



Università degli Studi di Firenze

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRICA E
DELL'AUTOMAZIONE

Elaborato di Complementi di Elettrotecnica

**Tecniche d'inseguimento del Maximum Power Point
Algoritmi di Ricerca**

All'attenzione di:

Chiarissimo Professor Alberto Reatti

Autori:

Nicolò Ventani

Marco Montagni

ANNO ACCADEMICO 2012/2013

Introduzione

Il presente scritto riguarda l'attività di studio da noi svolta in materia di tecniche d'inseguimento del punto di massima potenza dei pannelli fotovoltaici. Ci è sembrato opportuno e produttivo, dal punto di vista didattico, non limitarci a una ricerca bibliografica di ciò che lo stato dell'arte offre per lo sviluppo delle tecniche di "Maximum Power Point Tracking", ci siamo, invece, voluti cimentare nell'applicazione di queste tecniche, anche se delle più semplici. Per fare ciò ci siamo dotati di un modello di pannello fotovoltaico, sul cui poter applicare le tecniche di M.P.P.T.. Grazie a questo approccio abbiamo avuto modo di affrontare numerose problematiche inerenti sia alla modellazione che al controllo dei sistemi fotovoltaici, il che ci ha permesso di capire più a fondo il funzionamento di un impianto fotovoltaico nel suo insieme. Ci sentiamo di poter dire, inoltre, che la piattaforma di test da noi sviluppata potrebbe risultare utile come punto di partenza per uno studio più accurato sui modelli di impianto fotovoltaico e la loro interazione con i fattori esterni e i sistemi di controllo. Nei capitoli a seguire si descrive il modello di pannello fotovoltaico e, in generale l'ambiente di simulazione, all'interno del quale sono stati testati i due algoritmi di ricerca da noi sviluppati.

Contenuti

1. Stato dell'arte:	6
1.1. Maximum Power Point.....	6
1.2. Le tecniche d'inseguimento:.....	8
1.1.1. Metodi Feedforward.....	8
1.1.2. Metodi Feedback.....	9
1.1.3. Valutazione delle prestazioni d'inseguimento.....	12
2. Il modello:	13
2.1. Il modello della cella.	13
2.2. I parametri del pannello.....	16
2.3. Caratteristiche del pannello.	16
1.1.4. Solar Sweep:.....	16
1.1.5. Temperature Sweep.....	18
3. Test effettuati:.....	20
3.1. Dinamica termica.....	21
3.2. Dinamica elettrica.....	23
1.1.6. Dimensionamento del convertitore.	24
1.1.7. Controllo del convertitore.	26
4. Algoritmo “ Perturba e Osserva”	28
4.1. Simulazione Termodinamica	30
4.1.1. Test 1	31
4.1.2. Test 2	33
4.1.3. Test 3	36
4.2. Simulazione Elettrica.....	40
5. Algoritmo “Conduzzanza Incrementale”	43
5.1. Simulazione Termodinamica	44
5.1.1. Test 1	45
5.1.2. Test 2	47

5.1.3.	Test 3	49
5.2.	Simulazione Elettrica.....	53
6.	Conclusioni	54
6.1.	Confronto delle prestazioni	54
6.2.	Sviluppi futuri.....	55

1. Stato dell'arte:

1.1. Maximum Power Point

Una caratteristica particolarmente problematica delle celle fotovoltaiche è rappresentata dalla dipendenza dalle condizioni climatiche dei valori di tensione e corrente che queste ci forniscono. Le celle fotovoltaiche presentano una tensione di circuito aperto inversamente proporzionale alla temperatura alla quale sono esposte, questo a causa dell'influenza della temperatura sulle caratteristiche del silicio. L'intensità della corrente fornita dalla singola cella fotovoltaica è proporzionale alla quantità di luce dalla quale è colpita; nel silicio drogato, infatti, vengono a formarsi coppie elettrone-lacuna a causa dell'assorbimento dell'energia fotonica, di conseguenza si ha un aumento del numero di coppie all'aumentare del numero di fotoni assorbiti (i.e. aumento dell'irraggiamento). Per quanto precedentemente detto è evidente come la potenza elettrica fornita dalla cella sia influenzata dalle medesime variabili sopra descritte.

Le variazioni di luminosità e di temperatura all'interno di un periodo qualsiasi sono difficilmente prevedibili in maniera puntuale, per questo conoscere a priori le condizioni alle quali sarà sottoposta una cella fotovoltaica una volta installata è pressoché impossibile. Per le ragioni suddette si utilizzano vari metodi per riuscire a stabilire quali siano le condizioni elettriche ottimali in cui porre la cella fotovoltaica al variare delle condizioni esterne. La tensione alla quale la cella fornisce potenza può essere regolata attraverso un convertitore DC/DC, connesso in uscita a un sistema di stoccaggio dell'energia necessario per stabilizzare la tensione. La tensione presente ai morsetti del lato cella del convertitore deve essere quella alla quale la cella fornisce la massima potenza nelle condizioni esterne presenti, in altre parole la tensione di Maximum Power Point (punto di massima potenza).

La dipendenza del punto di massima potenza dalle condizioni esterne è fortemente non lineare, per questo è difficile controllare il valore di tensione di uscita del pannello fotovoltaico in catena aperta; ovvero basandosi esclusivamente sull'ora del giorno, la data e sulle previsioni atmosferiche.

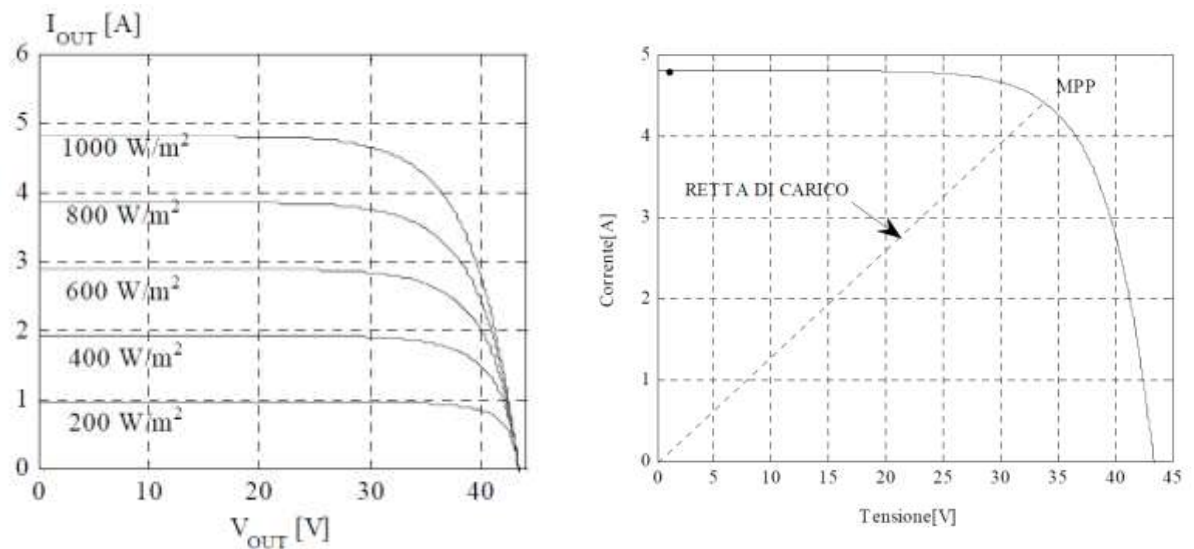


Figura 1 Dipendenza della caratteristica I-V da irraggiamento e temperatura.

Per mantenere il pannello fotovoltaico nella condizione di massima efficienza (MPP) si utilizzano dei controlli in catena chiusa. I controlli in catena chiusa rendono necessaria la presenza di sensori che possono essere di vario tipo, questi si dividono principalmente in due categorie: sensori atmosferici e sensori elettrici. Le indicazioni fornite da termometri e misuratori di irraggiamento sulle condizioni del pannello possono essere utili a determinare la posizione approssimativa del M.P.P., questo tipo di sensori presentano, tuttavia, alti costi e per questo motivo non sono generalmente utilizzati nei sistemi di M.P.P.T.. I sensori elettrici presentano un costo più basso e possono fornire indicazioni più precise sulla posizione del M.P.P., soprattutto se coadiuvati da un algoritmo di regolazione della tensione di uscita del pannello. Attraverso l'utilizzo dei più comuni sensori elettrici quali voltmetri, amperometri e wattmetri si possono sviluppare sistemi di inseguimento del massimo punto di potenza molto efficaci e dal costo ridotto, incrementando così la profittabilità complessiva del sistema fotovoltaico. Il sistema di inseguimento, se correttamente funzionante, aumenta l'energia prodotta dal sistema senza aumentarne significativamente il costo, per merito dei bassi costi materiali necessari ad aggiungere al regolatore DC/DC un controllore e i sensori necessari a chiudere l'anello di controllo. I vari sistemi d'inseguimento, composti da convertitore DC/DC e controllore, si differenziano principalmente per il tipo di algoritmo di controllo utilizzato per stabilire a che tensione portare l'uscita del pannello.

Nel paragrafo seguente vengono descritti alcuni fra i più utilizzati algoritmi di inseguimento.

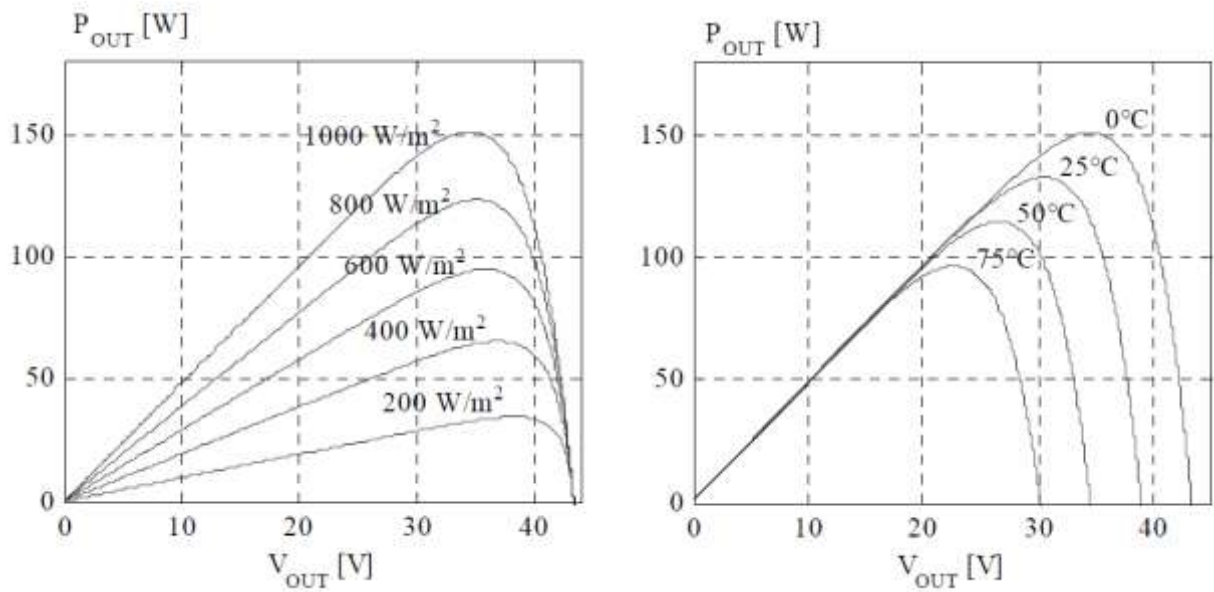


Figura 2 Caratteristica P-V di un pannello fotovoltaico al varare di irraggiamento e temperatura.

1.2. Le tecniche d'inseguimento:

1.1.1. Metodi Feedforward

Con il termine metodi feedforward si indicano tutti quei metodi che non richiedono, durante il funzionamento, la misura della potenza uscente dal pannello fotovoltaico. I metodi feedforward richiedono generalmente un minor sforzo computazionale e un minor costo dei sensori. I metodi di questo tipo comportano, tuttavia, una ridotta efficienza del pannello in quanto questo raggiunge raramente il M.P.P.

Metodo Open Voltage

Il metodo open voltage si basa sulla semplice osservazione che la tensione del M.P.P. è sempre una percentuale fissa della tensione di circuito aperto (Open Voltage). Si può considerare la tensione di M.P.P. come una frazione dal 75 al 77% della tensione di circuito aperto. Negli algoritmi di questo tipo la tensione di circuito aperto viene misurata periodicamente, attraverso un apposito sensore, e in base a questa misura viene stabilito il valore di tensione di riferimento per l'uscita del pannello fotovoltaico. L'estrema semplicità di questa tecnica d'inseguimento diminuisce la capacità di calcolo necessaria per applicarla e, quindi diminuisce considerevolmente il costo delle apparecchiature necessarie per il controllo.

I principali difetti di questo metodo sono rappresentati da: la riduzione dell'energia fornita dal pannello a causa degli intervalli di misurazione della tensione di circuito aperto, durante i quali la corrente uscente dal pannello è nulla. Questo tipo di metodo permette, inoltre di individuare il punto di massima potenza con una precisione pari al 2% del valore di tensione, il che ne riduce ulteriormente l'efficacia.

Metodo Short Current Pulse

Questo metodo in catena aperta sfrutta la proporzionalità fra la corrente di cortocircuito e il valore della corrente del maximum power point al variare dell'irraggiamento. La suddetta proporzionalità è espressa attraverso l'equazione:

$$I_{MPP}(S) = k_I I_{SC}(S)$$

Dove S rappresenta la variabile indipendente irraggiamento e k_I ha valori compresi fra 0,78 e 0,92. Il principale vantaggio di questo metodo è costituito dal fatto che la proporzionalità rimane valida al variare della temperatura da 0 a 60 °C. Per la realizzazione di questa tecnica di inseguimento non è necessaria grande capacità di calcolo da parte del controllore; è richiesta tuttavia la presenza di un apposito sensore in parallelo al pannello che provveda a misurare la corrente di cortocircuito ad intervalli regolari. Il metodo short current pulse presenta un'efficienza limitata non solo dalla precisione d'inseguimento del M.P.P., ma anche dalla presenza degli intervalli di tempo in cui viene effettuata la misura della corrente di corto circuito; durante la misura, infatti, la tensione di uscita del pannello è nulla e conseguentemente lo è anche l'energia uscente.

1.1.2. Metodi Feedback

Metodo Perturba & Osserva

Il metodo di ricerca "Perturba & Osserva" insegue il punto di massima potenza effettuando continue variazioni del valore di tensione di uscita del pannello fotovoltaico. Comparando la variazione di potenza ottenuta con la variazione di tensione effettuata l'algoritmo stabilisce in quale direzione debba essere ricercato il M.P.P.. Il metodo appena descritto è molto efficace nella ricerca del M.P.P. in condizioni meteo costanti o lentamente variabili; in caso di rapide variazioni delle condizioni al contorno, tuttavia, l'algoritmo attribuisce alla variazione del valore di tensione l'occorrere della variazione di potenza data dal cambiamento climatico, per questo motivo l'algoritmo tarda a riconoscere e a reagire ai rapidi cambiamenti delle condizioni esterne.

Al raggiungimento del punto di massima potenza, l'algoritmo continua a far oscillare il valore di tensione intorno a quest'ultimo causando delle perdite di potenza che vanno ad inficiare l'efficienza globale del metodo. Il parametro principale di questo tipo di algoritmo è la larghezza del passo di perturbazione; un passo più ampio rende più rapido l'algoritmo e permette in alcuni casi di evitare massimi locali, aumentando però le perdite in condizioni atmosferiche stazionarie. Diminuire la variazione di tensione per ogni passo di calcolo rende l'algoritmo più lento e aumenta la probabilità di incorrere in massimi locali, tuttavia una volta raggiunto il M.P.P. le perdite dovute alle oscillazioni risultano minori. Di seguito si riporta il diagramma di flusso dell'algoritmo PnO.

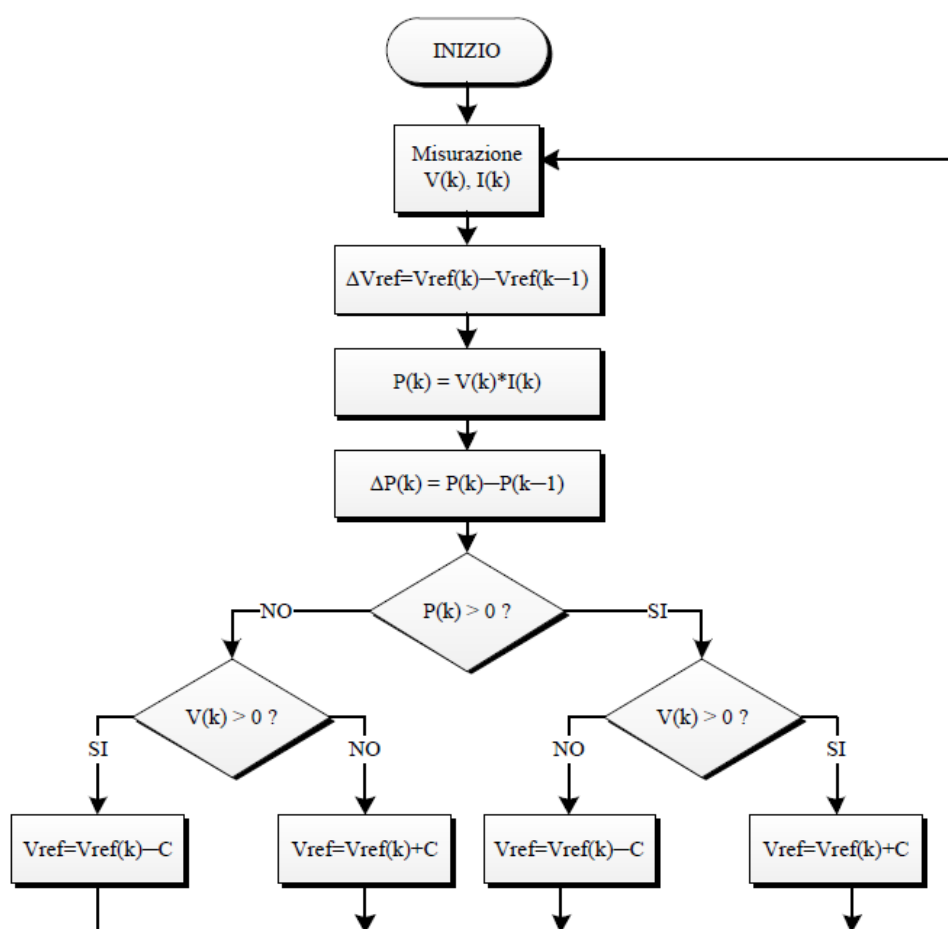


Figura 3 Diagramma di flusso PnO

Metodo della Conduttanza Incrementale

Il metodo di M.P.P.T. detto della conduttanza incrementale ricerca il punto di massima potenza basandosi sull'osservazione del fatto che, la derivata prima della potenza rispetto alla tensione è pari a zero. L'algoritmo della conduttanza incrementale è preferibile rispetto al semplice perturba e osserva poiché riesce a distinguere una variazione di potenza erogata

dovuta a una variazione esterna da una causata dalla regolazione della tensione. Partendo dalla seguente:

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

Ricordando poi che nel punto di massima potenza vale la seguente:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Big|_{MPP}$$

Poiché punto di massimo di una funzione continua e derivabile nell'intervallo considerato. Si può stabilire da che parte del MPP si trova la tensione appena misurata, poiché valgono le seguenti relazioni:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ per } V = V_{MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ per } V < V_{MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ per } V > V_{MPP}$$

Che si ricavano dalla caratteristica P-V del pannello fotovoltaico.

Combinando la prima e la seconda equazione si ottiene la condizione:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

E conseguentemente si ha:

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ per } V < V_{MPP}$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ per } V > V_{MPP}$$

Le condizioni appena elencate permettono di decidere in che direzione operare la variazione di tensione. A causa dei ripple di tensione e corrente e alle approssimazioni di calcolo la condizione:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

Non si verifica mai, per questo si introduce un margine d'errore della forma:

$$\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| < \varepsilon$$

Dove ε è l'ampiezza dell'intervallo all'interno del quale non è previsto il ricalcolo della tensione.

L'algoritmo descritto in questo paragrafo permette di raggiungere un'efficienza anche oltre il 90%; questo grazie all'assenza delle perdite dovute alle perturbazioni a regime tipiche degli algoritmi PnO e alla migliorata reattività alle brusche variazioni ambientali rispetto agli stessi M.P.P.T.A. PnO. I metodi d'inseguimento presentati fin qui sono quelli che hanno riscontrato i migliori risultati sul campo e per questo sono i più utilizzati. Il successo degli algoritmi appena descritti è da attribuirsi alle combinazioni di buona efficienza e semplicità di realizzazione; nonché al basso costo dei sensori coinvolti.

1.1.3. Valutazione delle prestazioni d'inseguimento.

La valutazione delle prestazioni dei sistemi d'inseguimento deve tenere conto di molteplici aspetti che variano in base al tipo di applicazione per la quale vengono realizzati. I parametri di efficienza possono essere misurati attraverso prove in laboratorio, oppure tramite il calcolo su dati da campo; non esistono tuttavia test standard per la misurazione della velocità di convergenza al punto di massima potenza. Si possono eseguire prove con valori d'irraggiamento comunque variabili ottenendo dei risultati che possono essere ritenuti indicativi delle effettive prestazioni in condizioni di utilizzo. Le prestazioni del sistema d'inseguimento, inoltre, devono essere valutate anche in correlazione al tipo di applicazione in cui sono utilizzati e ai parametri principali coinvolti. Alcune applicazioni presentano una forte necessità di affidabilità e performance da parte del sistema e, spesso, un più ampio budget di spesa; nel caso appena descritto gli algoritmi più complicati e costosi si rivelano essere la migliore opzione, anche nel caso di utilizzo di molteplici sensori.

Nel fotovoltaico domestico il parametro più importante è il tempo di rientro dell'investimento. In questo caso algoritmi non molto dispendiosi ed efficienti come PnO e IncCond si presentano come valide opzioni. Nel presente scritto verranno comparate le prestazioni di efficienza di quest'ultimi due tipi di algoritmo paragonando l'energia prodotta in un tempo finito al presentarsi delle stesse condizioni di irraggiamento e temperatura.

2. Il modello:

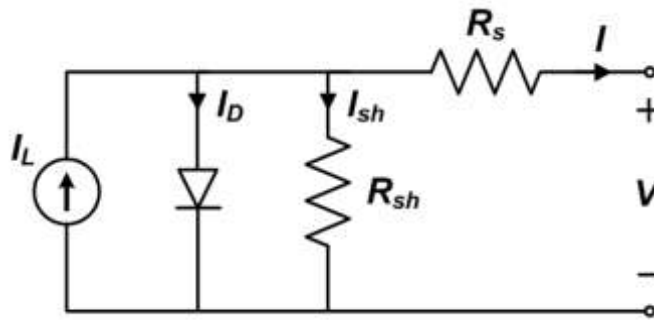


Figura 4 Modello a singolo diodo di una cella fotovoltaica.

Introduzione

Per testare le prestazioni degli algoritmi sviluppati si è ritenuto opportuno dotarsi di un sistema di simulazione che potesse integrare software e hardware, un ambiente di simulazione dove fosse possibile rappresentare il comportamento del pannello e allo stesso tempo eseguire l'algoritmo d'inseguimento. L'ambiente di simulazione scelto per il compito sopra descritto è SIMULINK, cioè la piattaforma di simulazione del software di calcolo MATLAB.

La libreria di simulazione di matlab dispone di un modello di cella fotovoltaica che permette di utilizzare sia il modello a doppio diodo che quello a singolo diodo. Il modello descrive anche la dinamica termica della cella fotovoltaica sia a regime che in transitorio, è possibile, infatti, aggiungere al modello della singola cella l'interazione termodinamica con l'ambiente circostante attraverso un terminale termico apposito.

Nel seguente capitolo si descrive il modello della cella utilizzato, i parametri assegnati allo stesso e se ne presentano le caratteristiche.

2.1. Il modello della cella.

Il modello utilizzato è composto dalla serie di una resistenza con il parallelo di un diodo esponenziale un generatore di corrente e una resistenza. Il modello, nella modalità temperatura costante, ha due terminali corrispondenti al polo positivo e a quello negativo. La corrente uscente dal polo positivo è pari a:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

Dove I_{ph} è la corrente fornita dal generatore, pari a:

$$I_{ph} = I_{ph0} \cdot \frac{I_r}{I_{r0}}$$

Dove I_{ph0} è la corrente generata nella condizione di irraggiamento I_{r0} ed è un parametro del modello che può essere determinato attraverso la tensione di circuito aperto e la corrente di corto circuito della cella.

I_s ed n sono rispettivamente la corrente di saturazione e il coefficiente di qualità del diodo.

V_t è la tensione termica ed è pari a:

$$V_t = \frac{k \cdot T}{q}$$

In quest'ultima equazione k rappresenta la costante di Boltzmann, T la temperatura del pannello e q la carica fondamentale dell'elettrone. R_s ed R_p sono rispettivamente i valori dei resistori in serie ed in parallelo nel modello, mentre V è la tensione fra il polo positivo e quello negativo del modello. Come detto il modello rappresenta anche la dipendenza delle variabili elettriche della cella dalla temperatura della stessa. La corrente fornita dal generatore di corrente contenuto nel modello segue, infatti, la seguente legge:

$$I_{ph}(T) = I_{ph} \cdot (1 + K_{TII}(T - T_{Meas}))$$

Dove K_{TII} è il coefficiente di dipendenza lineare da indicare, mentre T_{meas} è la temperatura a cui si fornisce i dati per la caratterizzazione della cella. La corrente del generatore non è la sola variabile a dipendere dalla temperatura, la corrente di saturazione del diodo infatti segue la seguente:

$$I_s(T) = I_s \cdot \left(\frac{T}{T_{meas}} \right)^{\frac{TXIS}{n}} \cdot e^{-\frac{EG \cdot \left(\frac{T}{T_{meas}} - 1 \right)}{n \cdot V_t}}$$

Dove $TXIS$ è il coefficiente di temperatura pari a 3 nelle impostazioni di default del modello, comunque modificabile dall'utente, mentre EG è l'energy gap per il silicio pari a 1.11 eV. Entrambe le resistenze contenute nel modello hanno un valore dipendente dalla temperatura secondo la legge:

$$R(T) = R \cdot \left(\frac{T}{T_{meas}} \right)^{K_{RT}}$$

Dove K_{RT} è un parametro del modello pari a 1 nella configurazione default.

Parametrizzazione della cella:

Nelle simulazioni descritte il modello della cella è stato semplificato imponendo un valore pari ad infinito alla resistenza in parallelo. Per la scelta dei parametri del modello è stata utilizzata l'opzione di compilazione automatica del modello a partire dai seguenti parametri: Tensione di circuito aperto, corrente di corto circuito, irraggiamento di misurazione, coefficiente di qualità (n) e resistenza serie. La scelta appena descritta è stata fatta per non dover affrontare la ricerca dei parametri più adatti a rappresentare la dinamica di una qualsiasi cella fotovoltaica, poiché questo esula dall'intento del presente scritto, che si prefigge, invece, di confrontare dei metodi di inseguimento del M.P.P.. I valori scelti per la parametrizzazione della cella sono riportati nella seguente tabella.

Parametro	Valore [unità di misura]
Tensione di circuito aperto	0,9 [V]
Corrente di corto circuito	7,34 [A]
Irraggiamento di misura	1000[W/m ²]
Coefficiente di qualità	1,5 [1]
Resistenza serie	8 [mΩ]

Le ragioni per le quali sono stati scelti i suddetti valori sono le seguenti: il modello della cella è valido soltanto per valori di tensione di circuito aperto inferiori all'unità, inoltre il numero di celle che si inserisce in un pannello aumenta la complessità della simulazione allungandone i tempi di calcolo; per le ragioni qui elencate si è deciso di porre 10 celle con una tensione di circuito aperto pari a 0,9 V nel pannello test, questo per ottenere una tensione d'uscita consistente evitando di porre un elevato numero di celle in serie. La corrente di corto circuito è quella proposta di default dal modello, non è stata modificata in quanto risulta essere simile ai valori che si riscontrano più comunemente nei pannelli fotovoltaici. Il valore di 1000 W/m² è quello considerato massimo ottenibile sulla superficie terrestre in condizioni ottimali ed è generalmente utilizzato per caratterizzare i pannelli fotovoltaici. Il coefficiente di qualità influisce sulla forma della caratteristica I-V del pannello ed è stato scelto pari a 1,5 poiché questo valore rappresenta un valore comunemente usato nei modelli di cella fotovoltaica a singolo diodo per silicio monocristallino o policristallino. La resistenza di 8mΩ è stata estrapolata dai dati di targa

del pannello SOLAREX MSX60 il quale tuttavia risulta troppo complesso per essere simulato poiché consta di 36 celle connesse in serie.

2.2. I parametri del pannello.

Il pannello fotovoltaico ideato per i test sugli algoritmi è composto da 10 celle in serie; ogni singola cella ha una tensione di circuito aperto di 0,9 V ed una corrente di corto circuito pari a 7,34 A, misurati entrambi a 1000 W/m² d'irraggiamento e ad una temperatura di 25°C; la resistenza interna di ogni singola cella è, inoltre, pari a 8 mΩ per una resistenza totale di 80mΩ. La potenza massima fornita dal pannello è di circa 50 W con 1000 W/m² di irraggiamento e 25°C di temperatura del pannello; in queste condizioni la corrente è pari a circa 6,8 A e la tensione a 8,1 V.

Parametro	Valore [Unità di misura]
Potenza massima	55 [W]
Tensione di circuito aperto	9 [V]
Corrente di corto circuito	7,34 [A]
Tensione di MPP	8,1 [V]
Corrente di MPP	6,8 [A]
Numero di celle in serie	10
Coefficiente di qualità	1,5
Irraggiamento per le misurazioni	1000 [W/m ²]
Temperatura per le misurazioni	25°C

2.3. Caratteristiche del pannello.

Nel seguente paragrafo s'illustrano le caratteristiche corrente-tensione e potenza-tensione del pannello fotovoltaico utilizzato per i test degli algoritmi di M.P.P.T.. Per ottenere più informazioni possibili sul comportamento del pannello fotovoltaico al variare delle condizioni esterne sono state effettuate più simulazioni con condizioni ambientali diverse. Sia per la caratteristica P-V che per quella I-V sono infatti disponibili più serie di dati, ottenute variando i valori di irraggiamento e, separatamente, quelli di temperatura.

1.1.4. Solar Sweep:

Per “solar sweep” si intende la successione di più simulazioni con valori d'irraggiamento crescenti, di seguito vengono presentati i risultati ottenuti da tali simulazioni illustrando le

variazioni che comportano sulle caratteristiche I-V e P-V. Per le seguenti simulazioni è stato impostato un valor di temperatura del pannello di 25

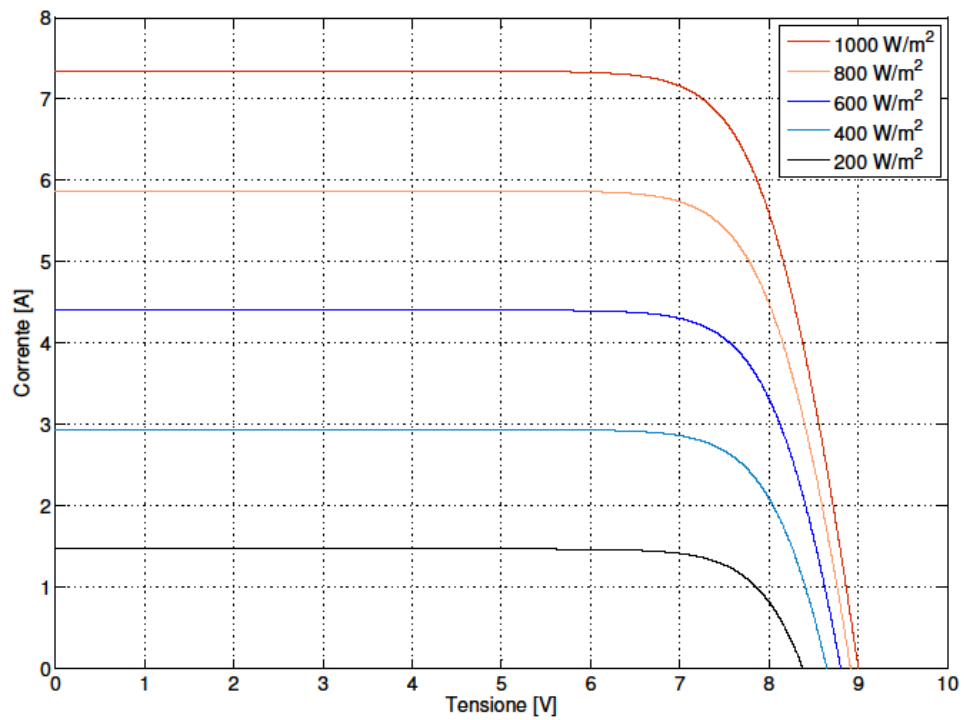


Figura 5 Caratteristica I-V

Si può facilmente notare come l'incremento del valore dell'intensità della radiazione solare che colpisce il pannello provochi un aumento, direttamente proporzionale, della corrente erogata dallo stesso ad ogni valore di tensione.

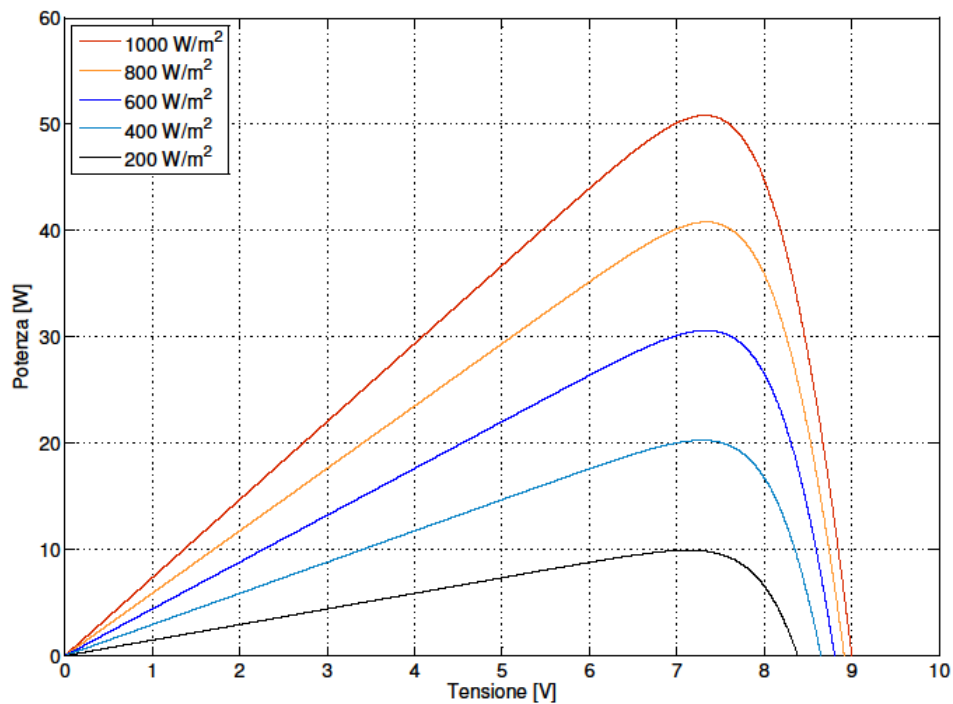


Figura 6 Caratteristica P-V

Per effetto dell'innalzamento del valore massimo di corrente, anche la potenza massima aumenta al crescere del valore d'intensità della radiazione luminosa. Come si può facilmente notare dai grafici la variazione d'irraggiamento non ha effetti particolarmente marcati sulla posizione del M.P.P

1.1.5. Temperature Sweep

Per "temperature sweep" si intende la ripetizione delle simulazioni variando la temperatura del pannello e mantenendo costante il valore dell'irraggiamento a $1000 W/m^2$. I risultati ottenuti sono i seguenti:

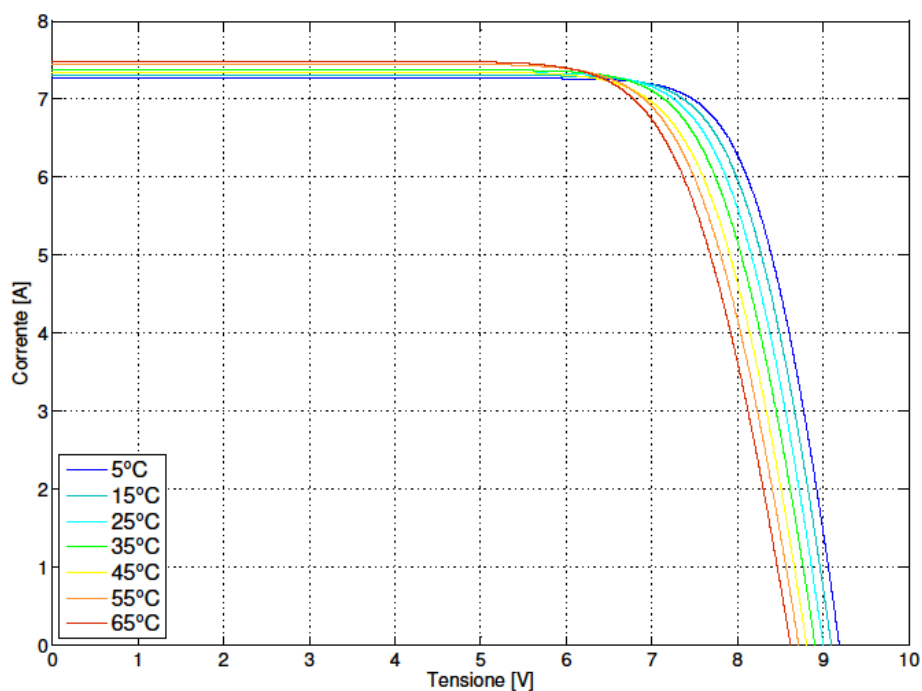


Figura 7 Caratteristica I-V

Risulta evidente, dai grafici riportati qui sopra, come la temperatura del pannello alteri il comportamento dello stesso in termini di tensione e corrente d'uscita. Al crescere della temperatura la tensione massima fornita dal pannello diminuisce. La corrente erogata, invece, diminuisce leggermente al diminuire della temperatura.

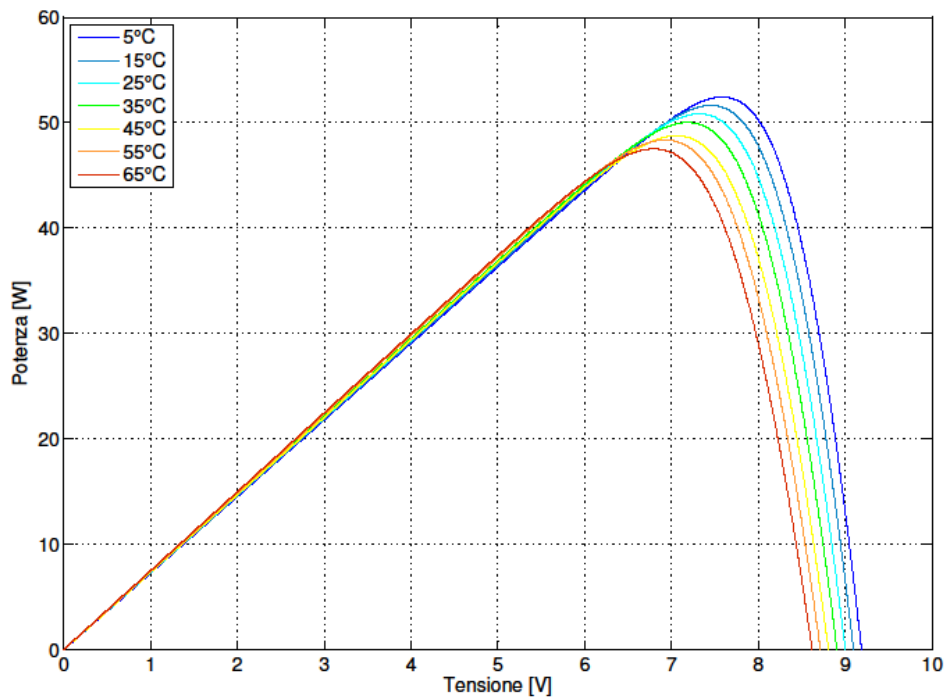


Figura 8 Caratteristica P-V

La caratteristica P-V del pannello subisce due tipi di variazione al crescere della temperatura; dal grafico si può notare come il punto di massima potenza si sposti verso valori di tensione più bassi. La massima potenza erogabile diminuisce di circa il 10% da 5°C a 65°C.

3. Test effettuati:

Introduzione

Per dimostrare i vantaggi di un tipo di algoritmo rispetto all'altro sono stati effettuati due tipi di test; il primo test si prefigge come obiettivo d'illustrare la bontà e la rapidità delle risposte dell'algoritmo ai cambiamenti delle condizioni ambientali. Per questo motivo nel modello del pannello fotovoltaico vengono inserite anche le interazioni termiche con l'atmosfera e con la sorgente solare, permettendo così l'analisi delle prestazioni del sistema al variare della temperatura del pannello fotovoltaico. Nel secondo tipo di test la temperatura del pannello è fissata ad un valore costante e ci si concentra, invece, sull'interazione dell'algoritmo di M.P.P.T con il convertitore DC/DC connesso con il pannello. I due test devono essere effettuati separatamente a causa della grande differenza fra le costanti di

tempo della dinamica termica del pannello e la dinamica elettrica del convertitore DC/DC. Per chiarire questo concetto consideriamo che la simulazione del convertitore DC/DC, che ha una frequenza di commutazione di 10 kHz, deve essere effettuata con un passo d'integrazione massimo di 1 μ S; questo per poter variare il duty cycle del convertitore di non meno di un centesimo di periodo. Per poter apprezzare un cambiamento di temperatura del pannello fotovoltaico di 5°C dovremmo effettuare una simulazione di alcune decine di minuti, con il passo d'integrazione massimo di 1 μ S questo richiederebbe alcune ore di simulazione. Se volessimo simulare il comportamento del pannello per 12 ore impiegheremmo alcuni giorni. Per i motivi appena descritti, e perché ci sembra più rilevante la risposta alla dinamica termica del pannello da parte dell'algoritmo, nelle simulazioni che contengono il modello termico del pannello è stato sostituito al convertitore DC/DC un generatore di tensione controllato; questa piccola modifica ci permette di apprezzare il comportamento del sistema di M.P.P.T. in maniera molto più agevole. Le simulazioni più brevi effettuate con il convertitore DC/DC ci permettono comunque di valutare i tempi di risposta del sistema alle variazioni più rapide delle condizioni ambientali.

3.1. Dinamica termica.

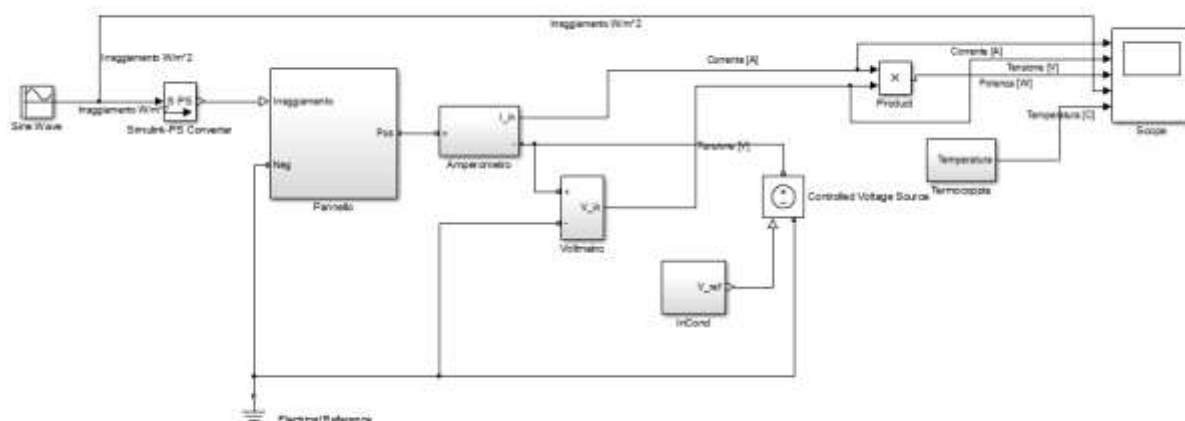


Figura 9 Schema di simulazione termica

Per testare gli algoritmi di MPPT, qui presi in esame, sono state effettuate delle simulazioni incentrate sulla dinamica termica del pannello fotovoltaico, grazie alle quali si è potuto apprezzare il comportamento dell'algoritmo al variare della temperatura delle celle. Le celle del pannello sono dotate di una massa termica di 100 J/K ciascuna ed hanno una temperatura iniziale di 25°C, pari a quella atmosferica. Le celle sono modellate in modo da avere tutte la stessa temperatura, ovvero, fra di esse non sono presenti resistenze termiche.

L'atmosfera, che è l'unica entità fisica con cui il pannello scambia calore, è modellata come una sorgente di calore a temperatura costante; le celle e quest'ultima scambiano calore per irraggiamento e per convezione. Alle celle fotovoltaiche viene fornita una quantità di calore pari al valore dell'intensità di radiazione solare in ogni istante. Di seguito si riportano i parametri termici della simulazione.

Parametro termico	Valore
Superficie di scambio fra pannello e atmosfera:	1 m^2
Coefficiente di scambio termico convettivo	$50 \text{ W/m}^2\text{K}$
Coefficiente di scambio termico radiativo	$4 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
Temperatura atmosferica	25°C
Temperatura iniziale del pannello	25°C
Capacità termica totale del pannello	5000 J/K
NOCT	$41,5^\circ\text{C}$

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalla prova in condizioni operative standard, dalla quale si è ottenuto il valore della “Normal Operating Condition Temperature”.

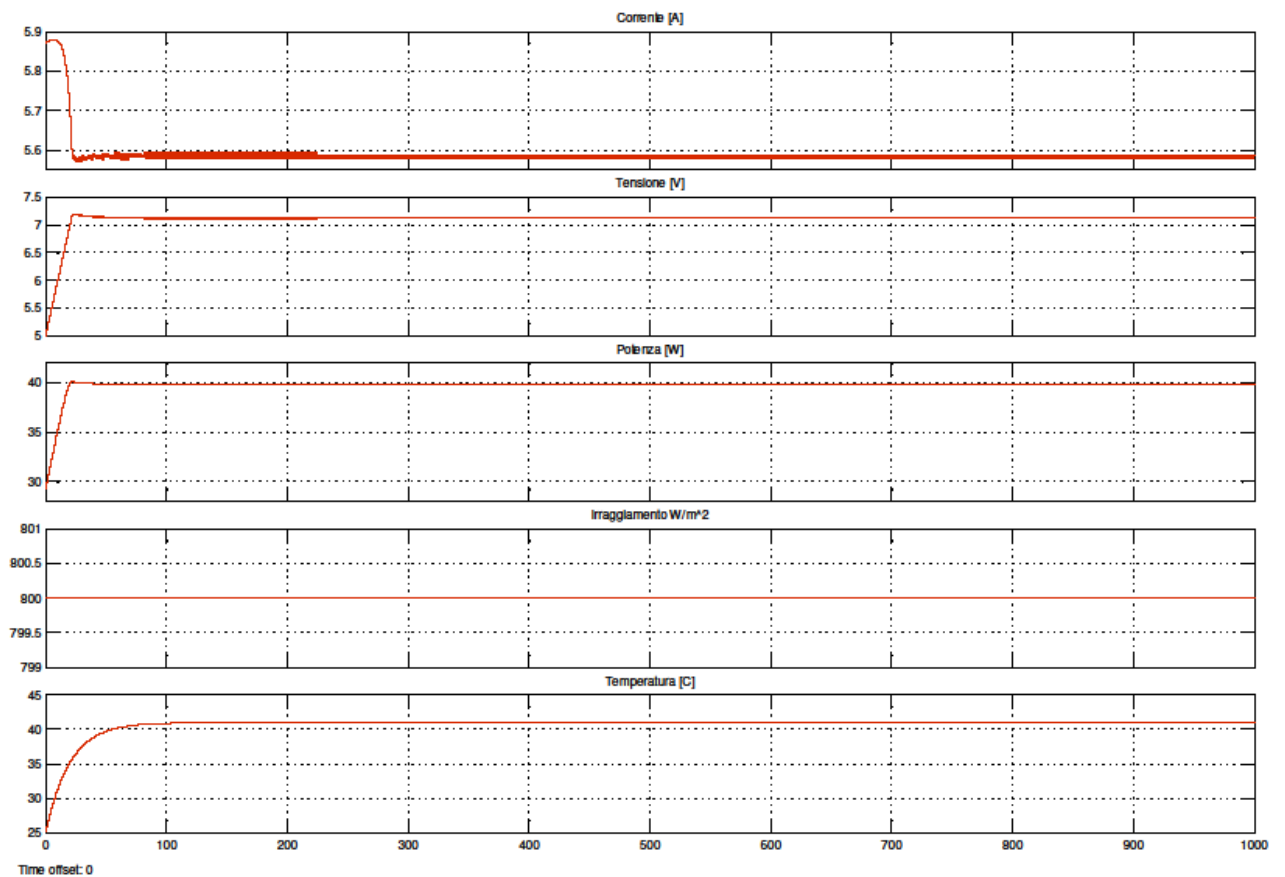


Figura 10 Risultati Noct

3.2. Dinamica elettrica.

Gli algoritmi presi in esame sono stati testati nella loro interazione con il convertitore DC/DC generalmente utilizzato per elevare la tensione dal valore in uscita dal pannello, al BUS DC. Tale convertitore, che molto spesso ha la topologia circuitale denominata “BOOST”, ha il compito di regolare la tensione in ingresso al pannello fotovoltaico seguendo le indicazioni dell’algoritmo di M.P.P.T. Per testare la corretta e performante interazione degli algoritmi con il convertitore e il suo controllore, sono state effettuate alcune simulazioni, di durata molto più breve rispetto ai test termici, inserendo il modello di un convertitore di tipo “BOOST” in serie al pannello, opportunamente dimensionato. Per il controllo del convertitore è stato inoltre sviluppato un apposito controllore logico che permettesse di regolare il duty cycle del convertitore inseguendo la tensione suggerita dall’inseguitore del M.P.P. Nel seguente paragrafo si descrive il sistema simulato in questo tipo di test.

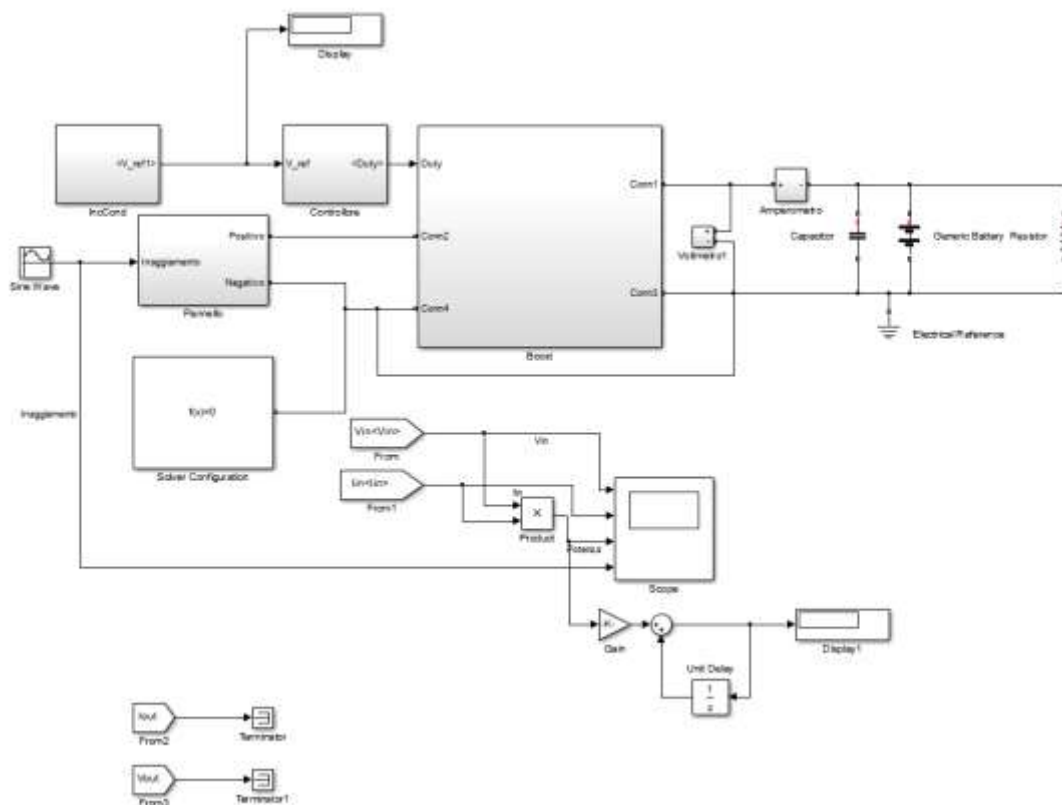


Figura 11 Schema di simulazione elettrica

In primo luogo si deve specificare che per le simulazioni, che vengono ivi descritte, la temperatura del pannello è stata fissata al valore di 40°C, il modello del pannello è stato, inoltre, semplificato eliminandone l'interazione con l'atmosfera.

3.2.1. Dimensionamento del convertitore.

Il convertitore DC/DC utilizzato è stato dimensionato considerando le seguenti specifiche:

Parametro	Valore
Frequenza di switching	10 kHz
Tensione d'ingresso	(1÷9) V
Tensione d'uscita (stabilizzata)	30 V
Corrente d'ingresso	1÷8 A
Potenza massima	60 W

Rispettando le specifiche sopra elencate sono stati dimensionati i componenti del convertitore "BOOST", ovvero, l'induttanza, il condensatore in uscita e quello in ingresso considerando la modalità di conduzione continua (C.C.M.).

Il condensatore in uscita è stato inserito per limitare il ripple sulla tensione d'uscita e non per stabilizzare la tensione poiché questo è collegato in parallelo ad una batteria e una resistenza di carico. Il ripple massimo sulla corrente dell'induttore richiesto è 200 mA, ovvero, il 20% della corrente minima, quindi per il principio di bilanciamento dei volt-secondi:

$$\Delta I = \frac{V_{in}}{L} \cdot D \cdot T = 200 \text{ mA}$$

Dove V_{in} è la tensione in ingresso al convertitore, ovvero, quella fornita dal pannello; D è il duty cycle dell'interruttore e T è il periodo di commutazione pari a $100\mu\text{s}$. Dall'equazione precedente si ricava:

$$L = \frac{V_{in}}{\Delta I \cdot f_s} D = 3,15 \text{ mH}$$

Il valore scelto per il componente è 3,4 mH, il valore del componente è stato aumentato leggermente per diminuire il ripple sulla corrente e evitare il funzionamento D.C.M. Il ripple imposto sulla tensione d'uscita è pari a 200 mV, considerando che la massima corrente massima erogata dal convertitore è pari a 2A, si ottiene:

$$\Delta Q = D \cdot T \cdot I$$

Inoltre:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

Infine aggiungendo la funzione di trasferimento del convertitore "BOOST":

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \equiv D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}}$$

Si ottiene infine:

$$C = \frac{I \cdot D}{\Delta V \cdot f_s} = 967 \mu\text{F}$$

Considerando la tensione $V_{in} = 1 \text{ V}$. Il condensatore di filtro in ingresso, infine, è stato dimensionato per via empirica cercando un compromesso fra basso ripple della tensione in ingresso, quindi valore elevato della capacità e transitorio di breve durata, ovvero valore

ridotto della capacità. Il fenomeno di risonanza, della serie induttore-condensatore di filtro, ha limitato ulteriormente il prodotto fra i valori di questi due componenti.

3.2.2. Controllo del convertitore.

Il convertitore descritto nel paragrafo precedente è stato reso in grado d'inseguire il valore di tensione suggerito dall'algoritmo di M.P.P.T. attraverso un sistema di controllo in retroazione sulla tensione d'ingresso, che modifica opportunamente il duty-cycle del convertitore.

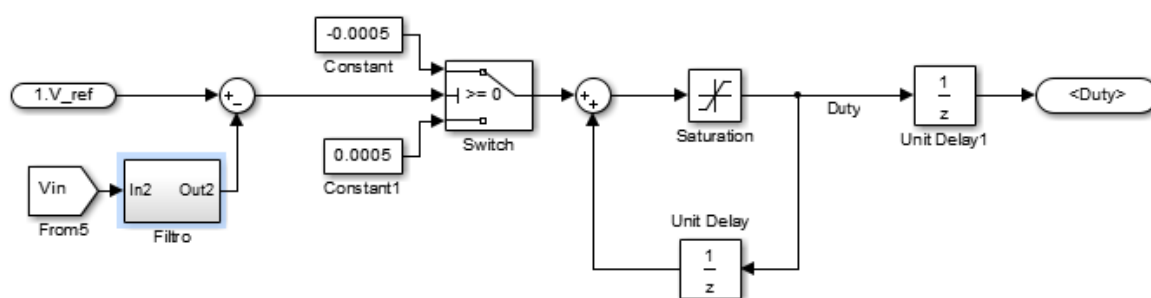


Figura 12 Controllore del convertitore

La logica rappresentata nella figura precedente può essere descritta in maniera molto semplice: il sistema di controllo ricalcola il duty cycle con un periodo pari a 0,5 μ S, mentre gli algoritmi di M.P.P.T. vengono aggiornati con un periodo pari ad 1 μ S. Il controllore lascia invariato, aumenta o diminuisce il duty cycle di un valore fisso pari a 0,0005 in base alla differenza fra la tensione d'ingresso e la tensione di riferimento calcolata dall'algoritmo di M.P.P.T. Il valore scelto non è casuale ma bensì la metà della variazione minima che il duty cycle deve compiere perché il convertitore vari la tensione. Esprimendo in formule la logica si ha:

$$\Delta D = \begin{cases} +0,0005 & \text{if } V_{in} > V_{ref} \\ 0 & \text{if } V_{in} = V_{ref} \\ -0,0005 & \text{if } V_{in} < V_{ref} \end{cases}$$

Filtraggio dei segnali.

A causa delle oscillazioni dei valori di tensione e corrente all'interno del convertitore sono stati inseriti, in uscita ai sensori, dei filtri a media mobile opportunamente accordati con i sistemi ed i tempi di calcolo sia dell'algoritmo di M.P.P.T. che del controllore del convertitore DC/DC. Detti filtri sono così rappresentati:

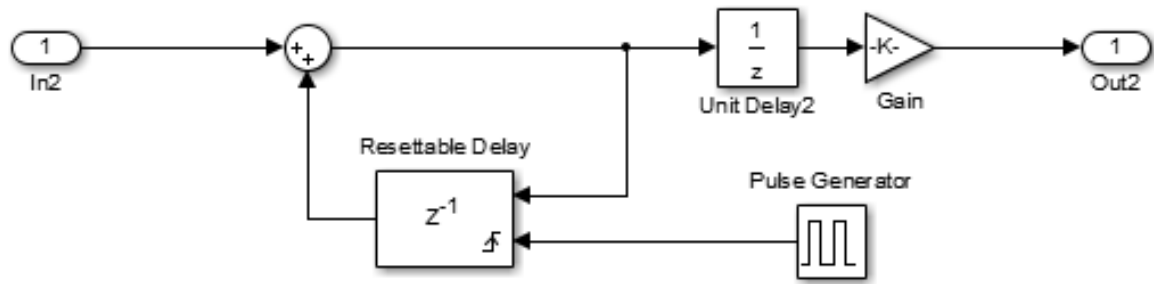


Figura 13 Filtro

L'equazione che regola l'uscita del filtro è la seguente:

$$S_{out}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{in}(i)$$

Dove n è il numero di passi d'integrazione contenuti fra l'istante di tempo t e l'istante di tempo $t-T$ e T è il periodo di ricalcolo del sistema che riceve il segnale S_{out} . Per dimostrare il corretto funzionamento del filtro si riporta un test effettuato filtrando un rumore bianco a banda limitata da una sinusoide con frequenza 1 Hz.

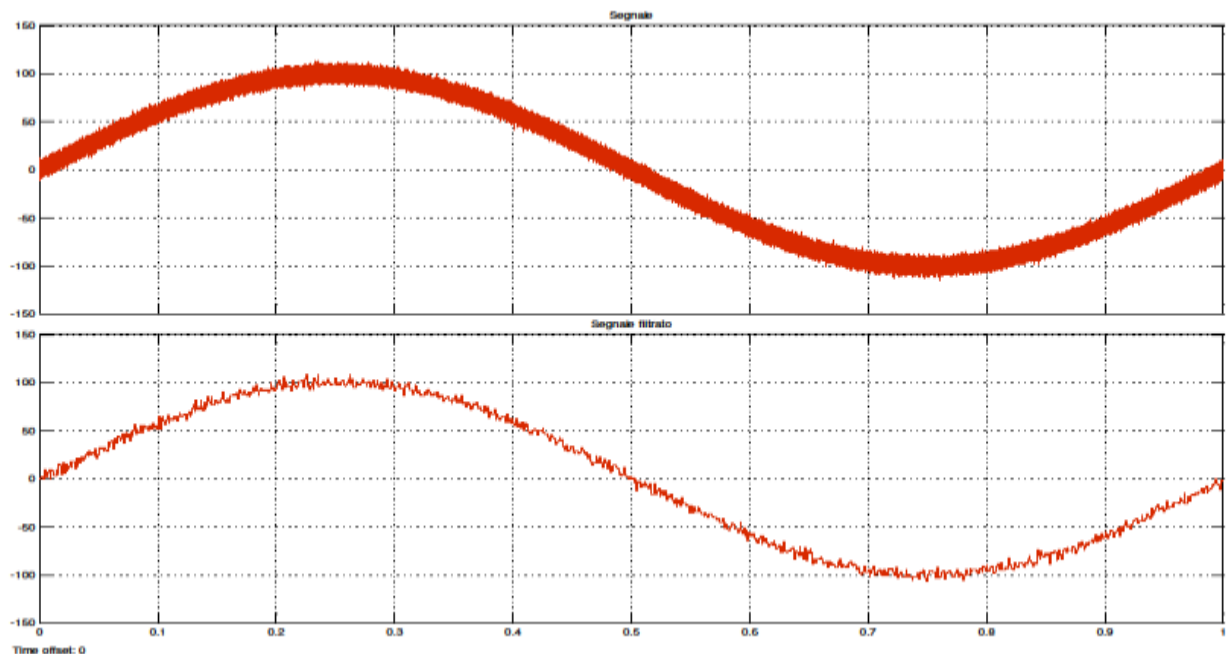


Figura 14 Risultati filtraggio

4. Algoritmo “Perturba e Osserva”

Introduzione

Il primo algoritmo che ci siamo occupati di sviluppare e testare è di tipo “Perturba e Osserva”; questo tipo di algoritmo è stato già descritto nel primo capitolo di questo scritto, in questo paragrafo, quindi ci si appresta a descrivere in che modo è stato declinato e sviluppato all’interno dell’ambiente *Simulink*. I paragrafi successivi di questo capitolo contengono i risultati ottenuti dalla simulazione di detto algoritmo d’inseguimento, sia nei test termodinamici che in quelli elettrici.

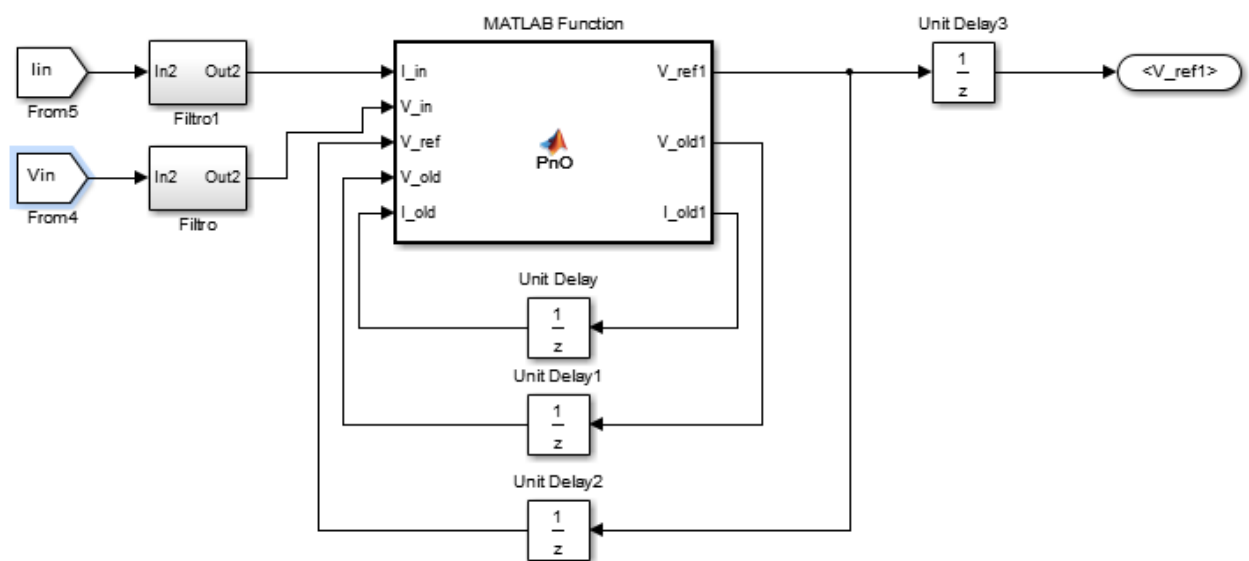


Figura 15 Perturba e osserva

In primis ci sembra opportuno descrivere il tipo di piattaforma sulla quale è stato sviluppato l’algoritmo di M.P.P.T. All’interno della libreria *Simulink* si trova un blocco preposto al calcolo di una funzione descritta dall’utente denominato “*MATLAB Function*”. Il blocco MATLAB function può essere inserito in qualsiasi simulazione e permette d’inserire il calcolo di un algoritmo contemporaneamente all’esecuzione della simulazione. Nelle simulazioni, che vengono descritte nei capitoli successivi, i sensori misurano le variabili fisiche del sistema che stiamo simulando e le inviano al blocco di calcolo dell’algoritmo; questo calcola le uscite, aggiornandole in base alla frequenza impostata, e invia i risultati al controllore del convertitore DC/DC o, nel caso dei test termodinamici, direttamente al generatore di tensione. Grazie a questo blocco di calcolo ingresso-uscita è stato possibile inserire nella simulazione del sistema fisico la seguente routine di calcolo:

```

%Algoritmo di ricerca del punto di massima potenza: c è la larghezza del
%passo di perturbazione.
c=0.05;
DV=V_in-V_old;
P_old=V_old*I_old;
P=V_in*I_in;
dif=abs(V_in-V_ref);% L'algoritmo ha calcolato le differenze di tensione e
di potenza.
if dif<=0.1
    if P>=P_old
        if DV>=0
            V_ref1=V_ref+c;
        else
            V_ref1=V_ref-c;
        end
    else
        if DV>=0
            V_ref1=V_ref-c;
        else
            V_ref1=V_ref+c;
        end
    end
else
    V_ref1=V_ref;
end %L'algoritmo ha aggiornato il valore di tensione
V_old1=V_in;
I_old1=I_in; %L'algoritmo aggiorna le memorie.
end

```

Inizialmente l'algoritmo calcola le differenze di tensione e potenza fra i due passi consecutivi, oltre a calcolare la differenza fra tensione di riferimento del passo di calcolo precedente e la tensione presente all'ingresso del pannello. L'algoritmo è scritto in modo da non aggiornare la tensione di riferimento del controllore del convertitore DC/DC prima che questo sia riuscito a raggiungere la tensione di riferimento del passo di calcolo precedente; in questo modo si evita che l'algoritmo di ricerca faccia oscillare la tensione di riferimento intorno al M.P.P. La logica di ricerca che calcola la tensione di riferimento è così strutturata: se la potenza del passo n-esimo è maggiore di quella del passo n-1-esimo si modifica la tensione seguendo la stessa direzione dell'ultima modifica; se invece la potenza al passo n-esimo è diminuita si inverte la direzione dell'ultima perturbazione. Infine l'algoritmo aggiorna le memorie dei valori di tensione, corrente e ritorna al controllore la tensione di riferimento. La parte più complessa dello sviluppo di questo tipo di algoritmo è il tuning dei parametri quali: la larghezza della perturbazione, la frequenza di ricalcolo e soprattutto il rapporto di quest'ultima con la frequenza di calcolo del controllore del convertitore.

4.1. Simulazione Termodinamica

Il seguente paragrafo tratta i test effettuati sull' algoritmo "Perturba e Osserva" attraverso il modello termodinamico del pannello fotovoltaico. In questo tipo di test la variabile principale è la potenza irradiante che colpisce il pannello fotovoltaico. Al fine di valutare accuratamente il comportamento del sistema di M.P.P.T. sono state compiute tre simulazioni, la prima con un profilo irradiante costante del valore di 1000 W/m^2 , che ha lo scopo di fare da termine di paragone per le altre due. La seconda con un segnale d'irraggiamento sinusoidale e la terza con più frequenti variazioni. Nelle simulazioni con il modello termodinamico l' algoritmo è stato opportunamente modificato per il funzionamento con il generatore di tensione. Un' importante modifica apportata al sistema d' inseguimento è il tempo di ricalcolo dell' algoritmo di ricerca che in questo tipo di simulazioni si aggiorna ogni 100 mS anziché ogni millisecondo.

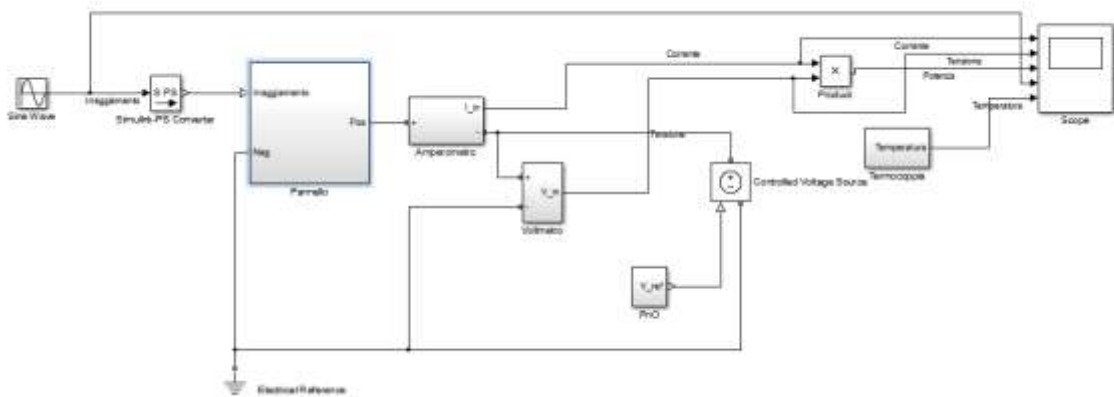


Figura 16 Simulazione termica PnO

4.1.1. Test 1

In questo primo test si prova la massima capacità produttiva del pannello, perciò lo si sottopone ad una potenza radiante a valore costante pari a 1 sole, ovvero, 1000W/m^2 . I risultati ottenuti fungono da termine di paragone per le prove successive. Come in tutte le simulazioni di questo tipo la temperatura atmosferica è costante e pari a 25°C ; la durata di questa prova è di 3600 S ovvero 1 ora. I profili d'irraggiamento e temperatura sono i seguenti:

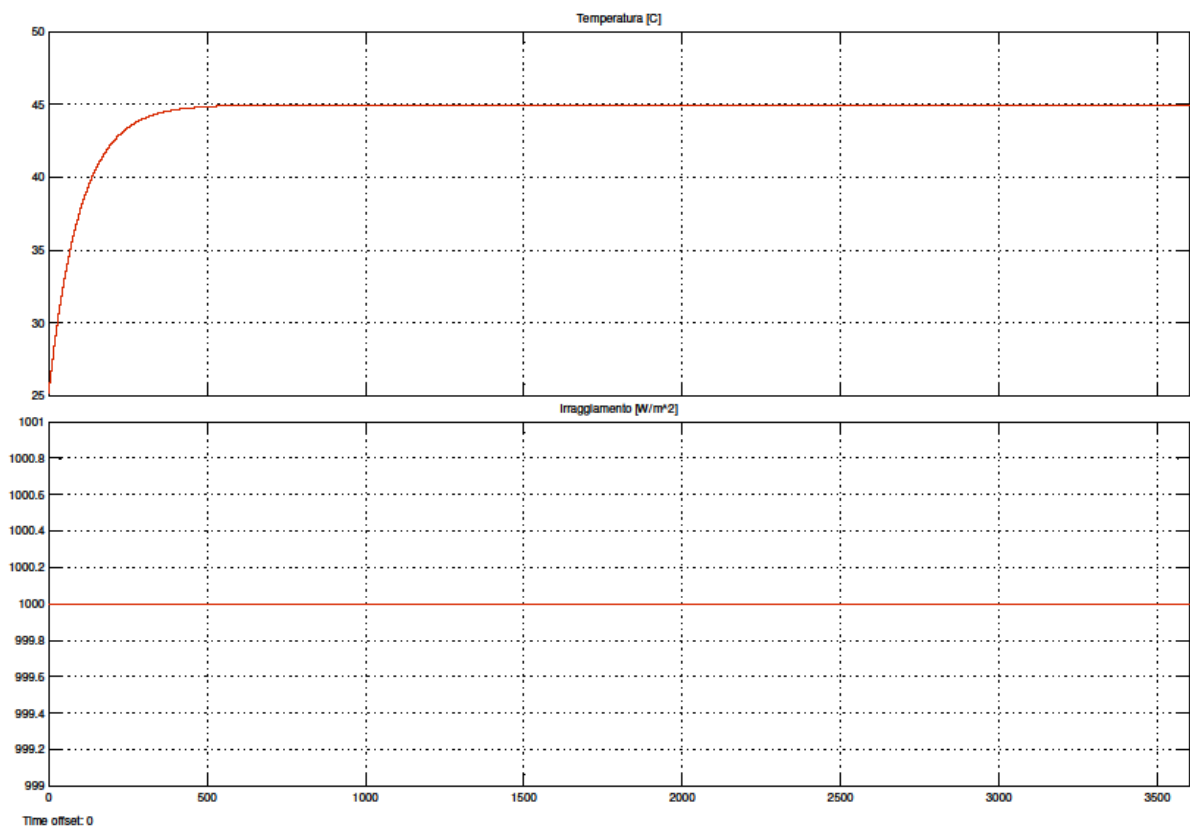


Figura 17 Regime termico

Se escludiamo il transitorio termico iniziale della temperatura del pannello, i due profili sono costanti. I valori di tensione, corrente e potenza erogati dal pannello nelle condizioni descritte sopra sono le seguenti:

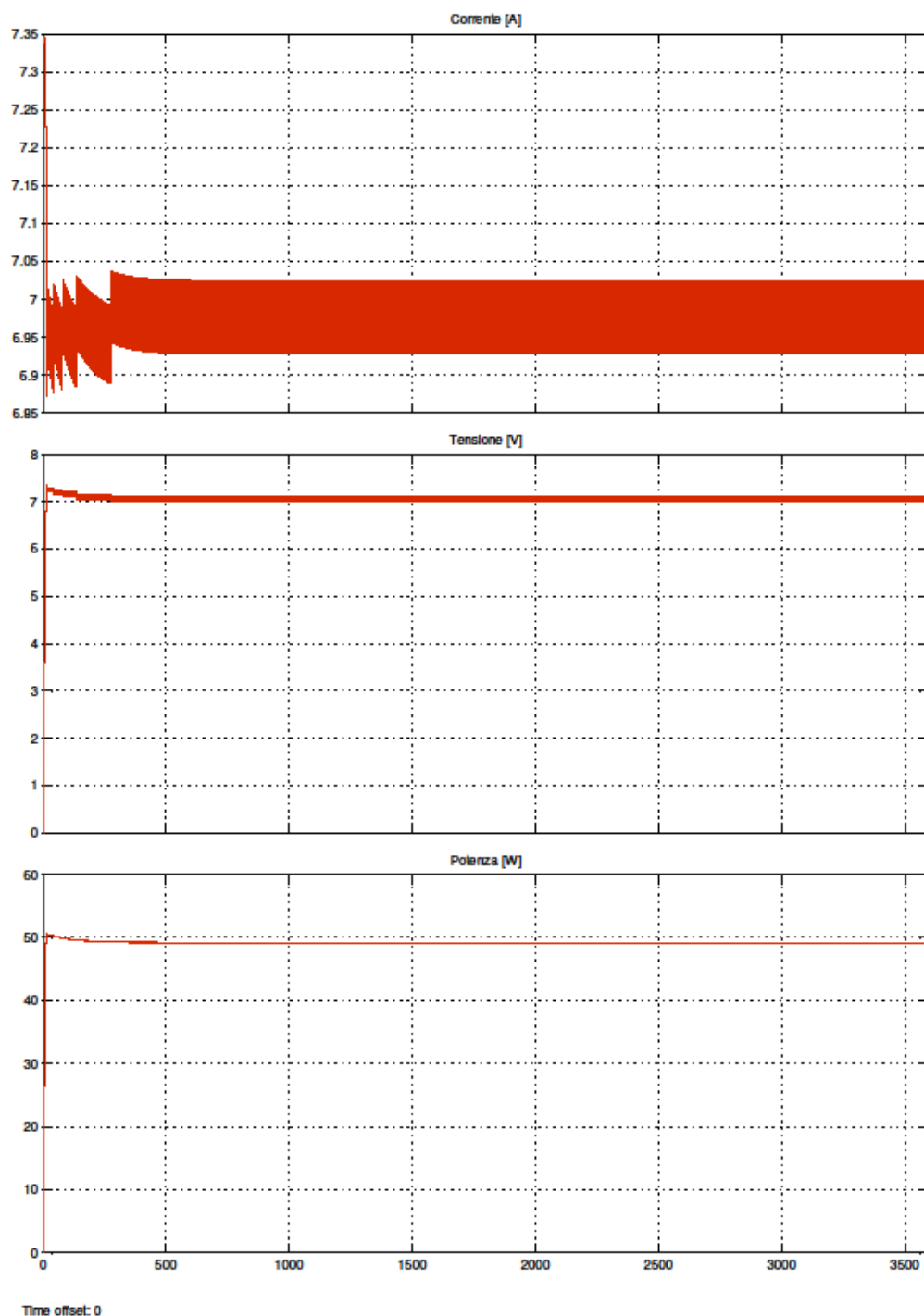


Figura 18 Risultati test 1

Non sorprendentemente i profili delle variabili elettriche sono costanti così come le condizioni esterne. Il dato rilevante ottenuto grazie a questa simulazione è l'energia prodotta

dal pannello fotovoltaico, posto nelle condizioni di massimo irraggiamento; l'energia prodotta è pari a **49,1 Wh**. Quest'ultimo dato è completamente compatibile con le caratteristiche del pannello e con le condizioni in cui è stato posto, il che conferma il corretto funzionamento del sistema d'inseguimento.

4.1.2. Test 2

Il primo test prevede l'applicazione di un segnale d'irraggiamento che simuli una giornata con 12 ore di luce, in cui la potenza irradiante del sole arrivi nel suo punto di massimo al valore di 1000 W/m^2 . Questo tipo di simulazione ha lo scopo di analizzare il comportamento del sistema di M.P.P.T. in condizioni ottimali d'irraggiamento. Dal test qui illustrato si può apprezzare la dinamica termica del pannello e il modo in cui la variazione di temperatura influenza le prestazioni elettriche dello stesso. Il profilo d'irraggiamento utilizzato in questo primo test equivale ad una sinusoide di ampiezza 1000 W/m^2 , a valor medio nullo e frequenza pari a $\pi/43200[\text{rad/s}]$. La frequenza della sinusoide che del segnale d'irraggiamento è stata scelta in modo che compiesse un semiperiodo in 12 ore, che equivalgono a $43200[\text{s}]$. Si ricorda che la temperatura atmosferica è di 25°C per tutta la durata delle simulazioni. I risultati del test sono i seguenti, a fronte di questo profilo d'irraggiamento e di temperatura:

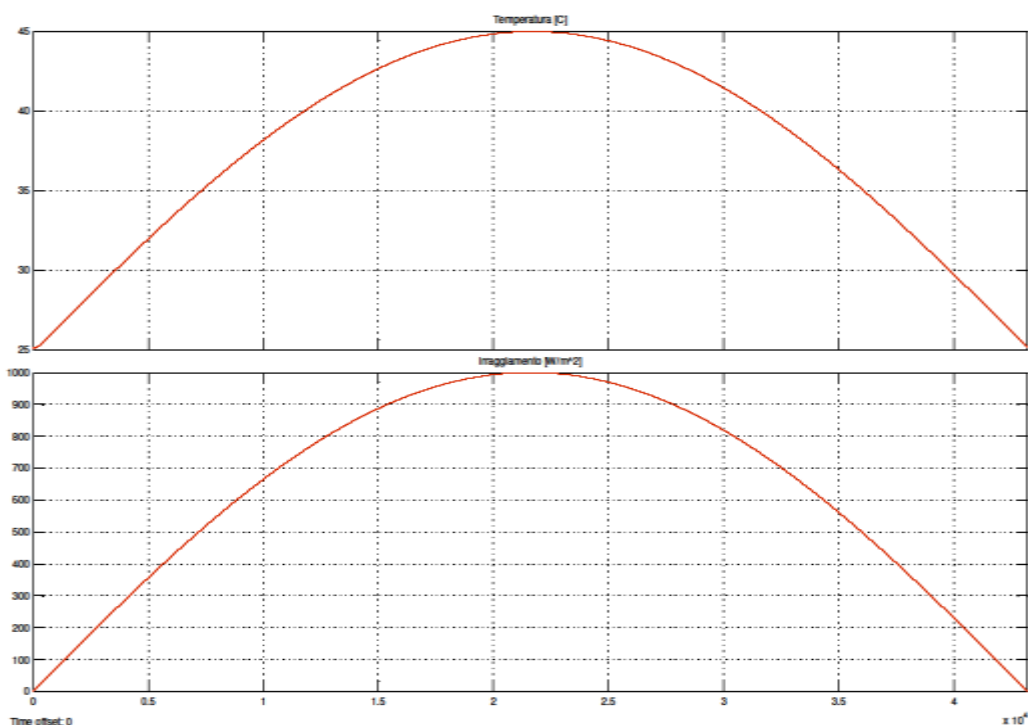


Figura 19 Temperatura e irraggiamento nel test 2

Si ottengono dei valori di tensione, corrente e potenza con il seguente profilo:

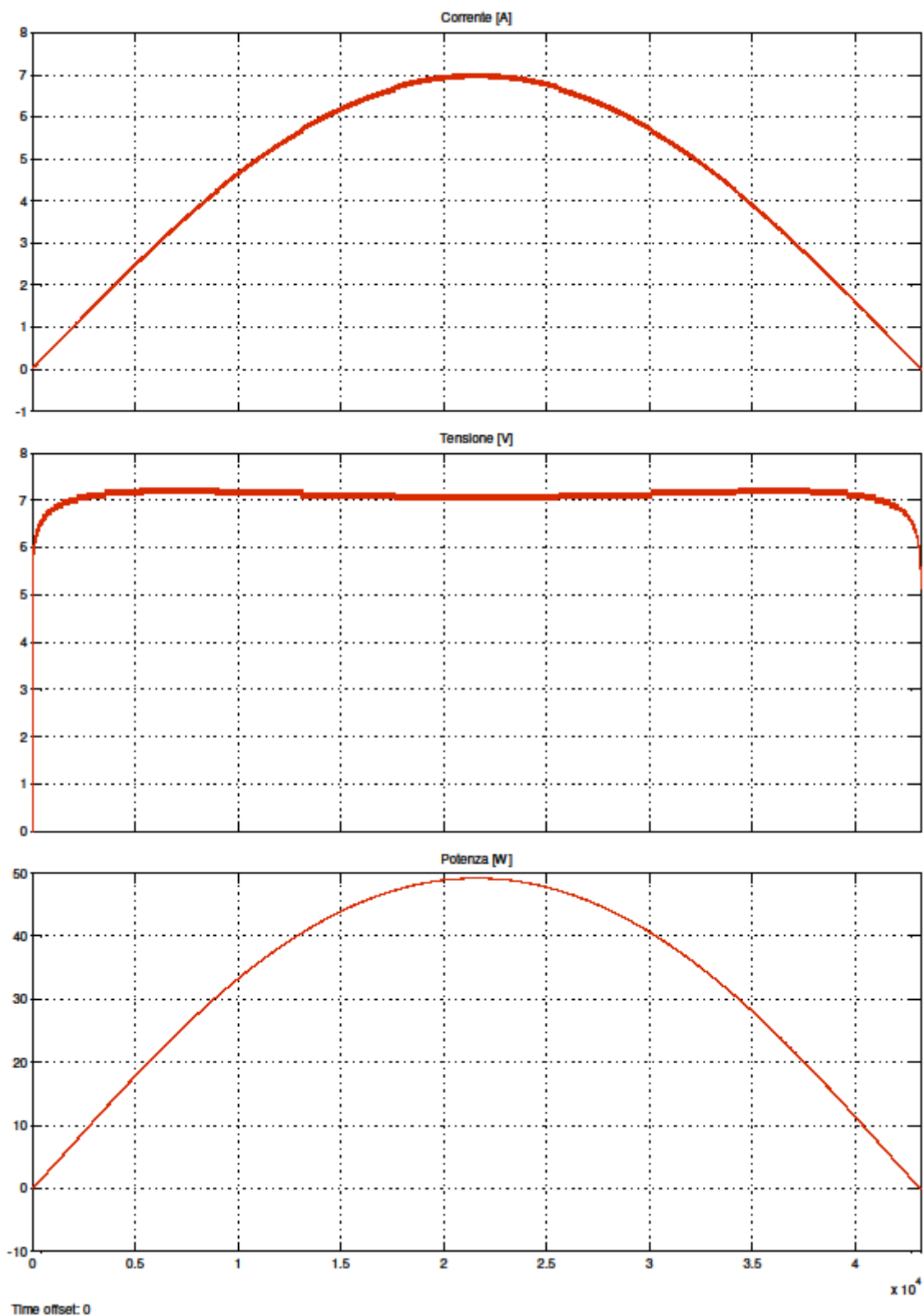


Figura 20 Corrente tensione e potenza nel test 2

È facile notare come l'incremento della temperatura porti ad una diminuzione del valore di tensione stabilito dall'algoritmo d'inseguimento, il che conferma il corretto funzionamento di quest'ultimo. Il dato più rilevante, che ci consente di fare un paragone fra i due sistemi d'inseguimento e le relative prove è la quantità di energia elettrica prodotta e in questo caso è pari a **378,56 Wh**. Questo dato non ci fornisce indicazioni sul funzionamento del sistema d'inseguimento se non lo confrontiamo opportunamente con il dato di produzione ottenuto dal test n°1. Moltiplicando il dato di potenza media del test n°1 per la durata del test n°2, infatti, si ottiene:

$$49,1 W \cdot 12h = 589,2Wh$$

Questo valore è l'energia totale che il pannello dovrebbe produrre se sottoposto ad 1 sole per 12 ore. Per normalizzare questo valore, e compararlo con quello del test n°1, si deve considerare che nel test n°2 il pannello ha ricevuto una radiazione dal profilo d'intensità sinusoidale e non costante; perciò si moltiplica per il valor medio del semiperiodo di una sinusoide ottenendo:

$$589,2 Wh \cdot \frac{2}{\pi} = 375,3 Wh$$

Il valore così ottenuto si avvicina molto alla producibilità del test n°2, la leggera discrepanza può essere attribuita al transitorio iniziale del test n°1 e, in misura maggiore, alla temperatura media più bassa che si registra nel test n°2.

4.1.3. Test 3

In questo test si valutano le capacità di risposta alle brusche variazioni d'irraggiamento del sistema d'inseguimento del M.P.P. Per effettuare questo tipo di test è stato utilizzato un profilo d'irraggiamento dato da la somma della sinusoide utilizzata nel test n°2 e un segnale ad onda quadra, dal periodo pari ad 1 ora e duty cycle 0,5 moltiplicato per una sinusoide di ampiezza dimezzata rispetto alla principale; il segnale appena descritto presenta delle diminuzioni di ampiezza del 50% ad intervalli regolari di 1 ora. Grazie a questo tipo di simulazione è possibile analizzare il comportamento dei sistemi d'inseguimento di fronte a bruschi e intensi cambiamenti di condizione atmosferica. I risultati del test mostrano i tempi di risposta del sistema d'inseguimento, che sono molto più rapidi della dinamica termica del pannello. Qui sotto si riportano i profili d'irraggiamento e temperatura.

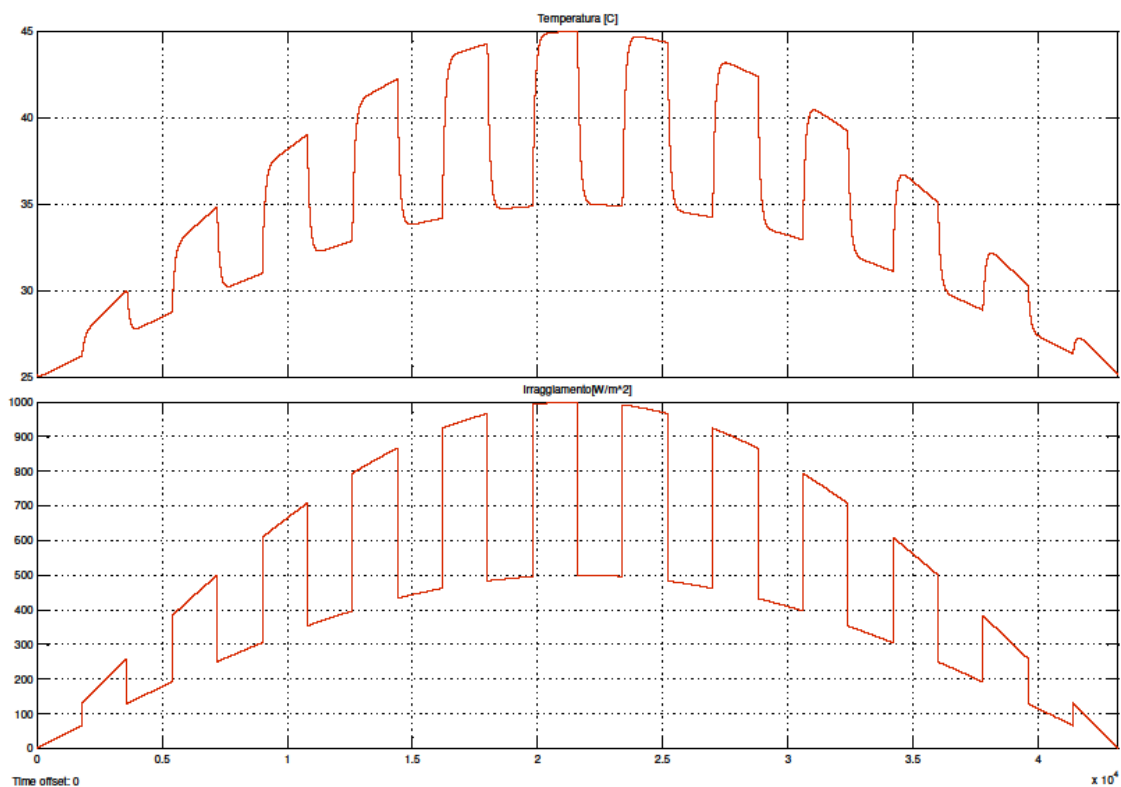


Figura 21 Profili di irraggiamento e temperatura

A fronte dei profili d'irraggiamento e temperatura sopra riportati si ottengono le seguenti prestazioni da parte del pannello e dell'algoritmo.

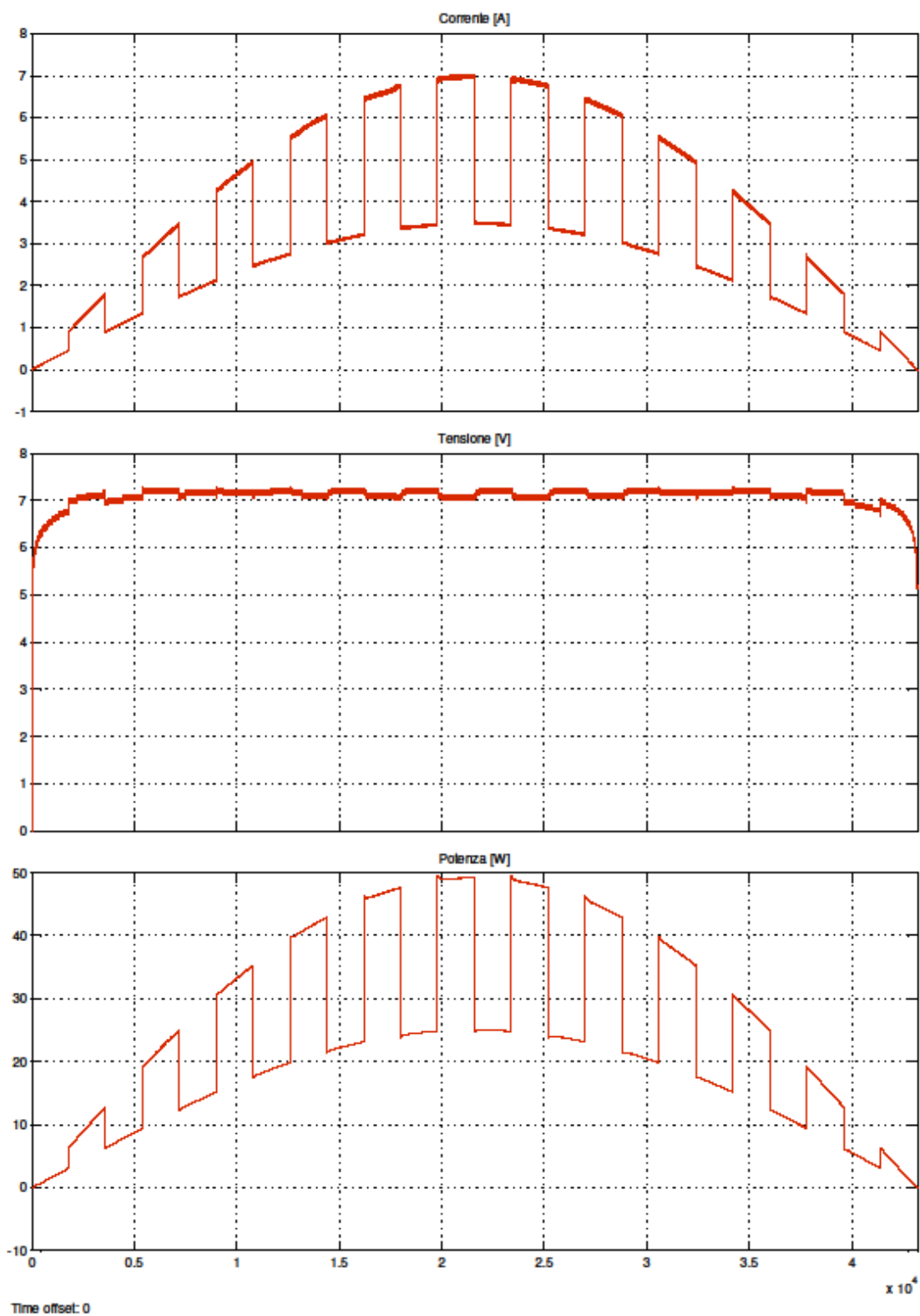


Figura 22 Prestazione del sistema

Dai grafici riportati si nota come l'intensità di corrente uscente dal pannello sia fortemente dipendente dalla potenza radiante che lo colpisce, mentre la posizione dell'M.P.P. dipende più marcatamente dal valore di temperatura assunto dal pannello. Al fine di valutare più accuratamente il transitorio di temperatura e quindi lo spostamento del M.P.P., di seguito si riporta un dettaglio dei grafici sopra riportati.

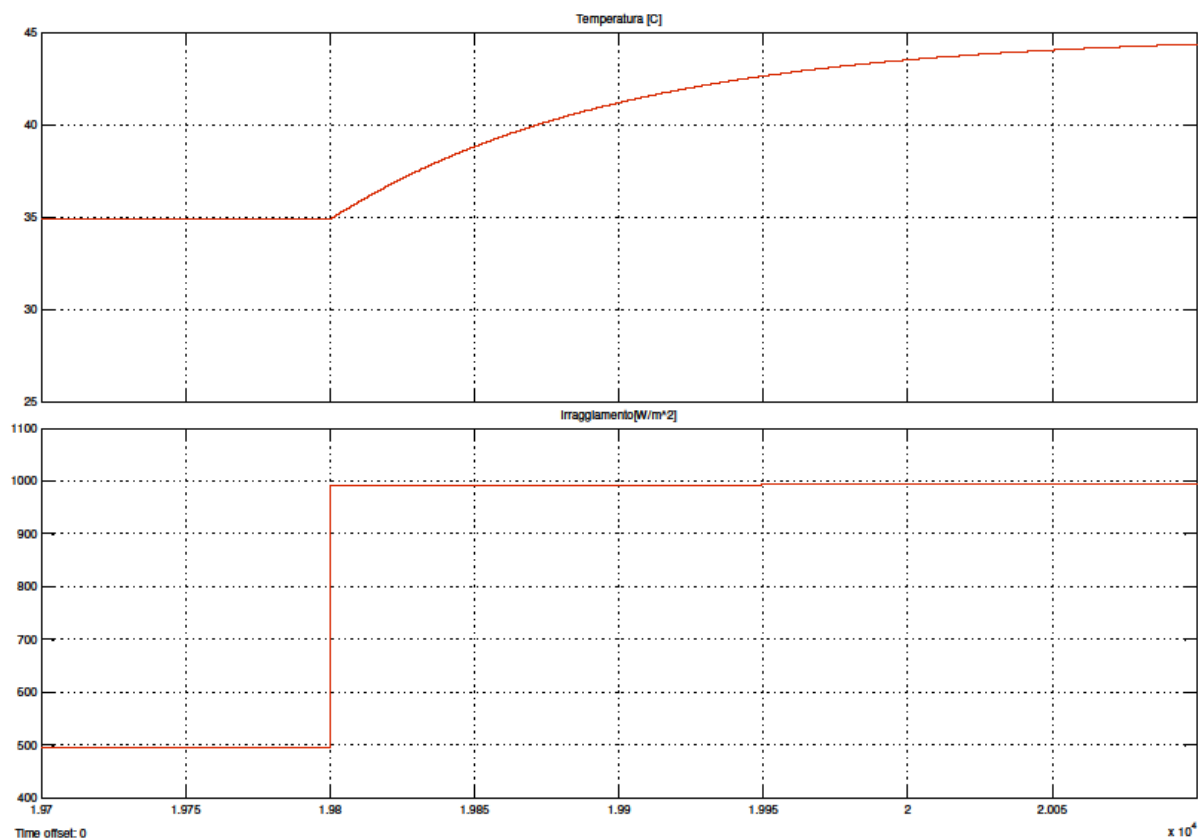


Figura 23 Risposta al gradino di temperatura

Come evidenziato dal grafico qui sopra, il pannello impiega circa 700 s, che corrispondono a circa 11 minuti per riscaldarsi di circa 10 [°C]. Il grafico seguente mostra come la variazione di tensione applicata al pannello segua il profilo della variazione di temperatura.

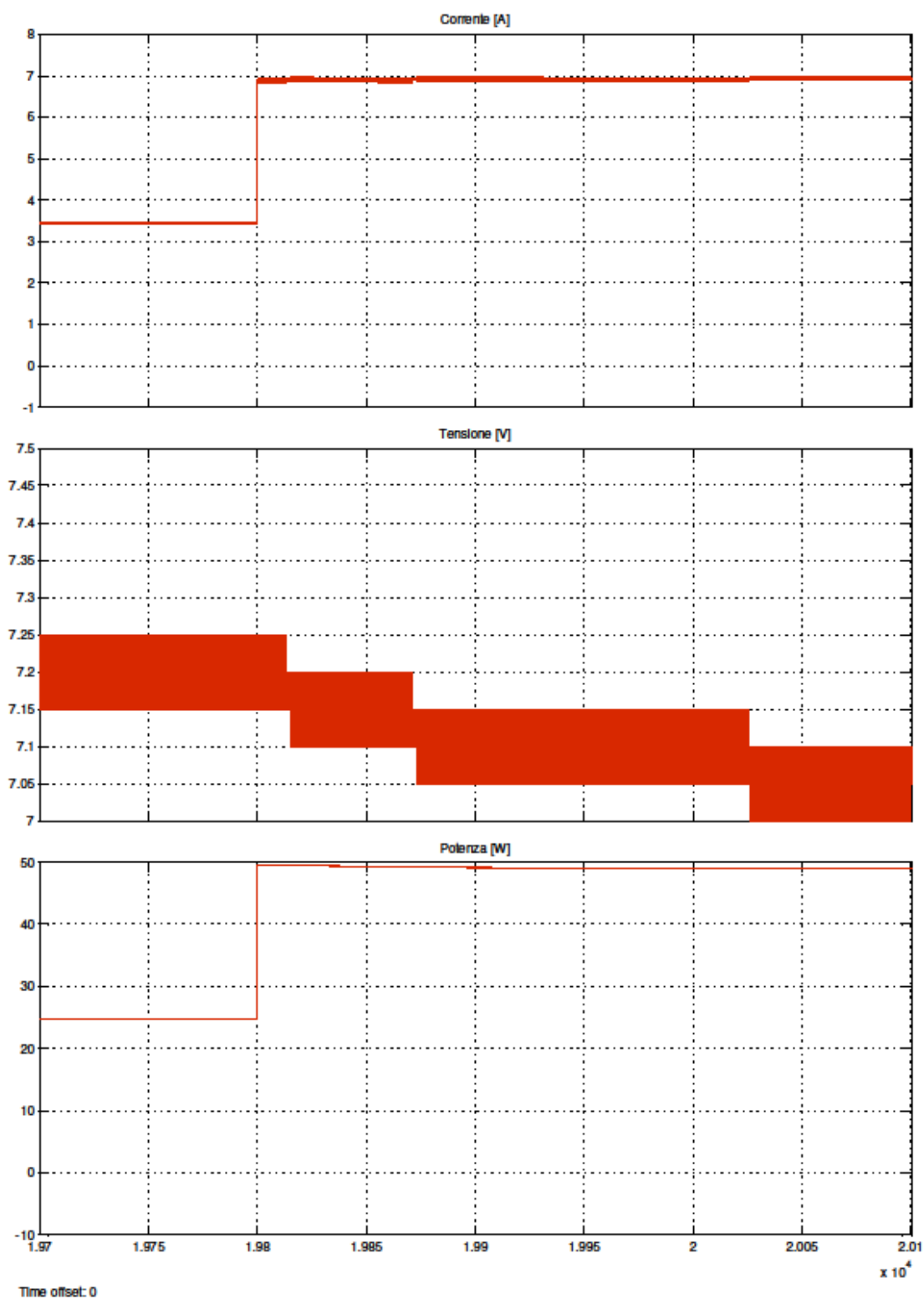


Figura 24 Dettaglio delle prestazioni

Come la variazione di temperatura anche il riassetto del valore di tensione impiega circa 11 minuti, il che conferma il corretto funzionamento dell'algoritmo di ricerca.

Il dato più rilevante e che ci permette di confrontare i diversi sistemi d'inseguimento è il valore di energia elettrica prodotta. Il pannello durante le 12 ore di simulazione, a 25°C di temperatura atmosferica, ha prodotto 1.024.430 J di energia elettrica, che corrispondono a **284,6 Wh**. Quest'ultimo dato è in linea con quello che ci si poteva attendere considerando i risultati dei precedenti test.

4.2. Simulazione Elettrica

Nella simulazione elettrica si testano le prestazioni del sistema d'inseguimento includendo il convertitore DC/DC e il relativo controllore. Come già descritto nei precedenti capitoli, le simulazioni di questo tipo non comprendono il modello termico del pannello e, conseguentemente, vengono effettuate impostando un valore fisso della temperatura del pannello.

Il sistema d'inseguimento deve reagire soltanto alle variazioni d'irraggiamento e non più alle variazioni di temperatura; per questo motivo il profilo d'irraggiamento per questo tipo di test è stato reso volutamente molto variabile, fino a renderlo poco possibile in una situazione di reale utilizzo del sistema d'inseguimento.

La variazione d'irraggiamento mette molto in difficoltà il convertitore DC/DC e il suo controllore a causa della forte dipendenza dell'intensità di corrente uscente dal pannello fotovoltaico dalla radiazione luminosa; per questo è interessante osservare il comportamento del controllore in queste prove.

Le prestazioni ottenute in questo test sono le seguenti.

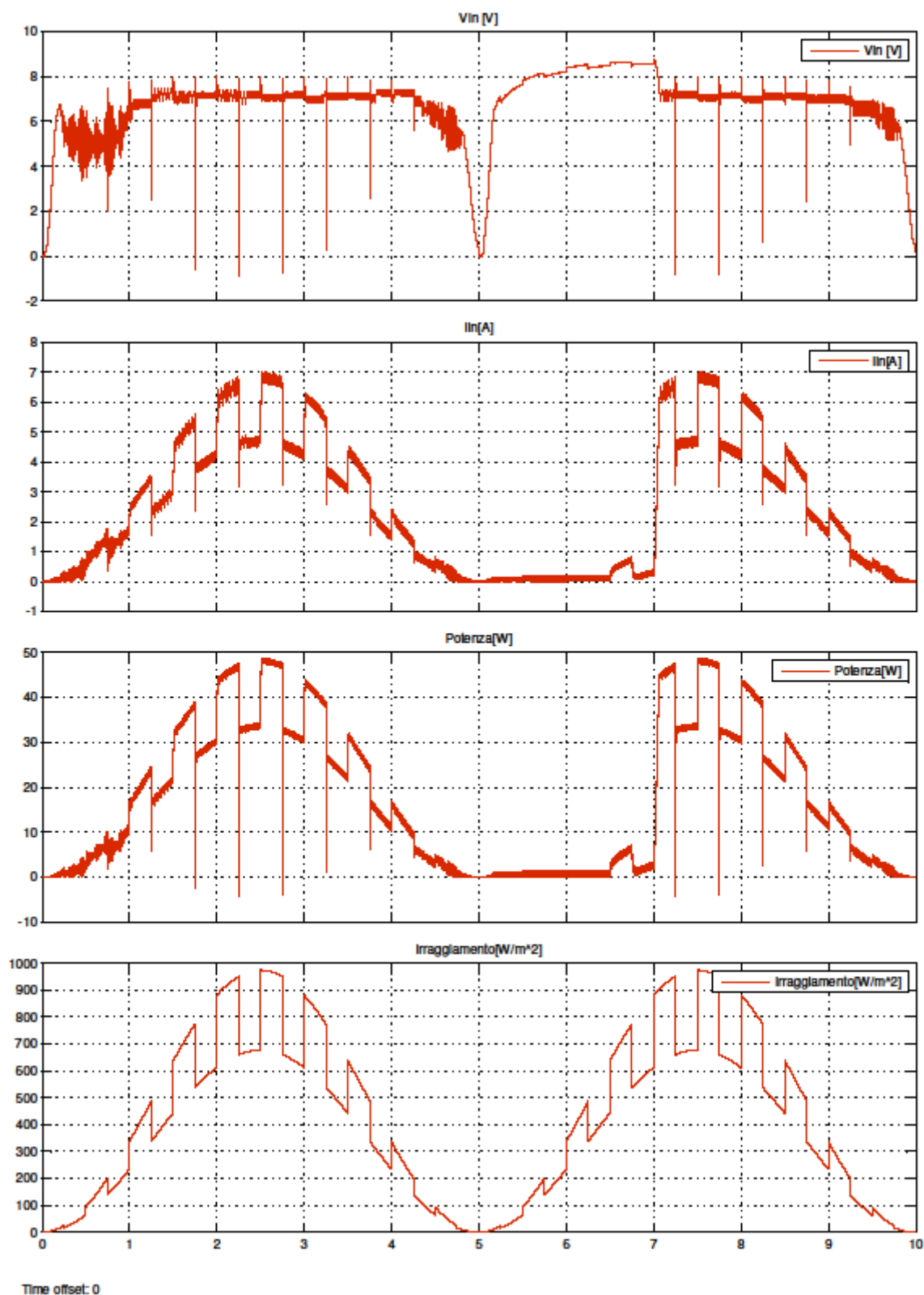


Figura 25 Prestazioni test elettrico

Ci sono due fenomeni interessanti da notare: come previsto l’algoritmo di tipo “perturba e osserva” è molto sensibile alle brusche variazioni delle condizioni esterne, infatti, si vede

come nel grafico della tensione siano presenti dei picchi negativi e positivi ogni qual volta il valore d'irraggiamento compie una brusca variazione. Osservando il grafico della tensione ci si accorge che quando la simulazione è intorno ai 5s e il valore d'intensità della radiazione luminosa sta risalendo, il sistema d'inseguimento impiega circa 1,5s a riadattarsi alle condizioni esterne e ritornare sul M.P.P. I fenomeni appena descritti illustrano i principali difetti dell'algoritmo "PnO".

Un ultimo dato disponibile su questa simulazione è la quantità di energia elettrica prodotta nei 10 secondi di simulazione ed è pari a **172,2 J**; quest'ultimo dato non è molto rilevante in questo tipo di simulazione ma ci permette di confrontare le prestazioni con l'algoritmo a conduttanza incrementale.

5. Algoritmo “Conduttanza Incrementale”

Introduzione

L’obiettivo principale del lavoro qui riportato è lo sviluppo e il test di un algoritmo di M.P.P.T. del tipo “Conduttanza Incrementale”. La creazione del modello del pannello e dell’algoritmo PnO sono servite esclusivamente a fornire un termine di paragone e un banco di prova valido per l’algoritmo che viene descritto in questo capitolo. L’algoritmo sviluppato è stato scelto del tipo “ Conduttanza Incrementale” perché risulta essere quello che più si presta all’utilizzo nella maggior parte degli impianti fotovoltaici, grazie alla combinazione di relativa semplicità, efficacia e basso costo. Nel presente paragrafo si descrive il funzionamento dell’algoritmo sviluppato e le modifiche apportate rispetto all’algoritmo classico.

```
function [V_ref1,V_old1,I_old1]= InCond(I_in,V_in,V_ref,V_old,I_old)
%Funzione di calcolo della tensione di riferimento per il controllore.
%Algoritmo di tipo Incremental Conductance
c=0.01;
DV=V_in-V_old;
DI=I_in-I_old;
if DV~=0
    if abs(DI/DV+I_in/V_in)<=0.018
        V_ref1=V_ref;
    elseif DI/DV+I_in/V_in>0.018
        V_ref1=V_ref+c;
    else
        V_ref1=V_ref-c;
    end
else
    if DI==0
        V_ref1=V_ref;
    elseif DI>0
        V_ref1=V_ref+c;
    else
        V_ref1=V_ref-c;
    end
end
V_old1=V_in;
I_old1=I_in;
end
```

Il funzionamento, per quanto riguarda la piattaforma di applicazione, è analogo a quello dell’algoritmo “PnO”, ovvero si ha lo stesso schema di memorie, ingressi e uscite.

Nelle prime 3 linee di codice l’algoritmo stabilisce la larghezza del passo di perturbazione e calcola le differenze fra tensioni e correnti di due cicli di calcolo successivi. In seguito si procede all’aggiornamento della tensione di riferimento in uscita dall’algoritmo: se si rileva una differenza di tensione fra i cicli di calcolo si procede al calcolo della conduttanza

incrementale. Com'è evidente dal codice la condizione del punto di massimo viene considerata verificata se la somma di conduttanza e conduttanza incrementale non supera, in valore assoluto, 0,018 [S]; quest'ultimo valore è una modifica apportata all'algoritmo classico che permette di avere un valore di tensione stabile una volta che l'algoritmo ha raggiunto il punto di massima potenza. Il valore 0,018 [S] non è casuale, è, infatti, stato scelto come l'approssimazione per eccesso al 3 decimale del valore massimo della somma di conduttanza e conduttanza incrementale che si registra nell'esecuzione dell'algoritmo (classico) quando questo raggiunge il punto di massima potenza. La modifica appena descritta porta un deciso miglioramento nella stabilità della tensione dell'algoritmo, una volta che questo ha raggiunto il M.P.P., senza tuttavia, rallentare l'algoritmo in fase d'inseguimento.

Tornando alla descrizione del funzionamento dell'algoritmo, in caso questo non registri variazione di tensione, che renderebbe pari a infinito la conduttanza incrementale, l'algoritmo valuta la variazione di corrente e aggiorna opportunamente il valore di tensione in uscita. Le ultime linee di codice aggiornano le memorie dell'algoritmo. Nei successivi paragrafi si riportano i risultati dei test, analoghi a quelli descritti per l'algoritmo "PnO", effettuati su questo tipo di sistema di M.P.P.T.

5.1. Simulazione Termodinamica

Sull'algoritmo di ricerca di tipo "Conduttanza Incrementale", descritto nel paragrafo precedente, sono stati effettuati dei test di natura analoga a quelli descritti precedentemente per l'algoritmo "PnO"; tutto ciò è stato fatto al fine di poter confrontare il comportamento dei due tipi di sistemi posti nelle stesse condizioni.

5.1.1. Test 1

Come per l'algoritmo "PnO", il primo test prevede l'applicazione di 1000 W/m^2 d'intensità di radiazione solare per un'ora. Questo tipo di prova è utile soprattutto per stabilire la prestazione massima ottenibile dal sistema d'inseguimento e dal pannello. Come per i test precedentemente illustrati si riportano i profili d'irraggiamento e temperatura:

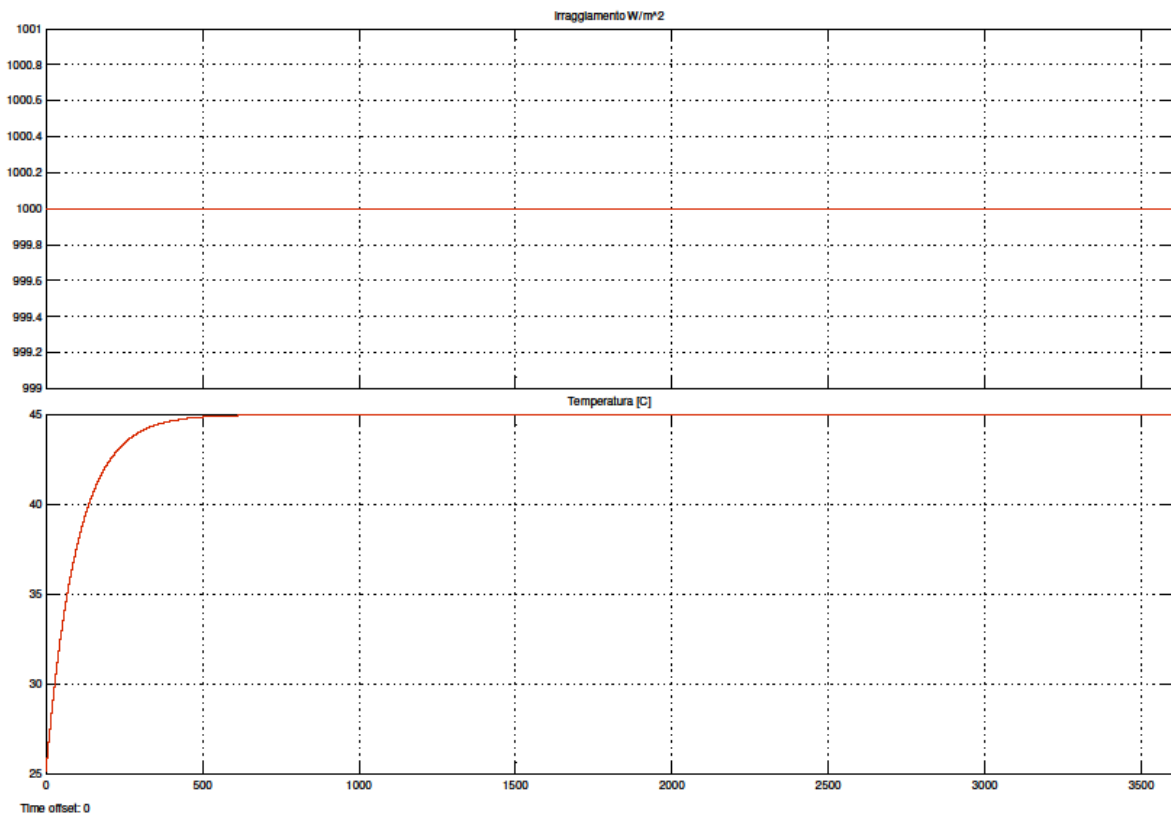


Figura 26 Irraggiamento e temperatura test 1 IncCond

I grafici di tensione, corrente e potenza ai morsetti del pannello sono i seguenti:

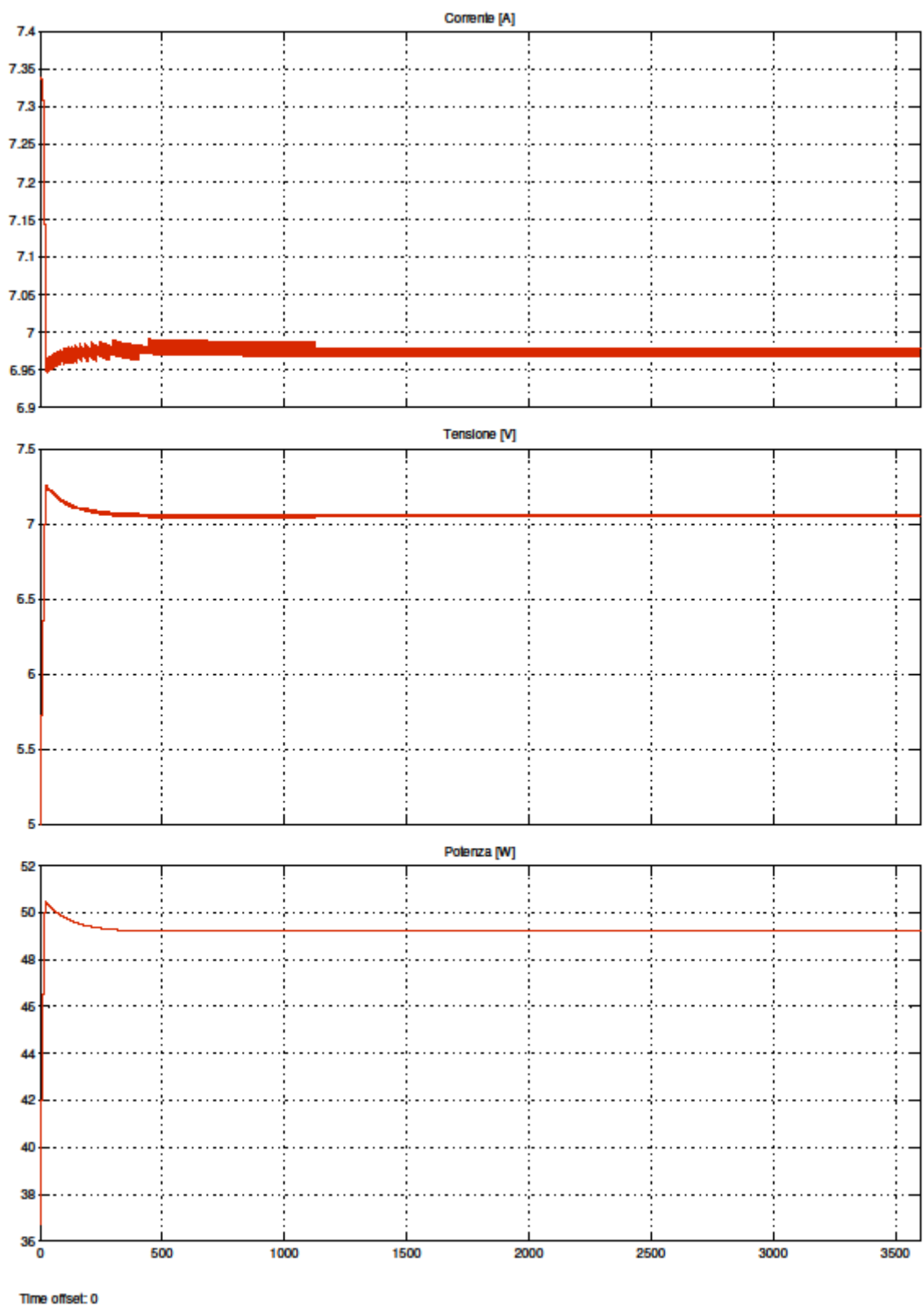


Figura 27 Prestazioni del sistema del test 1 IncCond

Dai grafici riportati qui sopra è evidente come le variabili elettriche del pannello siano molto più stabili e prive di ripple in questo caso, rispetto ai risultati ottenuti con l'algoritmo "PnO". L'energia totale prodotta dal pannello fotovoltaico è pari a 49,2 Wh.

5.1.2. Test 2

Anche questo test è analogo a quello effettuato precedentemente per il sistema d'inseguimento "PnO", al pannello fotovoltaico, infatti, viene fornita una radiazione luminosa dalle caratteristiche identiche a quelle utilizzate nel test n°2 del algoritmo "PnO". Si riportano nuovamente i grafici che rappresentano irraggiamento e temperatura del pannello.

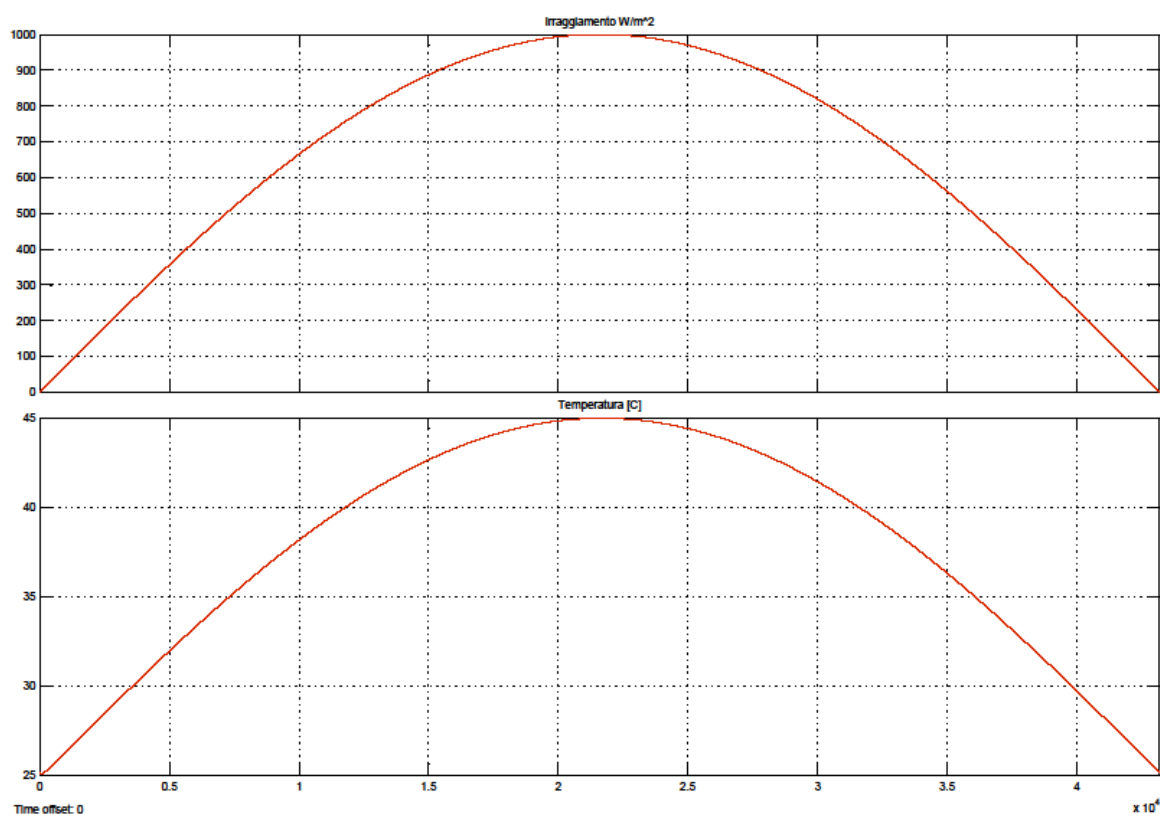


Figura 28 Irraggiamento e temperatura test 2 IncCond

Di seguito sono illustrati i grafici delle variabili elettriche inerenti alla medesima prova.

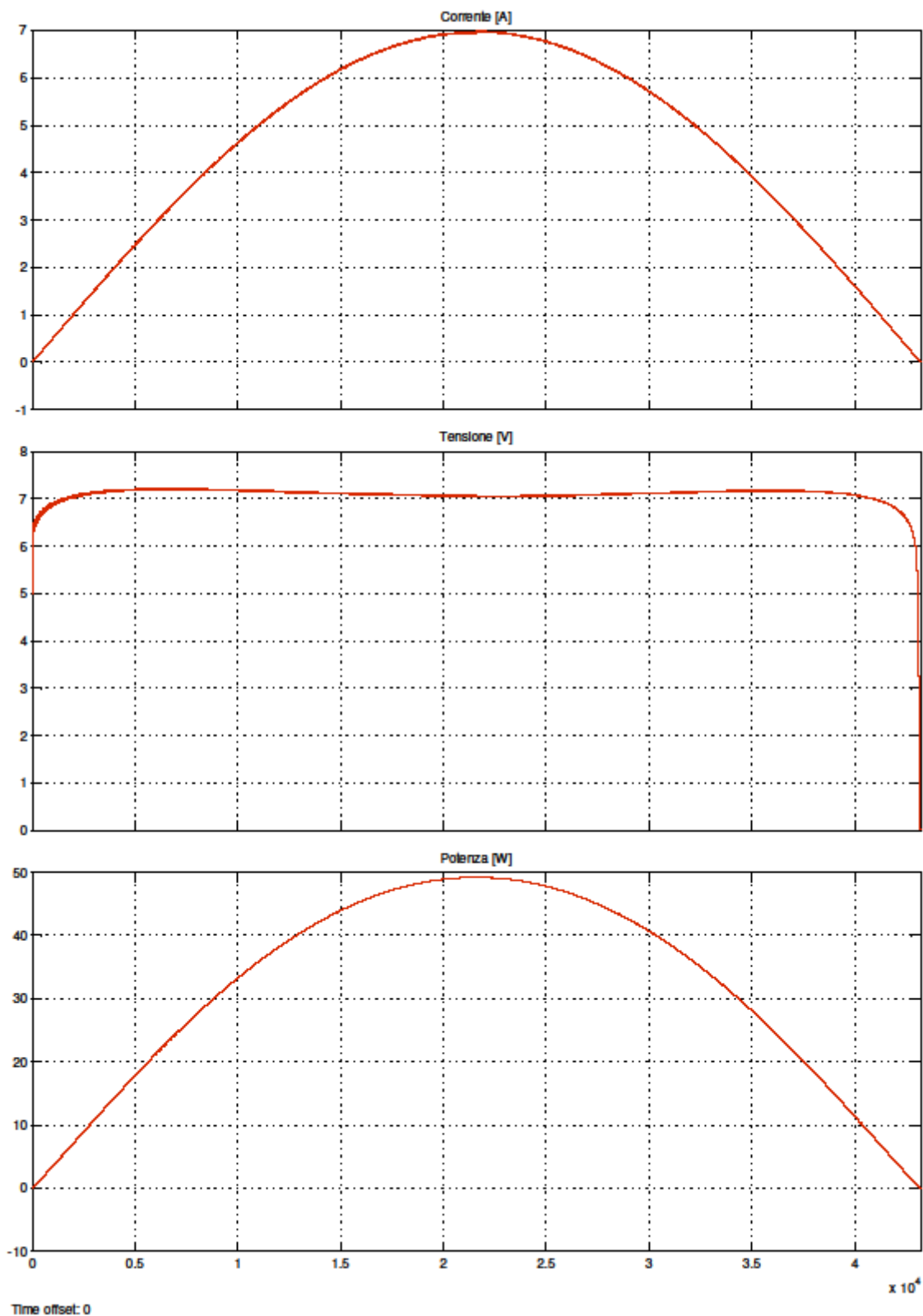


Figura 29 Prestazioni IncCond

Dai grafici è evidente il corretto funzionamento del sistema d'inseguimento che provvede ad abbassare la tensione applicata al pannello quando questo aumenta la sua temperatura; si registra, inoltre, un ripple molto contenuto sulle variabili elettriche, che contribuisce a migliorare le prestazioni del sistema. L'energia elettrica prodotta in totale in questo caso è pari a **378,7 Wh**.

5.1.3. Test 3

Anche il test termico n°3 è analogo sia per il sistema “Conduttanza Incrementale” che per il sistema “PnO”. In questo test, infatti, il pannello è stato posto nelle stesse condizioni del test n°3 del precedente algoritmo descritto. Di seguito si riportano i profili d'irraggiamento e temperatura:

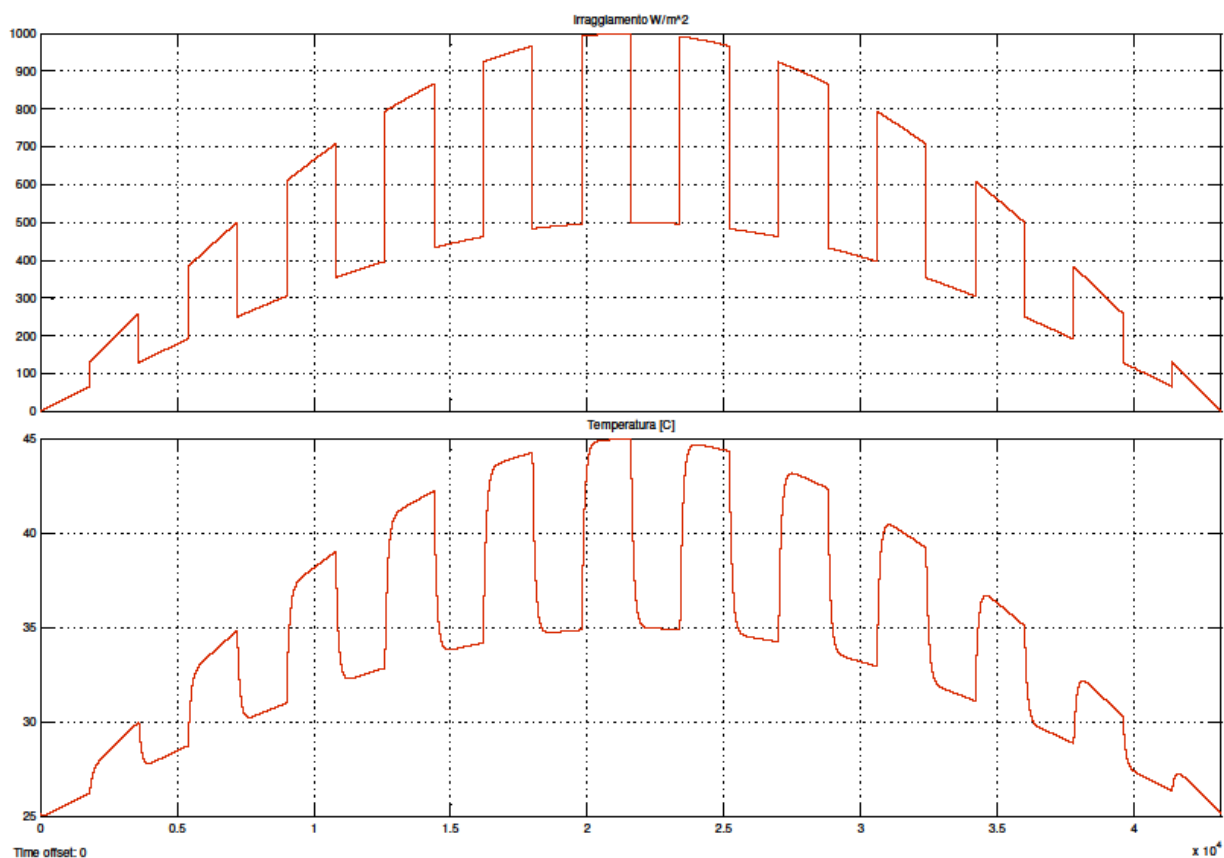


Figura 30 Profili di irraggiamento e temperatura

Qui sotto si riportano i grafici delle variabili elettriche ottenuti nello stesso test:

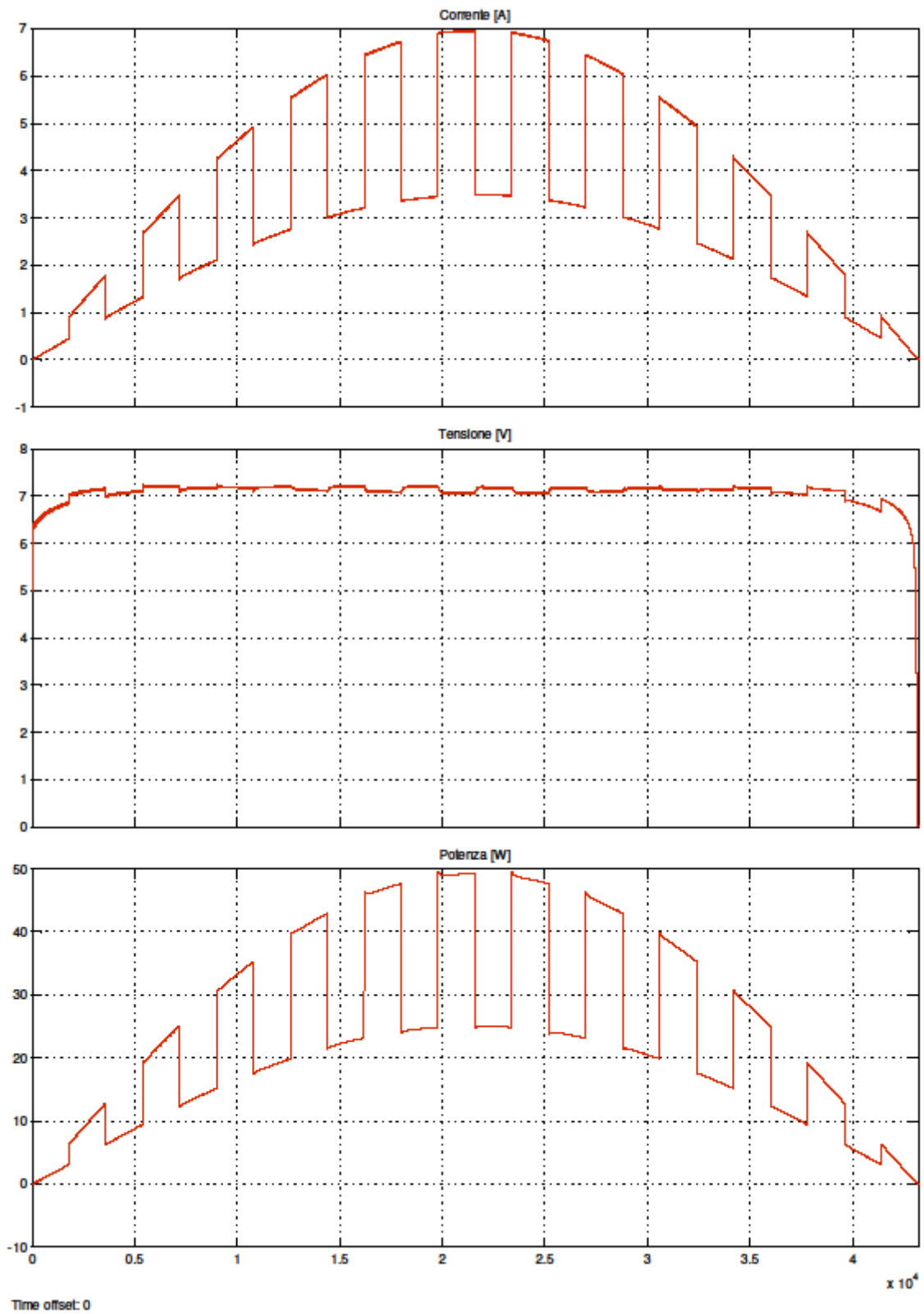


Figura 31 Prestazioni test 3 InCond

L'energia elettrica prodotta in questo test è pari a **284,6 Wh** nonché esattamente la stessa quantità prodotta nel test n°3 dell'algoritmo "perturba e osserva".

Quest'ultima cifra conferma quanto si evince dal confronto fra i grafici inerenti ai test analoghi effettuati sui due algoritmi, ovvero, questi inseguono il M.P.P. con prestazioni molto simili almeno per quanto riguarda le simulazioni senza convertitore. Qui sotto si riporta un dettaglio della prestazione dell'algoritmo "Conduttanza Incrementale".

Il successivo grafico illustra il corretto funzionamento dell'algoritmo di ricerca che insegue il M.P.P. al variare della temperatura del pannello fotovoltaico.

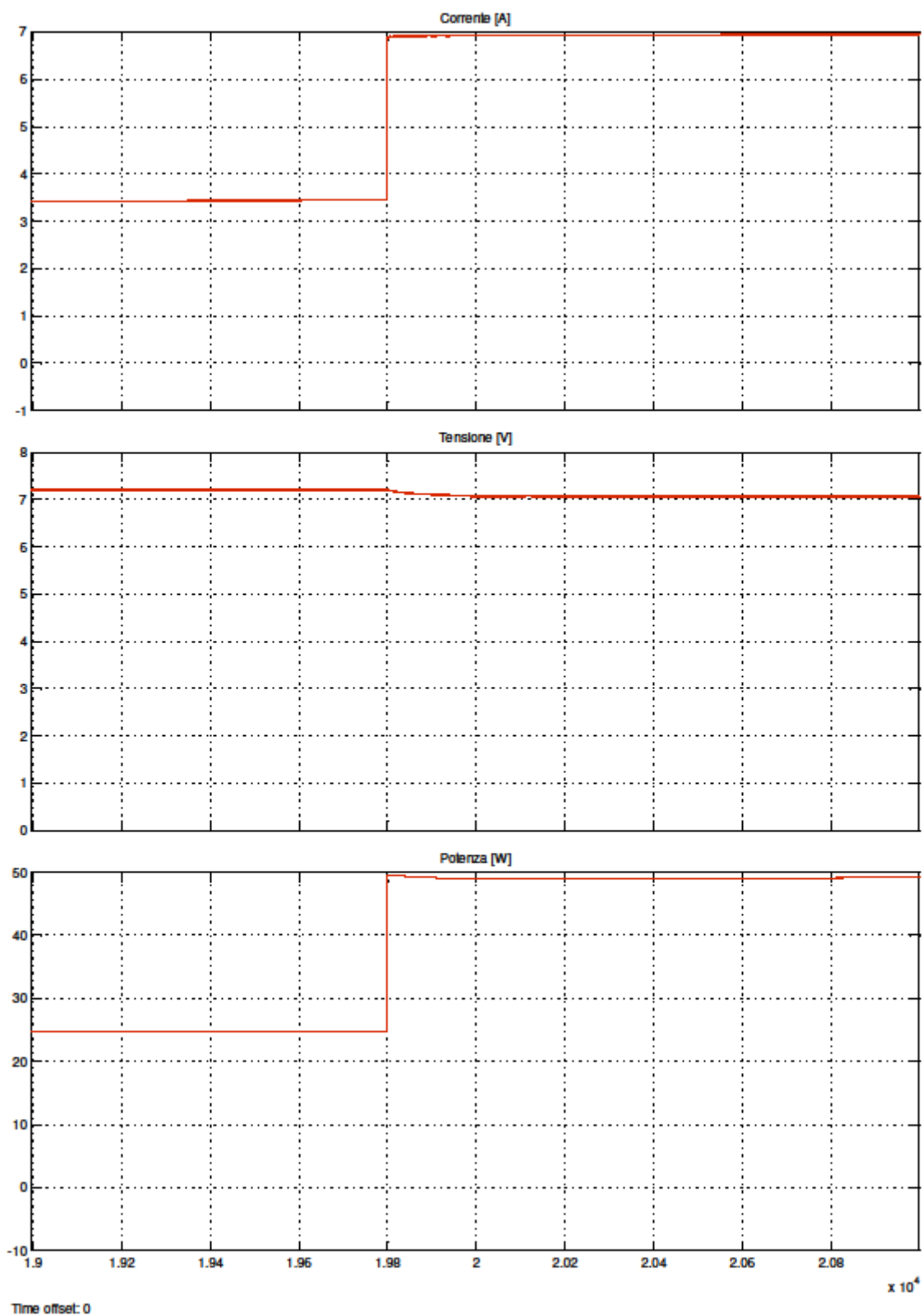


Figura 32 Dettaglio prestazioni InCond

5.2. Simulazione Elettrica

In questo paragrafo si presentano i risultati del test effettuato sul sistema d'inseguimento, inserendo il modello del convertitore DC/DC e il relativo controllore; questo test è del tutto identico a quello presentato precedentemente nel capitolo 4.

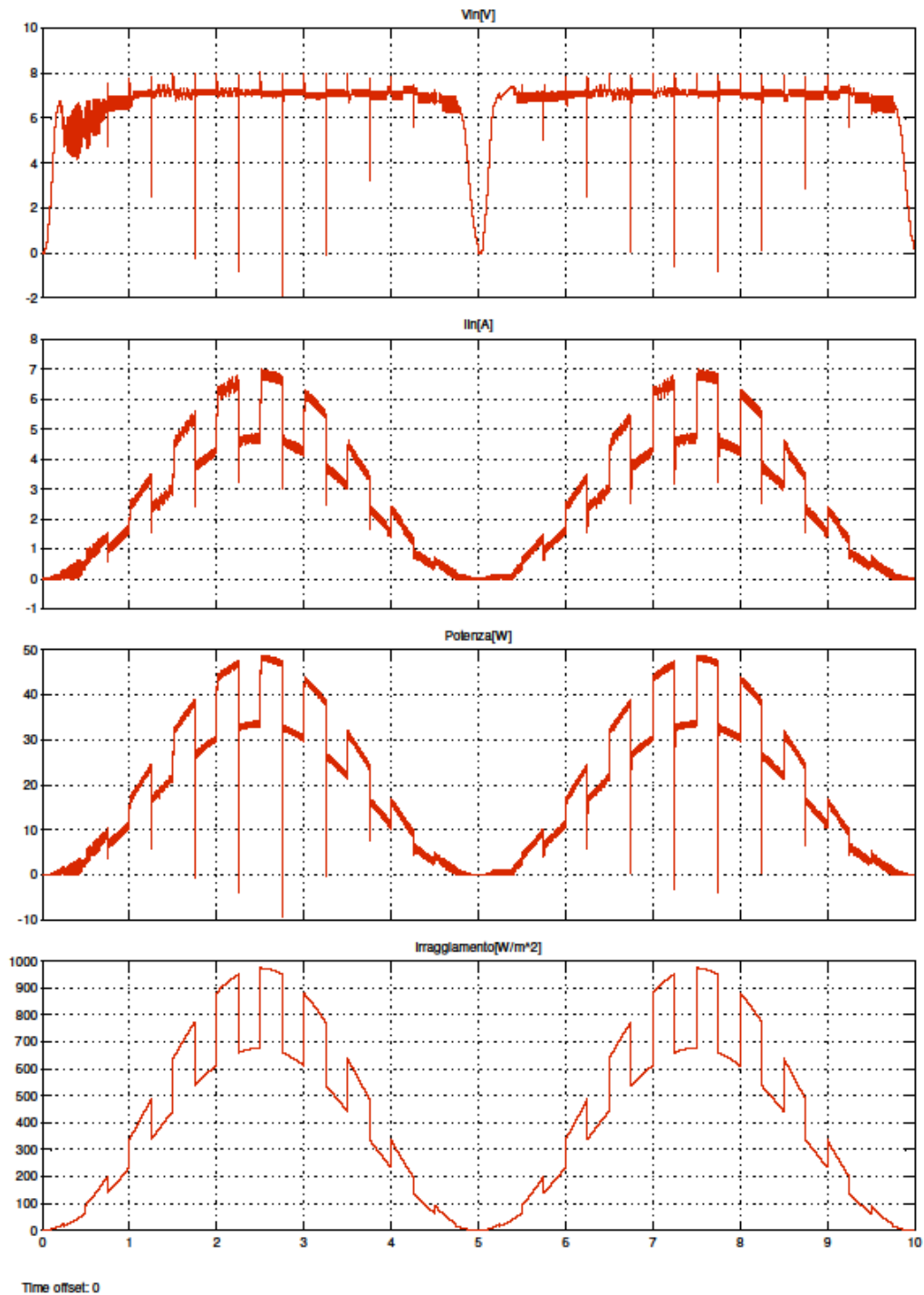


Figura 33 Prestazioni test elettrico InCond

Dai grafici riportati si evince come anche l'utilizzo di questo tipo di algoritmo provochi degli sbalzi di tensione nel caso di brusche variazioni dell'intensità della radiazione solare, in questo test, tuttavia, non sono presenti i problemi di riassetamento sul M.P.P. una volta che la tensione è tornata a 0 V (5°secondo di simulazione).

In quest'ultimo test l'energia elettrica prodotta è pari a **201,7 J** che rappresenta una quantità considerevolmente superiore rispetto a quella prodotta dal sistema d'inseguimento con l'algoritmo PnO nel test analogo.

6. Conclusioni

6.1. Confronto delle prestazioni

Le prestazioni dei due sistemi d'inseguimento sono sostanzialmente equivalenti per quanto riguarda i test con e senza il convertitore DC/DC, in particolare l'energia ricavata dal pannello nei sei test di questo tipo è sempre la stessa, inoltre i sistemi d'inseguimento non sembrano avere problemi a trovare e rimanere sul punto di massima potenza.

Le rapidità d'inseguimento dei due sistemi è pressoché uguale, nonostante l'algoritmo PnO abbia un passo di perturbazione molto più ampio. I due algoritmi si differenziano per stabilità della tensione in condizioni stazionarie; è, infatti, una prerogativa dell'algoritmo "Conduttanza Incrementale" di tenere la tensione costante nel punto di massima potenza le condizioni esterne non variano.

I test con il modello del convertitore DC/DC hanno dato dei risultati diversi con l'utilizzo dei due diversi algoritmi. In particolare dal confronto dei due grafici della tensione di uscita del pannello si evince, prendendo in considerazione i valori dell'irraggiamento, che il sistema d'inseguimento con l'algoritmo "PnO" trova difficoltà nell'inseguire il M.P.P. quando il valore d'irraggiamento si azzerava bruscamente per poi risalire. Questo tipo di problema può essere dovuto al fatto che ai bassi valori di tensione è presente un massimo locale che l'algoritmo non riesce a distinguere dal massimo globale, distinzione che, invece, riesce perfettamente all'algoritmo "Conduttanza Incrementale".

Quest'ultimo, infatti riesce a seguire perfettamente le variazioni del M.P.P. anche nelle simulazioni elettriche. Soffre tuttavia, come l'algoritmo "PnO", di sbalzi di tensione piuttosto marcati durante le brusche variazioni delle condizioni esterne. Gli sbalzi di tensione, generati quando le condizioni hanno delle rapide variazioni, possono essere dovuti

alla natura del modello del convertitore, oppure, al non perfetto funzionamento del controllore; quest'ipotesi è giustificata dal fatto che il fenomeno si presenta in misura uguale con entrambi gli algoritmi.

6.2. Sviluppi futuri

Il sistema di modellizzazione e simulazione sviluppato ed elaborato per realizzare questo studio ha grandi potenzialità di ampliamento. Attraverso mezzi di calcolo più potenti di quelli a nostra disposizione si potrebbero, infatti, effettuare simulazioni molto accurate di un intero impianto fotovoltaico, partendo dalla singola cella, per arrivare all'interazione dell'inverter con la rete. Potendo attrezzare alcune prove termiche si potrebbe, inoltre, elaborare un modello degli scambi termici fra il pannello e l'ambiente circostante, riuscendo ad effettuare una simulazione più verosimile della dinamica termica del pannello.

Il modello del pannello fotovoltaico potrebbe essere complicato studiando le interazioni termiche fra le singole celle, attribuendo alle stesse diversi ingressi d'irraggiamento, quindi si potrebbero aggiungere i diodi di bypass. Oltre allo scambio termico con l'atmosfera potrebbe essere aggiunta al modello l'interazione termica con le strutture di sostegno.

Il più importante miglioramento possibile è l'aggiunta di più algoritmi di calcolo connessi ai diversi pannelli e ai relativi convertitori DC/DC. Potenzialmente, come già detto, si è in grado, grazie alla libreria Simulink, di simulare un intero campo solare, il che disponendo di dati di irraggiamento di un qualunque sito d'installazione potrebbe aiutare molto a prevederne la produttività e quindi il tempo di rientro dell'investimento.

Bibliografia

- [1] Temperature and Irradiance Dependence of the I-V Curves of Various Kinds of Solar Cells, Yuki Tsuno, Yoshihiro Hishikawa and Kosuke Kurokawa National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
- [2] EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL, Geoff Walker, Dept of Computer Science and Electrical Engineering, University of Queensland, Australia.
- [3] J. A. Gow, C. D. Manning “Development of a photovoltaic array model for use in powerelectronics simulation studies,” IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, pp. 193-200, March 1999.
- [4] T. Markvart, Solar Electricity, John Wiley & Sons, 1994.
- [5] M. A. Green, Solar Cells, University of New SouthWales, 1992.
- [6] Solarex data sheets, www.solarex.com [5] H. Suehrcke, C. P. Ling and P. G. McCormick, “The dynamic response of instruments measuring instantaneous solar radiation.” Solar Energy, Vol. 44, pp. 145-148, 1990.
- [7] Tecniche d’inseguimento del M.P.P.T. con logica fuzzy, Moro Tiziano, Università degli Studi di Firenze