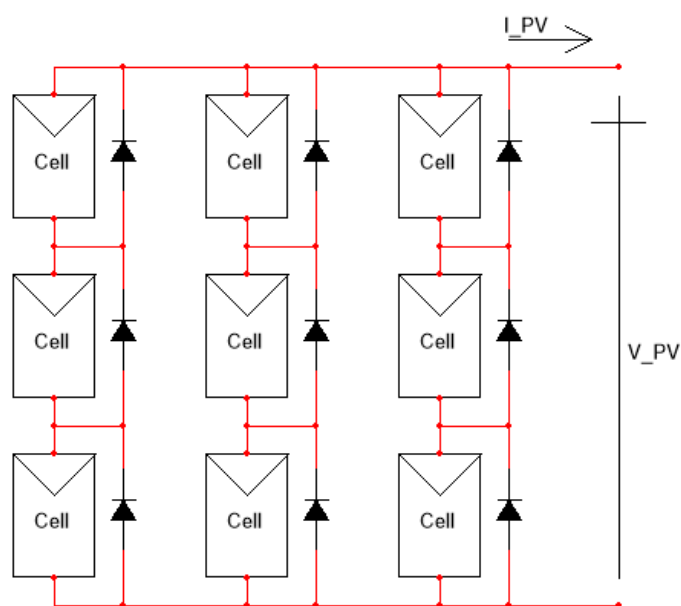


Figura 1

Le celle PV (Photovoltaic) riescono a generare energia elettrica grazie alla radiazione luminosa che cede energia agli elettroni degli atomi della cella; questo effetto è chiamato effetto fotoelettrico.

Grazie all'aumento di energia, gli elettroni riescono a staccarsi dagli atomi creando quindi una corrente. Tramite questo effetto è quindi possibile trasformare l'energia luminosa prodotta dal sole in corrente elettrica.

Lo schema elettrico equivalente della cella fotovoltaica è il seguente:

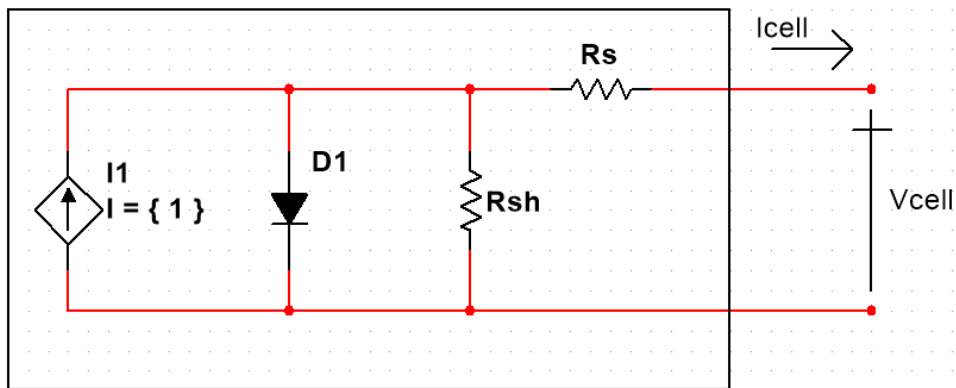


Figura 2

In Figura 2 si possono osservare diversi segnali e componenti:

- I_1 (o I_L): rappresenta la corrente che viene generata per effetto fotoelettrico, quindi dovuta agli elettroni che si muovono grazie all'energia ceduta dalla radiazione luminosa
- D_1 : giunzione pn equivalente della cella
- R_{sh} : rappresenta la perdita interna di corrente (leak current)
- R_s : resistenza interna della cella dovuta al materiale semiconduttore che la compone

In accordo con il modello della cella, l'equazione che si ottiene in condizioni standard di funzionamento (irradiazione di 1000 W/m^2 e temperatura della cella pari a $25 \text{ }^\circ\text{C}$) può essere ricavata applicando la prima legge di Kirchhoff ed è

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{cell} + I_{cell} * R_s}{\eta * V_T} \right)} - 1 \right] - \left[\frac{V_{cell} + I_{cell} * R_s}{R_{sh}} \right] \quad (1)$$

dove I_{cell} e V_{cell} sono rispettivamente corrente e tensione in uscita dalla cella fotovoltaica, I_L è la corrente generata dalla radiazione luminosa sul pannello, I_0 è la corrente di saturazione inversa del diodo D_1 , η è il fattore di idealità del diodo e V_T è il potenziale termico pari a 25.7 mV (spesso approssimato a 25 mV).

Spesso si utilizza il modello semplificato della cella fotovoltaica che trascura le perdite: R_{sh} si considera di valore infinito (quindi non ci sono correnti di leak) e R_s pari a 0 (quindi non ci sono perdite di tensione dovute alla resistenza del materiale del pannello).

Quindi, se si considera il valore di R_{sh} molto elevato (ha un valore nell'ordine dei 100k Ω) e I_L pari alla corrente di cortocircuito I_{sc} della cella alle condizioni standard, l'equazione (1) può essere semplificata.

L'ultimo termine dell'equazione può quindi essere trascurato così da considerare solo

$$I_{cell} = I_{sc} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{cell} + I_{cell} * R_s}{\eta * V_T} \right)} - 1 \right] \quad (2)$$

L'irraggiamento della cella ha effetti diretti sui valori di I_{sc} e V_{oc} (tensione a vuoto).

1.2) Caratteristica I-V e P-V di un pannello fotovoltaico

Le curve corrente-tensione di un pannello fotovoltaico vengono ottenute illuminando la cella con una radiazione luminosa uniforme su tutta la superficie; mantenendo anche la temperatura costante, si fa variare il carico e si misura la corrente prodotta e, in accordo con l'equazione (2), si ottengono le trans caratteristiche illustrate in Figura 3.

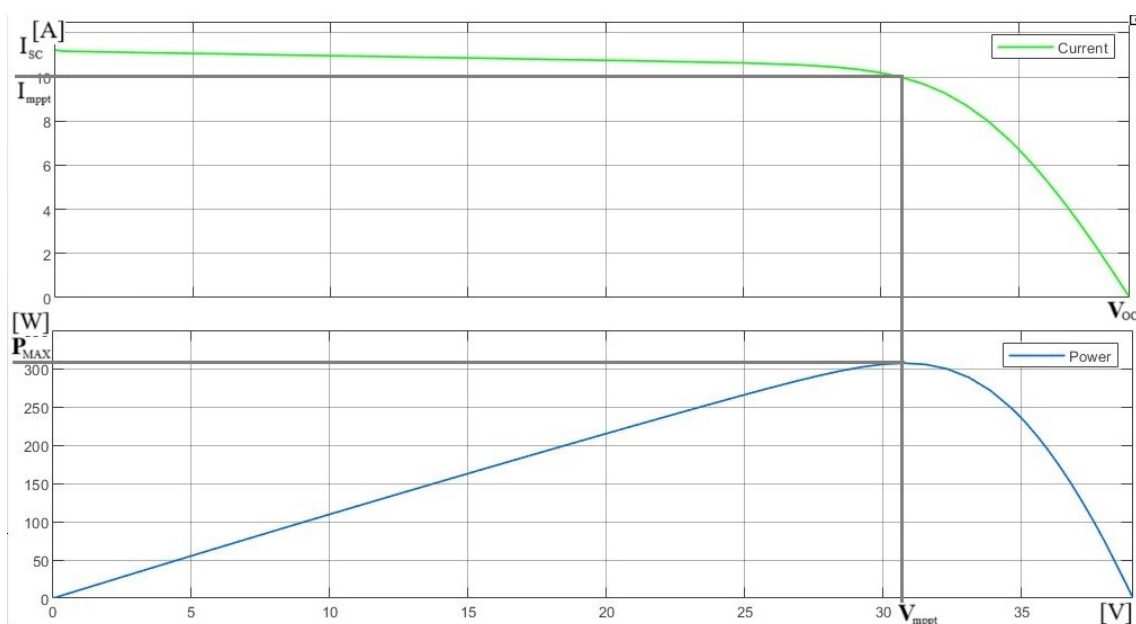


Figura 3

Agli estremi della curva tensione-corrente si possono notare dei punti importanti:

- V_{oc} tensione di circuito aperto: si misura in condizioni di resistenza di carico infinita e quindi quando la corrente erogata dal pannello è nulla;
- I_{sc} corrente di cortocircuito: si misura applicando una resistenza di carico nulla e quindi quando la tensione tra i capi del pannello è nulla.

- $(V_{mppt}; I_{mppt})$: coordinate del punto di massima potenza (MPP) nel quale la potenza erogata vale P_{max} .

La cella può operare in un range abbastanza grande di valori di tensione e di corrente in base al variare della resistenza di carico che le viene applicata in uscita e, con un opportuno valore, è possibile portare il pannello a lavorare nel punto di massima potenza erogabile.

Si nota che ai punti V_{oc} e I_{sc} corrisponde una potenza nulla poiché una delle due grandezze del prodotto è nulla; il grafico tensione-potenza risulta essere una funzione convessa che presenta in massimo globale in coordinate $(P_{max}; V_{mppt})$.

Per poter estrarre la massima potenza possibile, a parità di irradiazione luminosa, si vuole far lavorare il pannello nel punto di massimo.

1.3) Caratteristica P-V in condizioni di illuminazione parziale

Come si può vedere in Figura 1, un diodo di bypass viene connesso ai capi di ogni cella fotovoltaica in modo che, in caso di moduli non funzionanti a causa di parziale oscuramento del pannello, si possa utilizzare tutta l'energia prodotta dalla restante superficie illuminata senza che ci sia dissipazione di potenza da parte delle celle che non stanno generando.

È facile immaginare che, avendo un certo numero di celle che non generano corrente (o che comunque ne generano meno rispetto alla stringa in cui si trovano), il dispositivo non lavori alle stesse condizioni ed è quindi importante valutare e studiare anche questo tipo di funzionamento.

Un irradiazione non uniforme del pannello porta, oltre ad una riduzione di potenza massima, a dei picchi nella trans caratteristica:

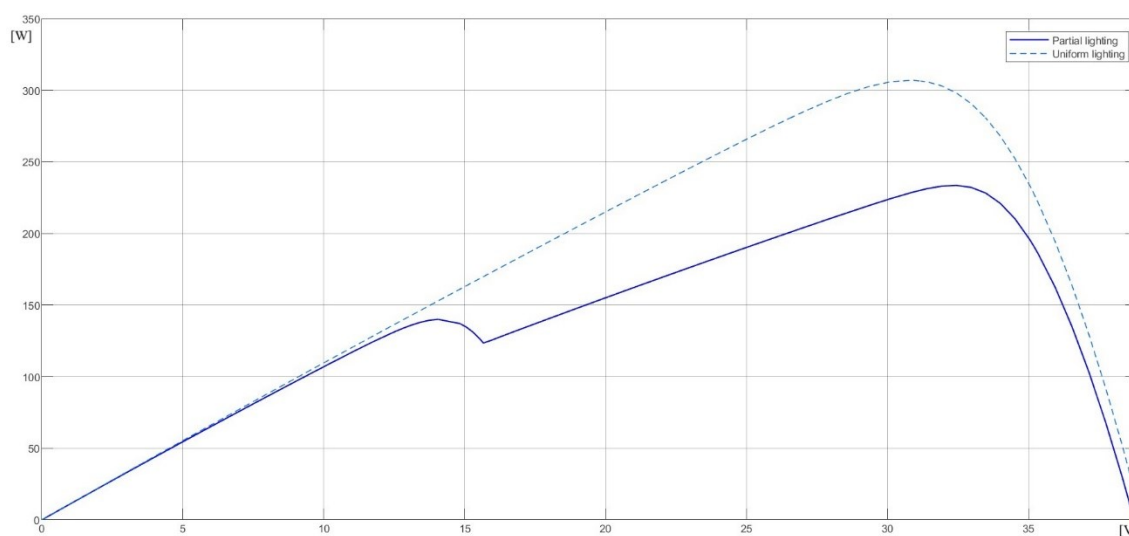


Figura 4

Nella Figura 4 è possibile visualizzare la curva tensione-potenza di un pannello fotovoltaico in condizioni di irraggiamento parziale rispetto alla condizione di irraggiamento uniforme.

La formazione di più picchi causa dei problemi all’algoritmo MPPT per l’inseguimento del punto di massima potenza poiché dev’essere capace di individuare sempre il massimo globale per poter estrarre la potenza massima disponibile.

È impossibile, misurando alla porta d’uscita del pannello, individuare se la riduzione di potenza erogata sia data da una riduzione di illuminazione uniforme o se sia data da una zona del pannello appena oscurata.

Inoltre, questo effetto non va ad influire direttamente sui valori di V_{oc} e I_{sc} ma, a causa del parziale oscuramento, vi è una conseguente variazione di temperatura, il quale incremento porta ad un esponenziale diminuzione della tensione di circuito aperto e un leggero incremento della corrente di corto circuito.

È quindi importate utilizzare un algoritmo MPPT che abbia la capacità di adattarsi velocemente anche a questa situazione trovando sempre il punto di lavoro ottimale indipendentemente dai valori ideali di V_{oc} e I_{sc} .

1.4) Struttura generale di un sistema fotovoltaico

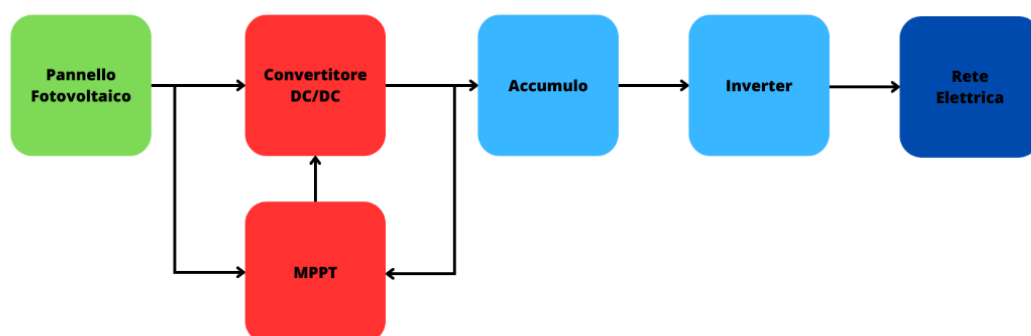


Figura 5

Come illustrato in Figura 5, un sistema fotovoltaico è composto da molteplici componenti che, se regolati e comandati opportunamente, sono in grado di far lavorare il pannello sempre nel MPP e sono:

- Pannello fotovoltaico: converte la radiazione luminosa in tensione e corrente (e quindi in potenza elettrica);
- Convertitore DC/DC: nel nostro caso sarà considerato un convertitore boost ma può essere anche di altre tipologie. Ha il compito di prelevare e regolare la potenza prodotta dal pannello e di convertirla;

- MPPT: microcontrollore comandato da un algoritmo capace di controllare il convertitore e di ottenere la massima potenza possibile dal pannello fotovoltaico e, in caso di un accumulatore di energia, regola anche i cicli di carica e scarica delle batterie;
- Accumulo (non sempre presente): insieme di batterie per poter accumulare l'energia prodotta per poi rilasciarla nel momento in cui va a mancare l'energia prodotta dal fotovoltaico (ad esempio durante la notte o in giornate particolarmente nuvolose);
- Inverter: capace di convertire la tensione continua in ingresso in tensione alternata a frequenza e ampiezza di rete.

Capitolo 2: Convertitore DC/DC

Il microcontrollore che regola e gestisce il funzionamento del convertitore richiede l'interfacciamento con dei sensori di corrente, tensione e, in particolari casi, di luminosità e temperatura, così da poter leggere i valori di ingresso e uscita del pannello. In questo modo è possibile aggiustare, in base a determinati algoritmi, il punto di lavoro e, quindi, posizionarsi nelle condizioni ottimali per il funzionamento.

Per poter variare il punto di lavoro delle celle fotovoltaiche è necessario poter variare il carico che viene visto dai morsetti del pannello. Questo è possibile farlo tramite un apposito controllo del convertitore di tensione.

Nel nostro caso considereremo un convertitore boost (o step-up) che ci permette di ottenere una tensione d'uscita maggiore rispetto a quella di ingresso. Infatti, se si considera il convertitore in modalità di funzionamento continuo (CCM) si ottiene:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \delta} \quad (3)$$

dove δ è il duty cycle dell'onda rettangolare con la quale si comanda il convertitore.

Assumendo che la potenza in input al convertitore (e quindi quella in uscita dal pannello) sia P_i e che la potenza d'uscita sia P_o , in steady state, e quindi sotto le condizioni di regime continuo, e considerando i componenti senza perdite ($P_i = P_o$) si ottiene:

$$\frac{R_i}{R_L} = \frac{\frac{V_i^2}{P_i}}{\frac{V_o^2}{P_o}} = (1 - \delta)^2 \quad (4)$$

Dove R_i è la resistenza equivalente di input del convertitore, e R_L è la resistenza di carico posta in uscita dal convertitore. Si può quindi trovare che

$$R_i = (1 - \delta)^2 R_L \quad (5)$$

Dall'equazione (5) si può notare che l'aumento di δ porta al diminuire del valore di R_i , che porta all'aumento del valore di I_i , che porta al diminuire di V_i e al conseguente spostamento del punto di lavoro del pannello.

Quindi, cambiando il valore di δ è possibile variare V_i , anche se non secondo una legge lineare.

2.1) Regolazione della potenza con variazione di tensione

La potenza d'uscita può essere calcolata come

$$P = \frac{V_i^2}{(1 - \delta)^2 R_L} = I_i^2 (1 - \delta)^2 R_L \quad (6)$$

Variando l'intervallo di accensione (δ) dello switch del convertitore, è possibile variare la tensione di uscita del pannello fotovoltaico e, di conseguenza, cambiare anche la potenza che il pannello riesce a fornire.

La derivata di potenza rispetto alla tensione vale

$$\frac{\partial P}{\partial V_i} = \frac{2V_i}{R_L(1 - \delta)^3} \left[(1 - \delta) + \frac{\partial \delta}{\partial V_i} \right] \quad (7)$$

Se ci si pone alla tensione V_m ($= V_{mpppt}$), che è la tensione alla quale si trova il punto di massima potenza erogabile, si ottiene

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V_i} \right|_{V_i=V_m} = 0 \quad (8)$$

Per trovare il punto di massima potenza (Maximum Power Point) basta far variare la tensione di ingresso e calcolare quando la derivata della potenza vale 0.

Quando il sistema raggiunge il MPP e quindi per $V_i = V_m$ finito e maggiore di 0, tramite le formule (7) e (8), è possibile scrivere

$$(1 - \delta) + \frac{\partial \delta}{\partial V_i} = 0 \quad (9)$$

e, risolvendola

$$\frac{\partial V_i}{V_i} = - \frac{\partial \delta}{1 - \delta} \quad (10)$$

L'equazione (10) può anche essere riscritta come

$$\frac{\Delta V_i}{V_i} = - \frac{\Delta \delta T_s}{(1 - \delta) T_s} \quad (11)$$

Infatti, l'equazione (11) è la base di partenza per riuscire a definire se la cella fotovoltaica sta funzionando nel punto di massima potenza.

È quindi sufficiente modificare il duty cycle δ , misurare la variazione della tensione ai capi della porta d'uscita del pannello fotovoltaico e, tramite la formula (11), calcolare il MPP.

2.2) Regolazione della potenza con variazione di corrente

Un ulteriore metodo per controllare il punto di lavoro del pannello fotovoltaico è quello di controllare la corrente piuttosto che la tensione, infatti, assumendo che $\Delta\delta$ sia piccolo, la variazione di potenza causata dalla variazione di corrente si può ricavare dall'equazione (6) e vale

$$\frac{\partial P}{\partial I_i} = 2(1 - \delta)I_i R_L \frac{(1 - \delta)I_i - I_i \partial \delta}{\partial I_i} \quad (12)$$

Come si può notare dalla Figura 3, V_i è una funzione di I_i , quindi la derivata di potenza d'uscita al valore $I_m (= I_{mpp})$ corrisponde a

$$\left. \frac{\partial P}{\partial I_i} \right|_{I_i=I_m} = 0 \quad (13)$$

e, in accordo alle equazioni (12) e (13), quando il sistema lavora al punto di massima potenza si può scrivere

$$\frac{\Delta I_i}{I_i} = \frac{\Delta \delta T_s}{(1 - \delta) T_s} \quad (14)$$

Quando la potenza è massima, il differenziale di potenza d'uscita della cella a tensione V_m è nullo.

Dalle equazioni (11) e (14) si può ricavare il criterio definitivo per definire se la cella sta effettivamente lavorando nel punto di potenza massima ed è

$$\frac{\partial I_i}{I_i} = - \frac{\partial V_i}{V_i} \quad (15)$$

Le due analisi svolte sopra dimostrano come sarebbe possibile sviluppare dei circuiti capaci di inseguire il punto di potenza massima campionando solamente tensione o corrente. Ad ogni modo, il metodo del campionamento di tensione risulta essere più facile da implementare e, quindi, più utilizzato per sistemi semplici.

Capitolo 3: Algoritmi MPPT

Parte importante del controllo MPPT è il software che, campionando le grandezze in uscita dal pannello fotovoltaico, è in grado di inseguire il MPP con velocità e accuratezza che dipendono dal funzionamento del programma, a parità di hardware utilizzato.

Per questo si è scelto di studiare i principali algoritmi per l'inseguimento del punto di massima potenza e di valutarne le prestazioni e la complessità.

3.1) 0.8 V_{OC}

Questo metodo consiste nel misurare la tensione di circuito aperto del pannello solare per poi posizionarsi ad un valore di tensione pari a $0.8 V_{OC}$ (o comunque percentuali vicine a 0.8) e mantenere sempre costante questa tensione ai capi del pannello.

Ovviamente non è un metodo del tutto efficace poiché la tensione a cui ci si porta sarà in un intorno della tensione V_{mpp} e si avranno, di conseguenza, delle perdite di potenza date dal fatto che non si è esattamente sul MPP.

Queste perdite, che sono al massimo nell'ordine delle decine di watt, sono accettabili se si pensa che l'algoritmo potrebbe essere implementato utilizzando semplicemente dell'elettronica analogica composta da un differenziale di tensione e da un PI, sempre se si presuppone di conoscere a priori il valore di V_{OC} . Quando il pannello si scalda, ha una diminuzione del valore di V_{OC} e, di conseguenza, lo scostamento dal MPP può essere abbastanza grande.

Mantenendo sempre un valore di tensione fisso e non avendo un vero e proprio inseguimento del MPP, questo algoritmo è in grado di fornire sempre la massima potenza senza transitori. Questo permette di estrarre, durante i cambiamenti di luminosità, maggiore potenza rispetto ad altri algoritmi che hanno bisogno di un transitorio.

3.2) Hill Climbing e Perturbation and Osservation (P&O)

Questi due algoritmi non sono altro che due diverse visualizzazioni dello stesso criterio di funzionamento e, infatti, funzionano in modo analogo con la differenza che il primo impone una perturbazione del duty cycle del convertitore, mentre il secondo impone una perturbazione sulla tensione di uscita del pannello.

Dalla Figura 3 si può visualizzare che, incrementando la tensione, la potenza aumenta se ci si trova a sinistra del MPP e decresce se ci si trova alla sua destra.

Se c'è un aumento di potenza bisogna ripetere l'azione appena eseguita e, in caso di una diminuzione di potenza, bisogna eseguire una perturbazione opposta a quella appena fatta. In

questo modo è possibile arrivare al punto di potenza massima per una determinata irradiazione del pannello.

Quando si raggiunge il punto di lavoro, il sistema continua ad oscillare attorno a quel punto fino a quando non ci sarà una variazione di radiazione che porterà ad una successiva variazione di potenza erogata.

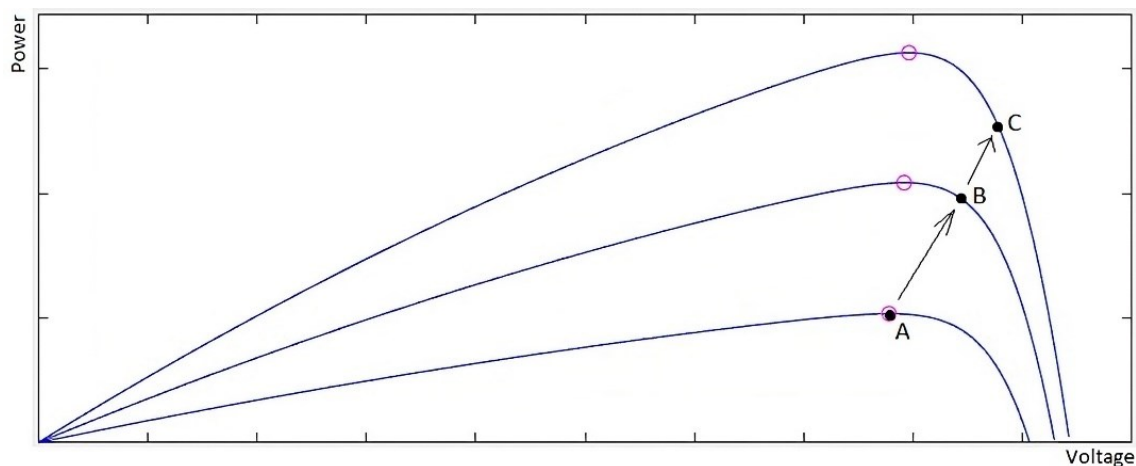


Figura 6

Come si nota dalla Figura 6, nel caso in cui la curva di potenza stia aumentando a causa di un aumento di illuminazione, si può verificare che, perturbando e aumentando la tensione nel punto A, il dispositivo legga un aumento di potenza e si porti nel punto B. Allo stesso modo può accadere che, continuando ad aumentare la curva di potenza, il controllore legga un ulteriore aumento di potenza aumentando la tensione ai capi del pannello e si porti nel punto di lavoro C.

Questo porta il sistema ad avere dei transistori che non inseguono realmente il MPP fino a quando l'illuminazione non assume un valore costante.

Un ulteriore problema di questo algoritmo è l'incapacità di trovare il massimo globale della funzione nel caso di illuminazione parziale. Il controllore infatti porta il sistema a lavorare al massimo locale più vicino.

Ad ogni modo vengono spesso utilizzati poiché sono semplici e facili da eseguire anche per controllori con scarse capacità di calcolo.

Inoltre, l'algoritmo ha un problema di ripple in steady state: una volta raggiunto il punto di lavoro, il sistema continua ad oscillare tra due stati.

L'oscillazione può essere minimizzata riducendo la dimensione della perturbazione; una perturbazione troppo piccola rallenta l'inseguimento dell'MPP.

È possibile creare un controllo in modo che l'ampiezza delle perturbazioni diminuisca man mano che ci si avvicina al punto di potenza massima. È quindi possibile modificare l'algoritmo

in modo che l'ampiezza a gradino della perturbazione assuma un valore proporzionale alla variazione di potenza.

In questo modo, quando ci si avvicina al punto di potenza massima le variazioni di potenza ad ogni gradino di perturbazione diminuiscono e, di conseguenza, si diminuisce anche la perturbazione successiva.

Con questa modifica è possibile avere un sistema che abbia una risposta dinamica veloce ma oscillazioni quasi nulle a regime.

3.3) Tecnica della Conduttanza Incrementale

Questo metodo si basa sul fatto che la derivata della curva di potenza nell'MPP abbia valore 0, e che il suo segno indichi da che parte siamo del punto:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} < 0 & \text{parte a dx del MPP} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \text{MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0 & \text{parte a sx del MPP} \end{cases}$$

(16)

Per un sistema fotovoltaico, la derivata di potenza in uscita rispetto alla tensione è data dall'equazione

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I * V)}{dV} = I + \frac{dI}{dV} = I + \frac{\Delta I}{\Delta V}$$

(17)

Grazie alla (17), le derivate al punto (16) posso essere riscritte come

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{parte a dx del MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{parte a sx del MPP} \end{cases}$$

(18)

E si può dedurre che, per trovare il MPP, è possibile comparare la conduttanza istantanea (I/V) con la conduttanza incrementale ($\Delta I/\Delta V$).

L'algoritmo è quindi rappresentato tramite il flowchart di Figura 7.

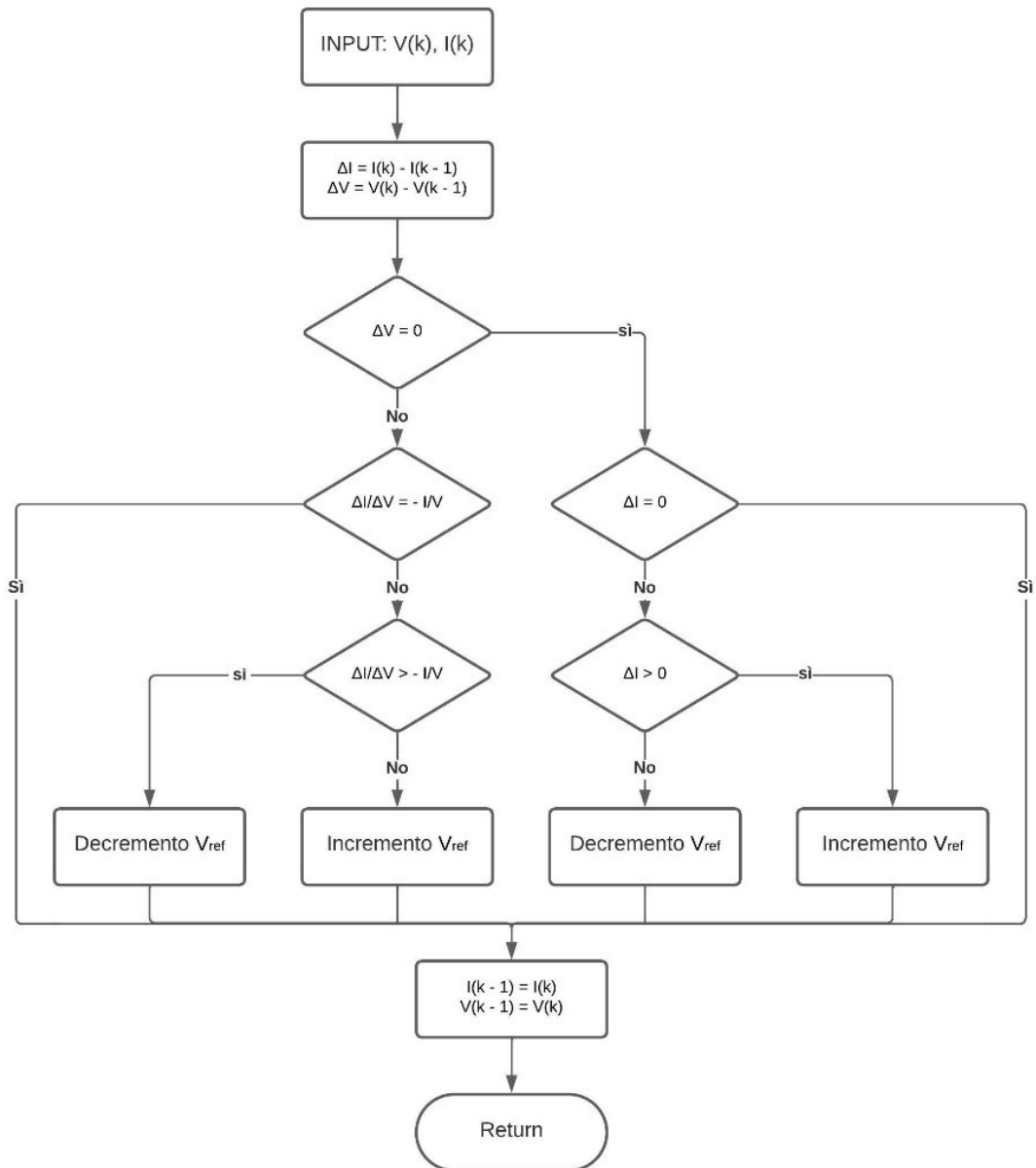


Figura 7

Dove V_{ref} è la tensione che, nell'MPP, coincide con V_{mppt} ed è il riferimento a cui il sistema è forzato a lavorare. Una volta raggiunto il punto di massima potenza, il funzionamento del sistema viene mantenuto uguale fino a quando non viene rilevata una variazione di ΔI , corrispondente ad una variazione di illuminazione ambientale.

In questo caso l'algoritmo incrementerà o decremerà il valore di V_{ref} in modo da poter inseguire il MPP.

La velocità dell'inseguimento del punto dipende dalla quantità che viene incrementata alla tensione di riferimento: incrementi maggiori permettono un inseguimento veloce ma, una volta arrivati quasi a regime (e quindi con V_{ref} circa uguale a V_{mppt}), il sistema potrebbe oscillare, molto meno rispetto al P&O, attorno al valore esatto di tensione.

Un altro metodo per realizzare l'algoritmo della conduttanza incrementale consiste nell'utilizzare la conduttanza istantanea invece di quella incrementale per generare un segnale d'errore:

$$\varepsilon = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}$$

(19)

Da questa relazione si dimostra che ε va a 0 solo quando ci troviamo esattamente sull'MPP. La misurazione istantanea di tensione e corrente richiede due sensori.

Questo metodo si adatta bene all'implementazioni in DSP e microcontrollori, poiché hanno la possibilità di formulare una decisione (if / else) facilmente e si possono anche mantenere in memoria i precedenti valori di tensione e corrente.

Il metodo della conduttanza incrementale ha la stessa efficienza del metodo P&O e un buon rendimento riguardo all'inseguimento dell'MPP anche per cambi repentini di illuminazione. Anche qui è presente, sebbene in maniera molto meno marcata, il problema legato alla scelta dell'ampiezza della perturbazione, a cui si è cercato di porre rimedio con il metodo dell'applicazione di ampiezze variabili, ma ciò richiede una circuiteria di controllo più complessa.

3.4) Particle Swarm Optimization (PSO)

L'algoritmo PSO (in italiano "ottimizzazione con sciami di particelle") è un metodo euristico di ricerca e ottimizzazione, ispirato al movimento degli sciami.

In generale, per l'ottimizzazione di un problema, il PSO sfrutta una popolazione di soluzioni candidate (chiamate "particelle") che si spostano nello spazio di ricerca sotto l'indicazione di semplici formule che tengono conto della loro velocità corrente, le loro conoscenze dello spazio di fitness (misura utilizzata per indicare la qualità di ogni soluzione) e la conoscenza condivisa.

Conoscere lo spazio di fitness significa conoscere la migliore soluzione esplorata fino ad un determinato istante, mentre la conoscenza condivisa implica che si sappia la miglior soluzione generale identificata.

L'algoritmo permette di pesare queste tre caratteristiche e, tramite l'utilizzo di piccoli jittering (tremolii) casuali, ha la capacità di uscire da eventuali massimi locali per trovare sempre il massimo globale.

Per applicare questo algoritmo al controllo MPPT bisogna considerare che le particelle si riferiscono a determinati valori di duty cycle del convertitore. Quest'ultimo viene quindi

sottoposto ad una serie casuale di cicli di funzionamento dai quali si stima la potenza fotovoltaica.

L'algoritmo inizia con una soluzione random e trova la soluzione ottimale attraverso un certo numero di iterazioni, dando poi un valore di fitness alla soluzione trovata.

Inoltre, il PSO è concettualmente semplice con buona precisione di inseguimento e alta velocità di convergenza.

Il suo funzionamento è rappresentato in Figura 8.

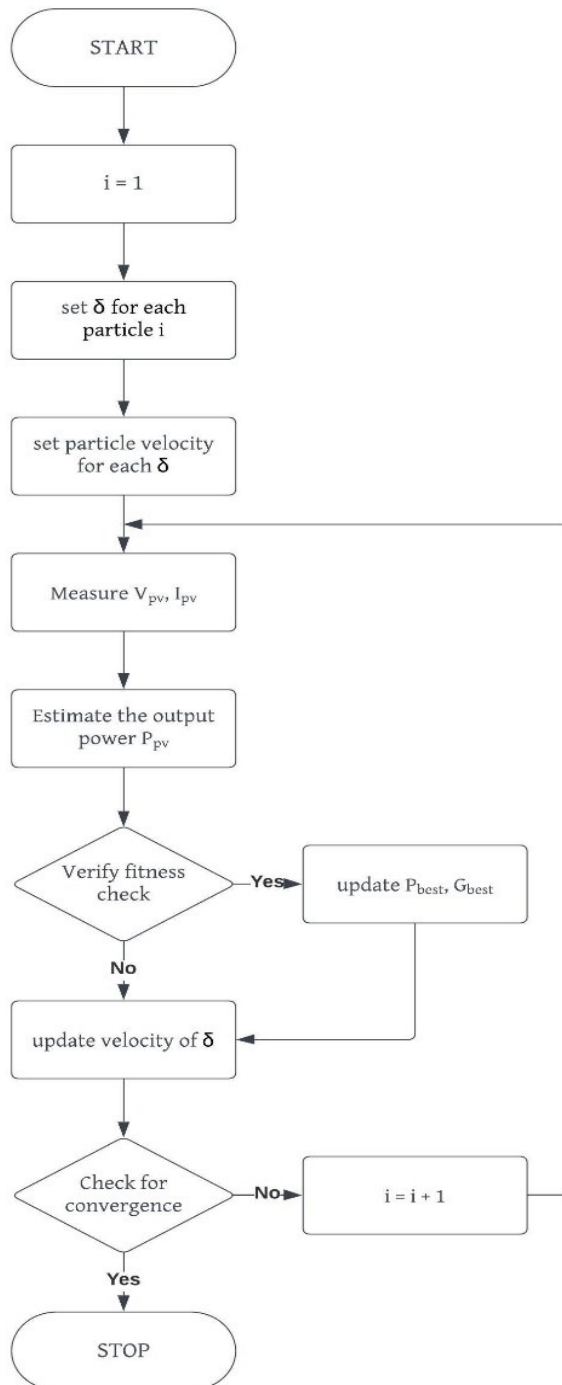


Figura 8

Nel flowchart sopra, P_{best} è il nome dato al valore più alto di potenza e G_{best} si riferisce al ciclo di funzionamento che contribuisce alla massima potenza.

I duty cycles vengono aggiornati nelle iterazioni successive fino al raggiungimento dell'MPP.

Una volta che tutte le soluzioni convergono ad un unico valore di duty cycle, si può affermare che si è arrivati nel MPP.

3.5) Hybrid MPPT Algorithms

La combinazione di metodi base, come P&O e il metodo della conduttanza incrementale (INC), con algoritmi più complessi, come il PSO, danno vita ad una tipologia di algoritmi MPPT detti ibridi.

Combinando gli algoritmi visti in precedenza si possono ottenere i metodi PSO-P&O e PSO-INC che sono molto usati rispetto agli altri algoritmi ibridi.

L'idea che sta dietro al funzionamento di questi algoritmi consiste nel fatto che l'algoritmo PSO insegue molto bene il picco globale di potenza e il metodo P&O oppure INC contribuiscono al mantenimento del sistema nel punto di lavoro trovato.

Il passaggio da PSO a uno degli altri due algoritmi avviene una volta che la differenza di posizione delle particle scende sotto ad un certo valore percentuale (di solito 1%) e si ritorna allo stato iniziale quando si rilevano dei cambiamenti nell'irradiazione luminosa.

Un altro metodo ibrido, non molto usato, è il 0.8 V_{OC} migliorato: una combinazione del modello 0.8 V_{OC} con una strategia di scansione con la quale vengono selezionate diverse zone in base al numero totale di picchi possibili.

La scansione è limitata solo all'area selezionata; questo rende il processo più veloce rispetto ad una scansione totale della curva di potenza.

Una volta trovato il picco globale tra tutte le zone trovate, l'algoritmo mantiene il duty cycle per mantenere il punto di lavoro trovato.

3.6) Neural Network (NN)

Una rete neurale è una struttura base degli algoritmi di intelligenza artificiale. La struttura base che descrive il funzionamento di una rete neurale è molto semplice:

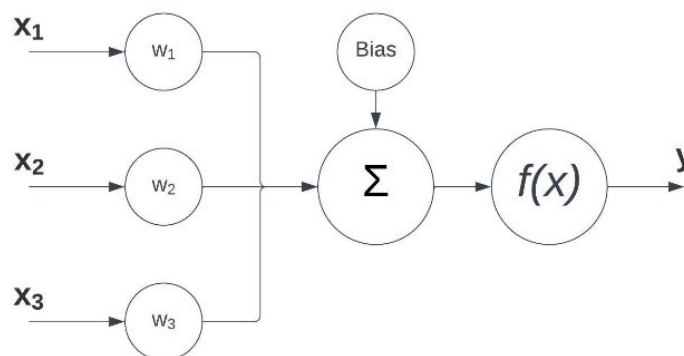


Figura 9

Nel caso di una rete neurale per algoritmi MPPT, gli input sono tensione, corrente, temperatura e irradiazione solare e l'output (chiamato anche "goal") è il valore di duty cycle con cui comandare il convertitore di tensione.

Gli input vengono moltiplicati per degli opportuni pesi e poi sommati tra loro (eventualmente viene sommato anche un Bias). Sul valore ottenuto viene applicata una funzione che determinerà il valore che l'output deve assumere.

Per funzionare correttamente, la rete neurale richiede un addestramento che viene fatto tramite l'utilizzo di algoritmi particolari per poter simulare più casistiche possibili di irradiazione e temperatura. In questo modo la rete potrà reagire con prontezza e precisione ad ogni possibile cambiamento ambientale.

Per addestramento di una rete neurale si intende trovare i corretti valori dei pesi degli input e un'opportuna funzione in modo tale che il valore di output abbia un errore che sia il più piccolo possibile.

L'addestramento di questi algoritmi avviene semplicemente a livello software dove, simulando determinate combinazioni dei valori di input, è possibile fornire già anche un valore ottimale di duty cycle. Tramite apposite tecniche di training, è possibile fare in modo che i valori dei pesi siano cambiati per far combaciare l'output della rete neurale con quello teorico, calcolato in base alle caratteristiche del convertitore e del pannello alla quale saranno collegati.

Una volta allenato l'algoritmo (quando l'algoritmo ha dei valori tali da commettere un errore molto piccolo) questo può essere estratto ed implementato nel circuito finale dell'MPPT.

Questo algoritmo, se allenato bene, non ha bisogno di rilevare i valori di tensione e corrente in uscita dal pannello ma richiede solo dei sensori per la lettura della radiazione solare incidente sul pannello e della temperatura del pannello.

Chiaramente, rispetto agli algoritmi precedenti, la complessità di realizzazione di questo algoritmo aumenta notevolmente, soprattutto per quanto riguarda la parte di addestramento della rete neurale ma permetterebbe un inseguimento pressoché perfetto del MPP anche durante i transitori.

3.7) Genetic Algorithm (GA)

Gli algoritmi genetici sono spesso utilizzati perché possono modificare insiemi di soluzioni per convergere alla soluzione del problema che si vuole risolvere.

Il funzionamento è basato sul concetto di evoluzione dei cromosomi. La popolazione iniziale viene, in qualche modo, decodificata in numeri reali e vengono valutati i valori di fitness per ciascun cromosoma. Successivamente vengono eseguite diverse operazioni genetiche di

selezione, crossover e mutazione per poter ottenere il risultato migliore che, nel nostro caso, è la massimizzazione della potenza d'uscita.

Poiché il GA si basa su una variazione significativa di dati, viene spesso utilizzato per poter apprendere efficacemente i modelli di temperatura e irraggiamento che possono poi essere utilizzati per il training delle reti neurali.

Di conseguenza, non viene direttamente implementato nei sistemi MPPT, ma viene implementato ed eseguito in fase di simulazione per poter addestrare il meglio possibile gli algoritmi che funzionano con le reti neurali.

Non è l'unico metodo possibile per l'addestramento ma sicuramente è uno tra i più efficaci per poter ottenere un modello capace di rispondere velocemente e con precisione alle variazioni ambientali, soprattutto quando la quantità di dati disponibile per l'addestramento non è sufficiente.

Capitolo 4: Simulazione Algoritmi

Per poter valutare realmente le prestazioni degli algoritmi si è deciso di creare, tramite l'applicativo Simulink di MatLab, un modello di MPPT nel quale sia possibile scegliere l'algoritmo con il quale comandare il sistema.

In questo modo si è certi che la base circuitale del sistema rimanga uguale per tutti gli algoritmi e che non vada ad influenzare i tempi di inseguimento dell'MPP.

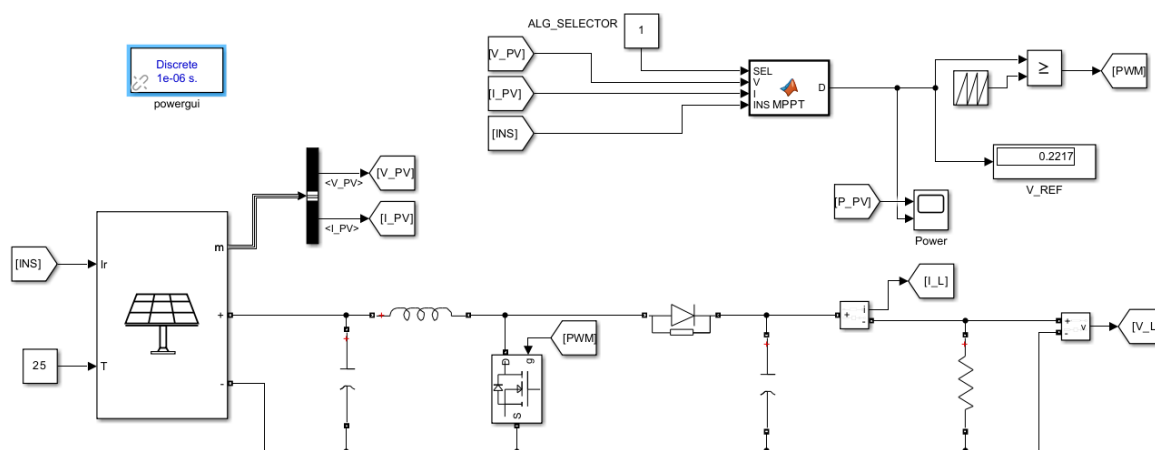


Figura 10

La Figura 10 rappresenta il setup Simulink utilizzato durante le simulazioni e segue esattamente la parte iniziale dello schema illustrato in Figura 5: il pannello fotovoltaico è collegato ad un convertitore DC/DC (in questo caso di tipo boost) comandato da un segnale PWM generato da un controllore MPPT che esegue l'algoritmo selezionato. In questo modo è possibile simulare gli algoritmi senza variare nulla di quello che comprende l'hardware del sistema.

Il pannello fotovoltaico scelto per il test ha le seguenti specifiche:

V_{OC}	38.84 V
I_{OC}	11.14 A
V_{mpp}	30.7 V
I_{mpp}	9.97 A

Dalle quali è possibile ricavare che la potenza massima erogabile in condizioni standard (irradiazione di 1000 W/m² e temperatura del pannello pari a 25°C) è pari a 306.08 W.

Le curve di potenza del pannello sono raffigurate in Figura 11.

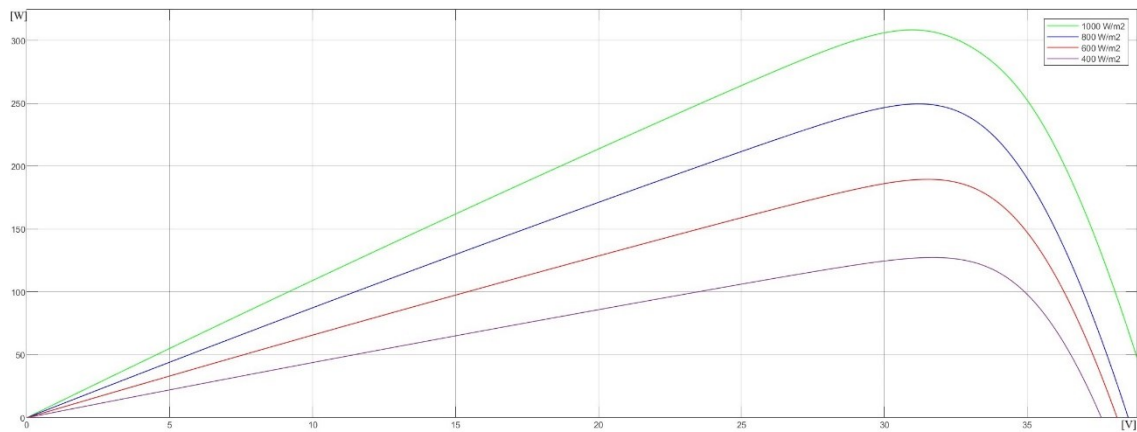


Figura 11

I punti di massima potenza per ogni curva hanno coordinate [31.7V; 127.42W], [31.56V; 189.57W], [31.17V; 249.52W] e [30.8V; 307.08W].

Per valutare velocità e precisione di inseguimento del punto di lavoro di massima potenza si impone un pattern di radiazione luminosa con delle variazioni istantanee:

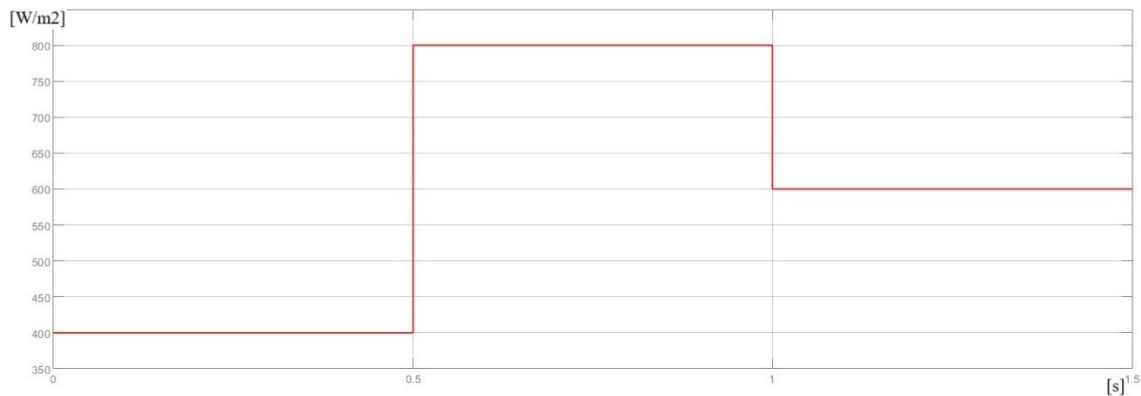


Figura 12

In questo modo è possibile visualizzare facilmente i tempi di risposta del sistema per i diversi algoritmi.

Calcolando la media di potenza che viene estratta dal pannello è poi possibile capire quanto un algoritmo sia veloce e preciso a raggiungere il punto MPP, visto che per il tempo di raggiungimento del punto, la potenza estratta sarà minore. La potenza media estratta avrà valori minori anche se l'algoritmo presenterà oscillazioni una volta arrivato a regime.

Le sottostanti simulazioni vengono eseguite sotto alla condizione di illuminazione completa del pannello visto che la maggior parte degli algoritmi è in grado di trovare solo il massimo locale più vicino alla condizione di partenza.

4.1) 0.8 V_{OC}

Questo algoritmo ha una risposta istantanea alla variazione di potenza erogata dal pannello ed è anche molto facile da implementare ma, come spiegato in precedenza, non tiene conto di eventuali variazioni di temperatura (e quindi variazione del MPP) e di eventuali picchi locali.

A 25°C, il grafico della potenza erogata nel tempo dal pannello risulta come illustrato nella sottostante Figura 13.

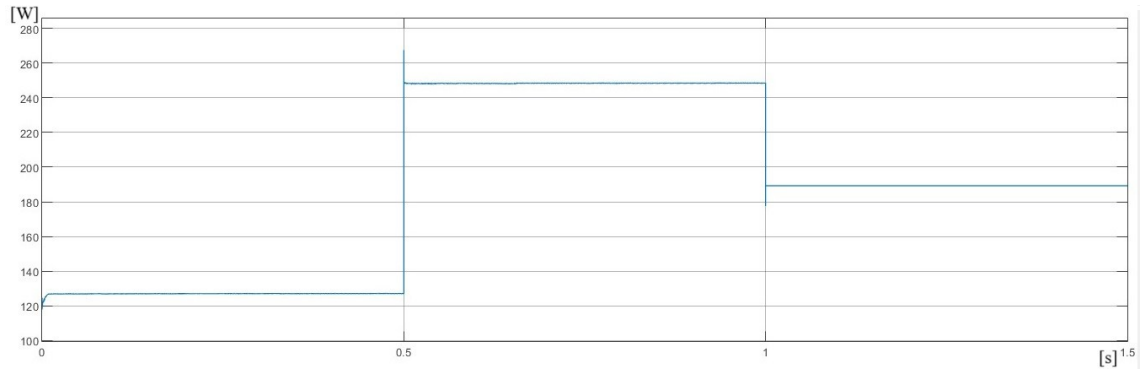


Figura 13

A temperature maggiori il grafico mantiene la forma ma con valori di potenza minori; questo è dovuto al fatto che la tensione V_{mpp} diminuisce all'aumentare della temperatura e il MPP si sposta. L'algoritmo, creato appositamente per mantenere sempre la tensione ai capi del pannello pari a $0.8V_{OC}$, non insegue il punto ottimale di lavoro e, di conseguenza, la potenza estratta diminuisce man mano che la temperatura aumenta.

4.2) Hill Climbing

Per la simulazione di questo algoritmo si sceglie che la grandezza del gradino del duty cycle sia pari a 0.5%. Questa scelta è stata fatta per permettere al sistema di raggiungere in tempi abbastanza brevi il punto di lavoro.

Come è possibile osservare dalla sottostante Figura 14, quando il sistema è a regime oscilla attorno al MPP; questo comporta delle oscillazioni evidenti soprattutto a potenze maggiori.

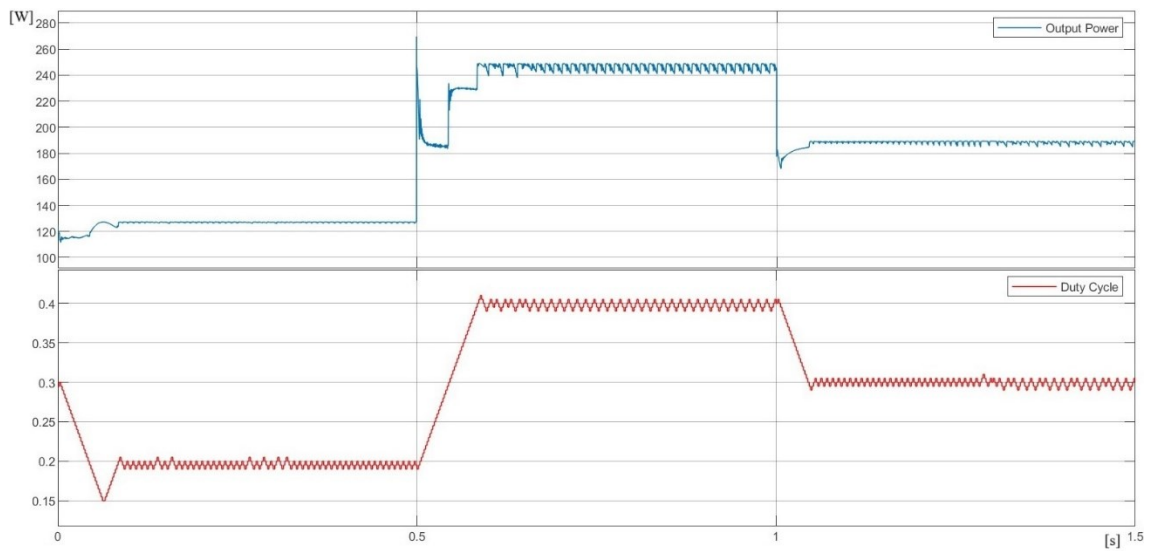


Figura 14

La potenza media che questo algoritmo riesce ad estrarre in queste condizioni è pari a 182.7W. Questo valore, minore rispetto a quello di altri algoritmi, è dovuto anche al fatto che il sistema continua ad oscillare attorno al MPP che è un punto di massimo e, quindi, la potenza estratta sarà, sebbene di poco, sicuramente minore della potenza massima estraibile.

È possibile simulare anche il comportamento di questo algoritmo quando viene applicata un'irradiazione che aumenta linearmente con una pendenza definita, come la seguente:

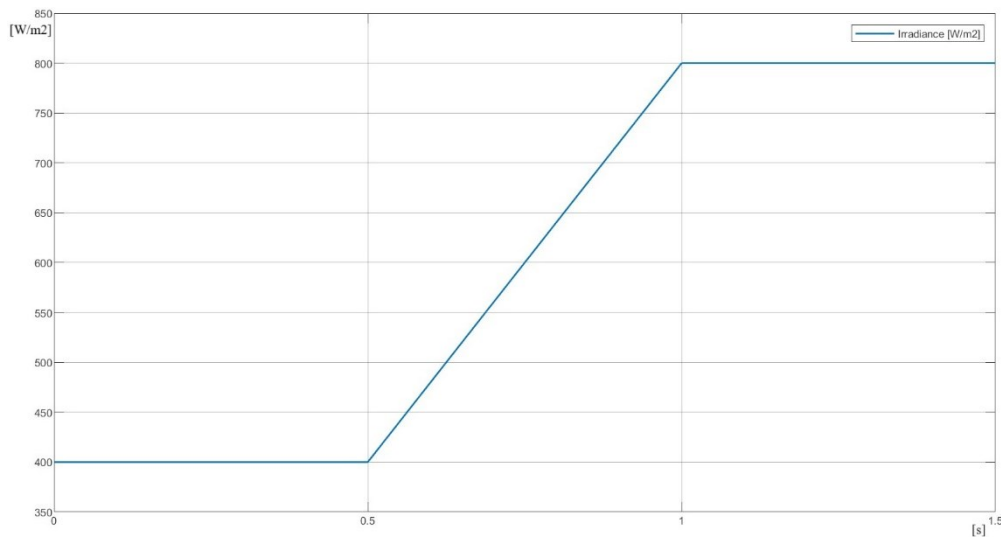


Figura 15

Il risultato che si ottiene è visualizzabile in Figura 16 ed è possibile notare che avviene il fenomeno illustrato in Figura 6: l'algoritmo legge l'aumento di tensione dovuto all'aumento di irradiazione e lo interpreta come un avvicinamento al MPP e, di conseguenza, continua ad aumentare il riferimento di tensione.

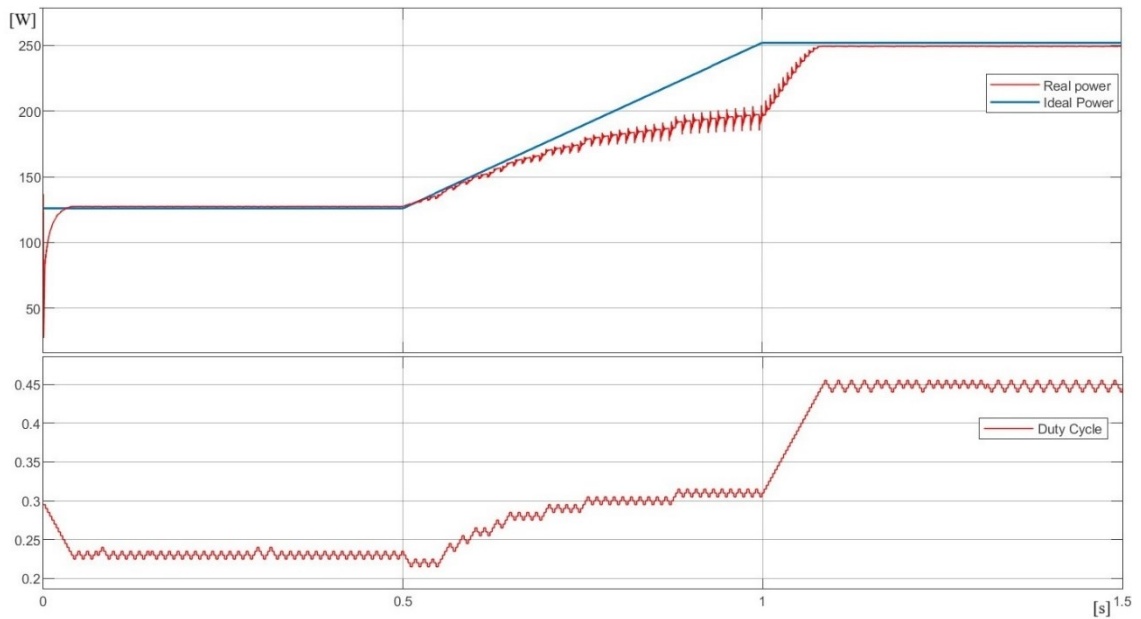


Figura 16

L'algorithmo riesce a riportare il pannello fotovoltaico a lavorare nel MPP solo una volta che l'irradiazione solare assume un valore costante.

Per ridurre le oscillazioni in steady state è possibile utilizzare l'algorithmo Hill Climbing ma con incrementi variabili: il valore del duty cycle varia in base alla variazione di potenza appena ottenuta.

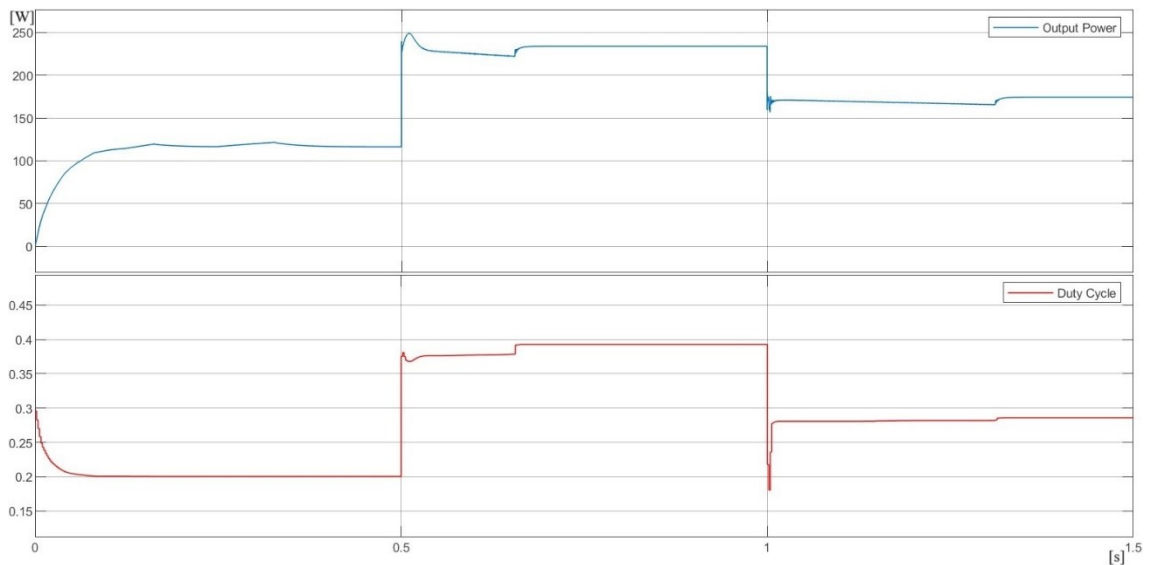


Figura 17

Come è possibile notare in Figura 17, si possono ottenere tempi di risposta veloci senza oscillazioni in steady state. In questo caso, avendo variazioni istantanee di illuminazione e, di conseguenza, di potenza, anche il valore del duty cycle varia istantaneamente.

4.3) Tecnica della conduttanza incrementale

A differenza degli altri algoritmi testati, questo funziona controllando e modificando il valore di tensione alla porta d'uscita del pannello fotovoltaico piuttosto che il duty cycle.

L'algoritmo ha un'ottima risposta alle variazioni ambientali ed è capace di raggiungere il MPP con velocità e precisione.

Come è possibile visualizzare dalla sottostante Figura 18, il riferimento di tensione presenta molte oscillazioni nell'ordine dei decimi di Volt ma comunque non presenta oscillazioni visibili sul valore di potenza estratta dal pannello.

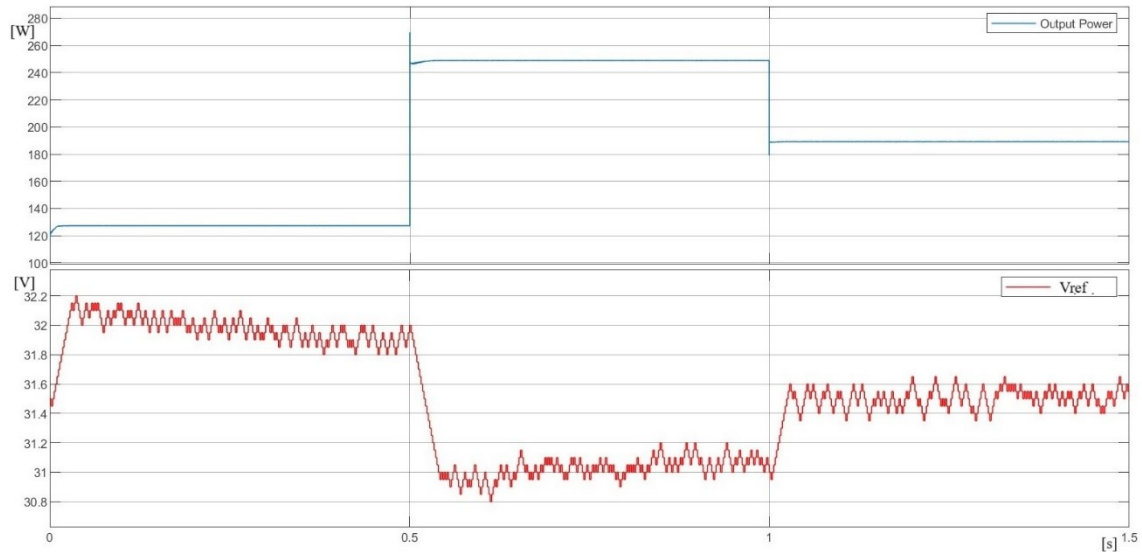


Figura 18

L'algoritmo è molto efficiente e non è eccessivamente complesso da realizzare.

4.4) PSO

L'algoritmo PSO sfrutta lo sciame di soluzioni (in questo caso 3) per raggiungere la soluzione ottimale. È capace di portarsi in un intorno del MPP in tempi brevi ma non è molto preciso e provoca, durante il transitorio di ricerca, delle oscillazioni di potenza piuttosto grandi.

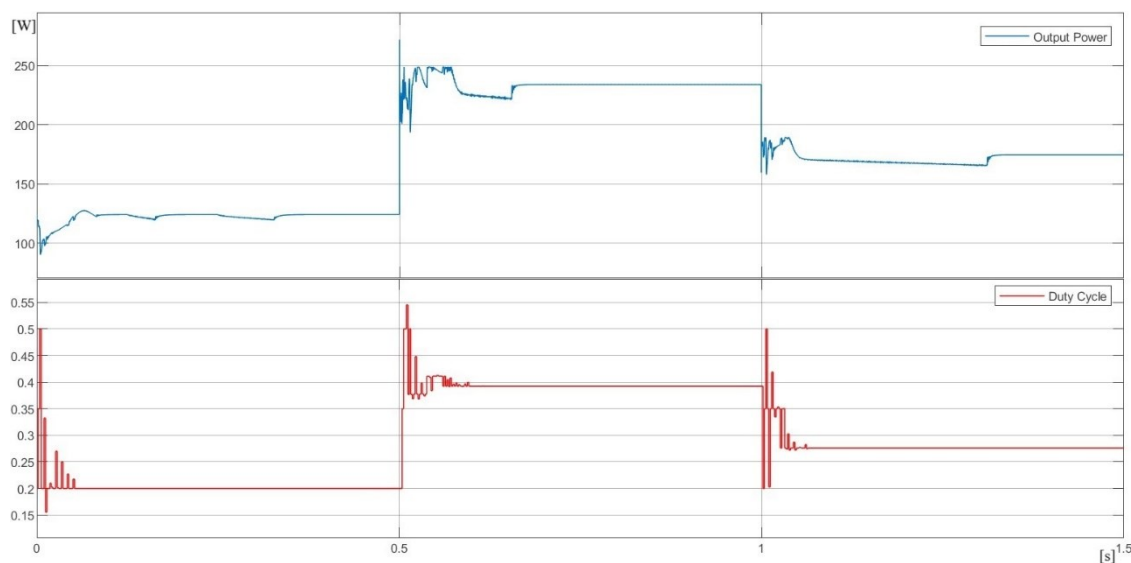


Figura 19

Come si può vedere in Figura 19, i valori di duty cycle delle soluzioni tendono a convergere verso un unico valore.

Grazie a questo ampio range di valori controllati, l'algoritmo è in grado di trovare il MPP anche in presenza di massimi locali di potenza.

È più complicato da realizzare rispetto agli altri algoritmi e richiede che il sistema si adatti velocemente in modo da poter leggere il corretto valore di potenza all'interno di un solo ciclo del programma. Inoltre, l'algoritmo richiede la regolazione di alcune costanti moltiplicative per la modifica delle due soluzioni con potenza minore che richiedono diversi tentativi prima di trovare i valori per il funzionamento ottimale.

4.5) PSO - P&O

Il PSO-P&O è uno tra gli algoritmi ibridi sopra studiati. Il suo funzionamento consiste nella sequenza di utilizzo dell'algoritmo PSO susseguito poi dal P&O.

Così facendo è possibile sfruttare la velocità e la capacità di uscire da massimi locali del PSO per poi avvicinarsi e mantenere con precisione nel MPP grazie al P&O.

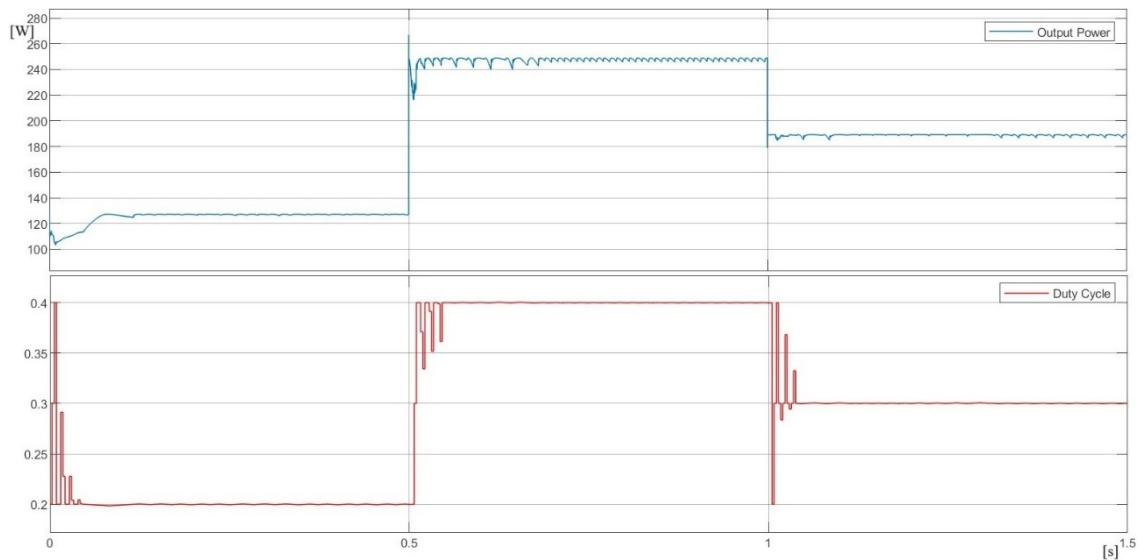


Figura 20

Come notabile in Figura 20, quest'algoritmo mantiene delle piccole oscillazioni in steady state ma compensa con la velocità di inseguimento del MPP e con la capacità di uscire da massimi locali di potenza.

Ad ogni variazione di irradiazione, l'algoritmo PSO utilizza gli stessi tre valori di duty cycle per poi modificare i due con minore potenza estratta. Questo permette alle tre soluzioni di avvicinarsi sempre di più al valore ottimale per la massima estrazione di potenza.

È interessante valutare le prestazioni dell'algoritmo anche per un'illuminazione non uniforme del pannello fotovoltaico sotto test. La curva tensione-potenza del pannello parzialmente illuminato utilizzato per questa simulazione è la seguente:

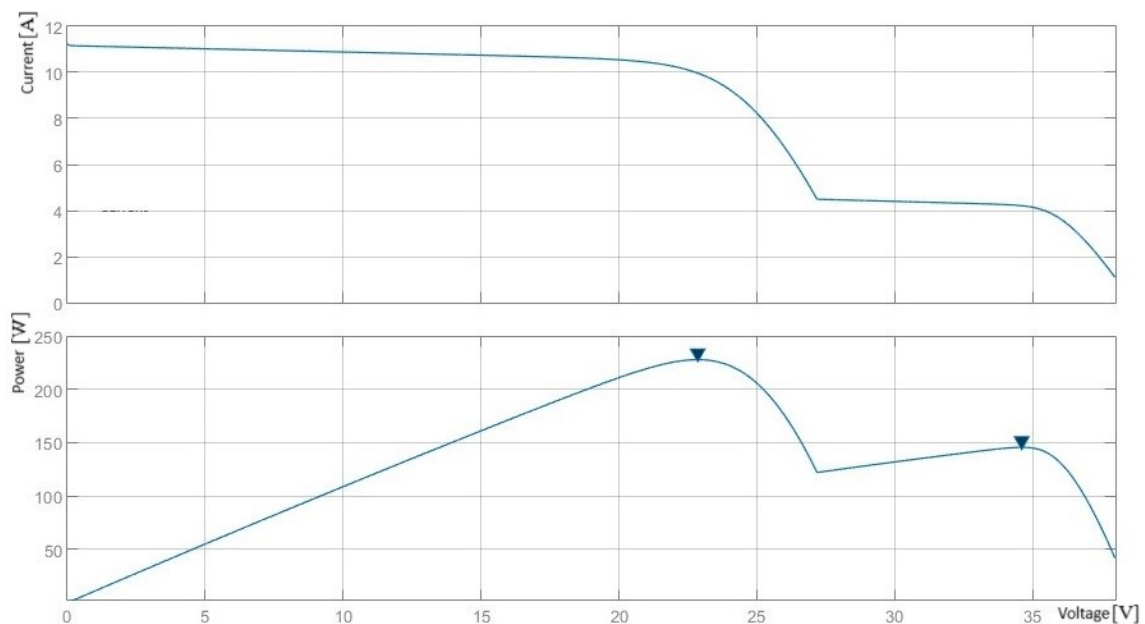


Figura 21

Il punto di massimo globale ha coordinate [22.86V; 227.8W] e il massimo locale [34.6V; 145.7W]. Per simulare la capacità dell’algoritmo di trovare il massimo globale anche in questa situazione si decide di far iniziare la simulazione con il pannello completamente illuminato per poi oscurarlo e valutare la capacità dell’algoritmo PSO di portarsi al MPP visualizzabile in Figura 21.

Per facilitare la visualizzazione del punto di lavoro del sistema si è deciso di inserire anche il grafico che raffigura la tensione ai capi del pannello.

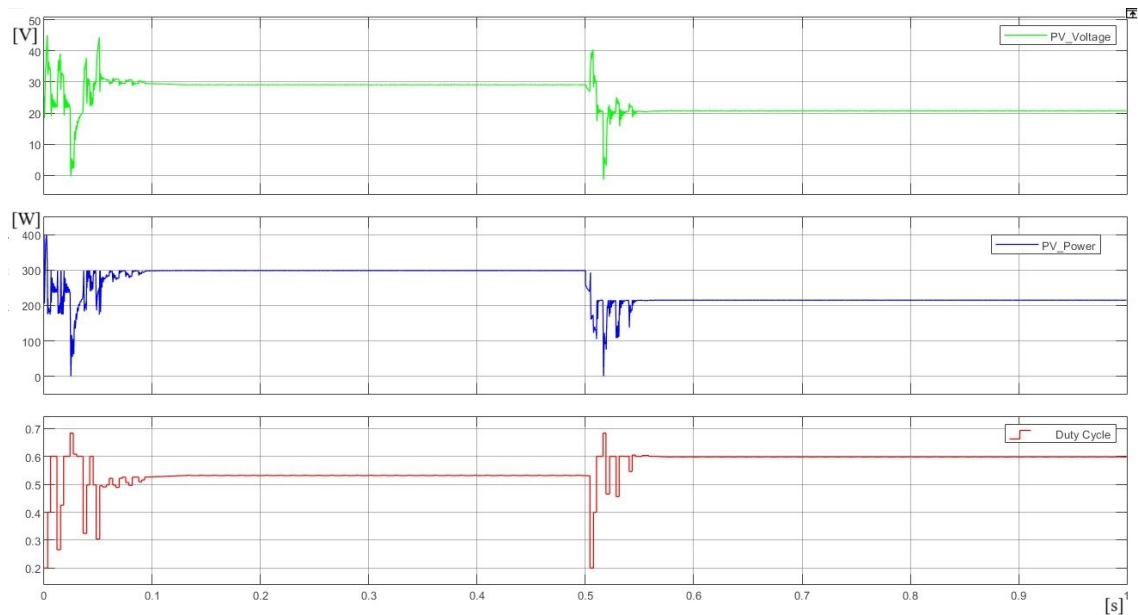


Figura 22

L’algoritmo riesce a trovare il MPP anche in caso si presentino massimi di potenza locali e questo è facilmente osservabile poiché, nel grafico della tensione in Figura 22, si può vedere come nella prima parte il valore sia di circa 30V mentre nella seconda metà scenda a circa 20V.

Capitolo 5: Risultati finali

Tutti gli algoritmi utilizzati riescono, con caratteristiche diverse, ad inseguire l'MPP con più o meno precisione e i risultati ottenuti sono in linea con la teoria studiata nel Capitolo 3.

Nella sottostante tabella sono riportati gli algoritmi testati con la potenza media estratta durante il periodo di tempo della simulazione in modo che possa essere fatta una veloce comparazione tra di essi.

Algoritmo	Potenza Media [W]
0.8 Voc	184.8
Hill Climbing	182.7
Hill Climbing Modificato	183.9
Conduttanza Incrementale	186.5
PSO	173.9
PSO-P&O	185.2

Gli algoritmi che hanno estratto maggiore potenza dal pannello durante la simulazione sono la conduttanza incrementale e il PSO-P&O; questo perché entrambi presentano risposte molto veloci alle variazioni di luminosità e hanno oscillazioni nulle in steady state sebbene abbiano prestazioni completamente diverse per quanto riguarda il funzionamento in condizioni di pannello parzialmente illuminato.

La scelta di utilizzo di ogni algoritmo va pesato anche in base all'impiego e al sistema in cui si vuole inserirlo: in dispositivi in cui è importante riuscire ad estrarre più energia possibile è importante utilizzare programmi efficienti mentre, per utilizzi economici dove non è essenziale poter ricavare ogni Watt di potenza, è meglio utilizzare metodi semplici come il 0.8 Voc.

Il settore dei pannelli fotovoltaici e degli MPPT è ancora in via di sviluppo ed è possibile che vengano scoperte nuove idee per trovare ed inseguire istantaneamente il MPP così da ricavare sempre il massimo da ogni situazione di irradiazione.

Bibliografia

- D. Gupta, S. P. Koiry, P. Veerender, P. Jha, C. Sridevi and A. K. Chauhan, "Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell and Module for IoT applications," 2023 International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT), Bengaluru, India, 2023, pp. 728-734, doi: 10.1109/IDCIoT56793.2023.10053556.
- P. Arun and S. Mohanrajan, "Effect of Partial Shading on Vehicle Integrated PV System," 2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 2019, pp. 1262-1267, doi: 10.1109/ICECA.2019.8821888.
- D. Shetty, N. S. Jayalakshmi, M. Arjun and P. Hebbar, "Evaluation of MPPT Algorithms for PV System under Partial Shading Conditions," 2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP), Hyderabad, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICICCSP53532.2022.9862362
- L. Liu and S. Liu, "A Maximum Power Point Criterion of MPPT and its Application," 2023 IEEE 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chongqing, China, 2023, pp. 719-724, doi: 10.1109/ITNEC56291.2023.10082306.
- J. K. Sahu, S. K. Mishra and J. P. Patra, "MPPT Extremum Seeking Control Algorithm for Standalone PV System," 2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), Tirunelveli, India, 2023, pp. 156-160, doi: 10.1109/ICSSIT55814.2023.10060869.
- Y. Liu, D. Xia and Z. He, "MPPT of a PV system based on the particle swarm optimization," 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, Shandong, 2011, pp. 1094-1096, doi: 10.1109/DRPT.2011.5994058