



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Informazione

**MODELLI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA DA
FONTI RINNOVABILI PER DISPOSITIVI
ENERGY-HARVESTING**

**ENERGY GENERATION MODELS FROM RENEWABLE
SOURCES FOR ENERGY-HARVESTING DEVICE**

Laureando

Alessandro Blascovich

Relatore

Leonardo Badia

Co-relatore

Luca Corradini

ANNO ACCADEMICO 2011/2012

Alle persone che mi hanno sostenuto
negli studi e in questo lavoro...

Indice

Introduzione	IX
1 Descrizione del modello di Markov	1
1.1 Catene di Markov a tempo discreto	1
1.2 Probabilità di transizione delle catene di Markov	2
1.2.1 Diagramma delle transizioni	4
1.2.2 Cammini aleatori	5
2 Descrizione dell'irraggiamento solare	7
2.1 Componente deterministica	7
2.2 Componente aleatoria	9
3 Dati simulati in MATLAB. Osservazioni	15
3.1 Risultati di alcune simulazioni	16
3.1.1 Simulazione casuale	26
3.2 Analisi della varianza dell'irraggiamento	27
4 Maximum Power Point Tracker - MPPT	29
4.1 Principio di funzionamento di una cella fotovoltaica	29
4.2 Descrizione del punto di massima potenza e dell'MPPT	32
4.3 Paronamica degli algoritmi di MPPT	33
4.3.1 Perturba ed Osserva	34
4.3.2 Conduttanza incrementale	36
4.4 Simulazione SIMULINK di un algoritmo di MPPT	37
4.4.1 Risultati della simulazione	38
5 Conclusioni	43
A Matrici d'irraggiamento	45
Bibliografia	45

Sommario

I dispositivi Energy-Harvesting, grazie alla loro versatilità d'impiego ed efficienza, si stanno diffondendo rapidamente, non solo come oggetto di ricerca universitaria ed ingegneristica, ma anche in componenti commerciali. Sono già presenti applicazioni che fanno uso di tali dispositivi; nelle medie potenze si possono citare tutti i dispositivi di controllo per le energie rinnovabili, mentre nelle soluzioni *ultra-low-power* si contano installazioni di apparecchi "energeticamente perpetui".

Scopo di questa tesi è quello di sviluppare uno strumento, basato sulle catene di Markov, per simulare i valori giornalieri della radiazione solare in modo da consentirne l'applicazione, come input energetico, negli impianti Energy Harvesting a pannelli fotovoltaici. Misure sperimentali e dati statistici sono stati essenziali per ottenere un modello fedele alla reale situazione climatica.

Nell'elaborato, inoltre, si è analizzato come un sistema MPPT (Maximum Power Point Tracking), che opera sulla simulazione costruita, sia in grado di rispondere a diverse situazioni meteorologiche, fornendo così uno strumento direttamente sfruttabile dai dispositivi Energy Harvesting.

Introduzione

Lo studio delle fonti rinnovabili è un ambito di ricerca che sempre di più interessa l'ingegneria e che si evolve costantemente verso nuove frontiere. I dispositivi Energy Harvesting, anche conosciuti come Energy Scavenging, sfruttano le risorse energetiche disponibili nell'ambiente in cui vengono collocati per alimentarsi [12, 21]. Il termine Energy Harvesting è principalmente riferito a dispositivi, autonomi sotto il profilo energetico, che trovano applicazione qualora una sorgente di energia elettrica costante e sicura non sia disponibile oppure rappresenti un costo eccessivo d'installazione. L'energia, estraibile da diverse fonti, dal solare all'eolico, dalle correnti marine alle vibrazioni del terreno, viene convertita in energia elettrica [5, 21]; l'impiego di questa strategia è, quindi, particolarmente adatto in tutte quelle situazioni in cui sia necessario svincolarsi dal problema di approvvigionamento e fornitura dell'elettricità. Numerose sono le ricerche mirate ad ottimizzare l'efficienza e il consumo dei dispositivi Energy Harvesting, o a massimizzare la versatilità d'impiego delle loro applicazioni [5, 6, 23].

Il presente lavoro ha come obiettivo quello di analizzare e simulare la componente probabilistica della fonte energetica disponibile costruendo un modello scientifico direttamente utilizzabile. Le fonti in questione infatti, influenzate dalle condizioni meteorologiche, rappresentano una situazione in cui l'energia prodotta assume un carattere aleatorio, che ha interessato molte analisi probabilistiche e statistiche [19, 30].

Un modello che simuli l'andamento casuale della fonte energetica si può rilevare un ottimo strumento pratico da applicare, in particolare, ai sistemi che alimentano le reti di sensori; quest'ultimi, atti a monitorare una qualsiasi informazione in una superficie più o meno estesa, dispongono, nella maggior parte dei casi, solo di una batteria come fonte energetica ma, se affiancati ad un pannello fotovoltaico, possono costituire un sistema autosufficiente in cui non è necessaria manutenzione [4, 28, 29, 21].

Negli impieghi di questo tipo è di primario interesse studiare anche la

situazione a lungo termine; un modello che possa generare un andamento casuale della fonte energetica è idoneo per analizzare e fornire utili informazioni, per esempio, circa l'accumulo energetico disponibile, prodotto e consumato. Modellizzare le fonti energetiche ha due scopi principali: quello di conoscere l'andamento medio dell'efficienza e della produttività del dispositivo dopo un lungo periodo, e quello di ottimizzarne il consumo per garantire il suo funzionamento e la sua gestione nel tempo [25].

La simulazione ha lo scopo di realizzare una sequenza casuale di valori di irraggiamento solare in un determinato luogo, rispondenti, in media e varianza, ai dati reali osservati. Le catene di Markov sono lo strumento impiegato dal modello, in quanto si rivelano particolarmente indicate per realizzare la caratteristica dei dati *senza memoria*. Infatti, numerosi studi statistici disponibili sfruttano le catene di Markov come elemento stocastico [26, 32, 29, 21]. Le proprietà di tale componente matematico si individuano bene nelle caratteristiche della meteorologia, tra cui l'irraggiamento solare, contribuendo quindi alla predizione simulata di valori futuri [25].

L'impiego di sequenze di dati osservati fornisce una sola rappresentazione, basata essenzialmente su una realizzazione del processo aleatorio. Quali sarebbero i risultati se si adottasse un'altra serie con la medesima descrizione statistica? Qual è il panorama di risultati che possono essere ottenuti con altre sequenze climatiche uguali?

Studi di meteorologia e di predizione di sequenze climatiche hanno interessato molti ricercatori; Richardson, per primo, ha suggerito una sequenza sintetica di dati simulati che riflette la struttura stocastica del processo [26], ma in seguito [25, 19] è stato proposto il modello di Markov più accurato del modello analitico. Nonostante il modello di Markov si basi sulla probabilità di transizione da uno stato ad un altro (*cfr.* 1.2), è necessario che il processo aleatorio simulato presenti delle caratteristiche di media e varianza che siano congruenti con una possibile realizzazione del processo aleatorio in questione.

I dati reali del valore d'irraggiamento, espressi in W/m^2 , sono stati raccolti, ai fini del seguente elaborato, dalle misure effettuate dalle stazioni di rilevamento dell'ARPA (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale) del Veneto. In particolare si è fatto riferimento alla stazione di Teolo (PD) [3].

Si è consapevoli che il modello così ottenuto rispecchia le condizioni climatiche della zona, cioè un clima mediterraneo con specifiche condizioni e che in altre regioni è ragionevole aspettarsi valori e risultati differenti. Inoltre il modello è basato sulle osservazioni di una particolare stagione, e più

specificamente nel mese di maggio 2012; a causa dell'evoluzione climatica, è importante notare che l'irraggiamento orario, ma anche l'indice di chiarezza, cioè il rapporto tra la radiazione solare globale sulla superficie della terra e la radiazione extraterrestre al confine all'atmosfera¹, non sono costituiti soltanto da una variabile casuale stazionaria durante tutto l'anno, ma da una componente deterministica e una aleatoria. Lo studio delle fluttuazioni temporali è stato effettuato in un periodo relativamente breve dell'anno nel quale si è ipotizzata una non-variabilità dei parametri climatici. Tuttavia è da notare che, nel clima della zona, il tempo atmosferico è migliore in estate che in inverno e che, inoltre, durante il periodo freddo l'energia irraggiata è minore di quella che si può registrare nel periodo estivo.

Le rilevazioni disponibili sono un campione rappresentante la media oraria della radiazione solare, raccolto durante tutto l'arco della giornata. Il modello presentato, invece, simula i valori con una frequenza di 10 campioni al minuto, cioè un campione ogni 6 secondi. Le informazioni circa il comportamento dell'irraggiamento, in intervalli temporali di 6 secondi, sono state ottenute da alcuni campioni misurati sperimentalmente per un periodo di 20 minuti. L'analisi dei dati raccolti della stazione di rilevamento dell'ARPA, assieme alle ultime misure, ha permesso di ottenere l'andamento statistico completo del modello.

Tra le varie fonti energetiche ambientali, l'energia solare, anche se influenzata dalle condizioni meteo, è la più conosciuta e sfruttata, grazie anche alla maggiore densità di potenza rispetto ad altre fonti rinnovabili [34]. Anche in ambienti poco illuminati, come all'interno di una abitazione, le fonti luminose artificiali possono essere sufficienti ad alimentare piccoli dispositivi a basso consumo, basti pensare alle calcolatrici tascabili, ma, più all'avanguardia e d'interesse per questa tesi, i componenti delle reti di sensori. Nella progettazione del più semplice dispositivo Energy-Harvesting non si può trascurare il problema di ottimizzare la raccolta di energia, specialmente quando è richiesta la massima efficienza ed una lunga durata della batteria [5, 21]. Tale problema si traduce nell'inseguimento del punto di massima potenza (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) estratto dalla fonte di energia, in questo caso la cella solare [22]. È da tener presente che il lavoro svolto dall'MPPT non è solo applicabile ai pannelli solari, ma trova impiego nelle turbine eoliche e marine, sia in grande che in piccola scala. Il punto di massima potenza (MPP) è la condizione di carico collegato alla cella, tale per cui la potenza trasferita (cioè il prodotto $P = V \cdot I$) è massimizzata per un dato

¹Esso assume valori compresi tra 0,9 in condizioni ottimali e quasi 0 in condizioni di cielo coperto. La media mensile è compresa nell'intervallo 0,3-0,8.

livello d'irraggiamento. È evidente che, nella situazione delle celle fotovoltaiche, l'andamento del livello d'irraggiamento, e quindi l'energia prodotta, non sia costante; ecco che i dati d'irraggiamento simulati si possono applicare praticamente per testare l'efficienza di un sistema MPPT [13, 10, 15].

Nel presente lavoro si è simulato un semplice algoritmo d'inseguimento del punto di massima potenza, tale da poter esser testato con i valori d'irraggiamento riprodotti artificialmente.

Capitolo 1

Descrizione del modello di Markov

Il modello di Markov, formulato dal matematico russo Andrei Andreyevich Markov, è uno strumento matematico nel quale la probabilità che si verifichi un certo evento futuro è unicamente determinata dallo stato attuale [7]. Le catene di Markov sono un processo stocastico, chiamato processo markoviano, caratterizzato dalle proprietà di Markov. Possiamo individuare due tipi di processi markoviani, a tempo discreto e a tempo continuo, quest'ultimi sono meglio conosciuti come *processo di nascita e morte*, e rappresentano un elemento fondamentale della teoria delle code. Nel modello di seguito presentato ci si riferisce, invece, solamente al sistema a tempo discreto.

1.1 Catene di Markov a tempo discreto

Sia $X(nT)$, con $n \in \mathbb{N}$, ed in seguito indicato con X_n , un processo aleatorio a tempo discreto che assume valori in uno spazio di stato finito \mathbb{S} . T rappresenta l'intervallo di tempo ogni quanto si verifica una transizione di stato.

Definizione 1. Un processo aleatorio a tempo discreto è un *processo di Markov* se possiede le proprietà di Markov, cioè se, per ogni intero k , per ogni sequenza ordinata di istanti di tempo $n_0 < n_1 < \dots < n_k$ e per ogni insieme $\{\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_k\}$, con $\sigma_i \in \mathbb{S}$, vale:

$$P[X_{n_k} = \sigma_k | X_{n_{k-1}} = \sigma_{k-1}, \dots, X_{n_0} = \sigma_0] = P[X_{n_k} = \sigma_k | X_{n_{k-1}} = \sigma_{k-1}]$$

dove $P[X_{n_k} = \sigma_k | X_{n_{k-1}} = \sigma_{k-1}]$ rappresenta la probabilità di transizione a tempo $k - 1$ dallo stato σ_{k-1} allo stato σ_k .

È possibile interpretare la precedente definizione considerando che l'istante temporale attuale sia identificato da n_{k-1} , quindi gli istanti precedenti siano n_0, n_1, \dots, n_{k-2} e l'istante immediatamente successivo sia n_k ; la sola conoscenza dello stato σ_{k-1} è sufficiente per riassumere la storia passata del processo e predire lo stato futuro. La proprietà di Markov è dunque quella di associare tutte le informazioni degli eventi passati del processo all'unico stato attuale, responsabile dell'evoluzione successiva.

Per completezza è comunque opportuno sottolineare che lo stato futuro di una catena di Markov può non dipendere univocamente dallo stato presente. Si può parlare di *ordine della catena* per indicare il numero di passi temporali precedenti dai quali dipende lo stato futuro; nella definizione precedente, ad esempio, si parla di catena di Markov del primo ordine, perché lo stato futuro dipende solamente dallo stato presente. Si può inoltre dimostrare come sia comunque sempre possibile ricondursi da una catena di ordine superiore ad uno, ad una catena del primo ordine.

1.2 Probabilità di transizione delle catene di Markov

In relazione a quanto sopra illustrato, lo stato futuro di un processo di Markov dipende unicamente dallo stato attuale. Sia allora $X_n = i$ lo stato attuale e $X_{n+k} = j$ lo stato dopo k passi, con i, j appartenenti all'insieme degli stati. La probabilità condizionata $P[X_{n+k} = j | X_n = i]$ è detta *probabilità di transizione in k passi* della catena di Markov. La probabilità di transizione dallo stato i allo stato j in k passi di una catena omogenea¹ è indicata con:

$$p_{i,j}(k) = P[X_{n+k} = j | X_n = i]$$

Etichettando gli stati $1, 2, \dots, n + 1$ possiamo riassumere tutte le probabilità di transizione, $p_{i,j}(k)$, in una matrice $\mathbf{P}(k)$, di dimensione $n \times n$, dove nella colonna j -esima e i -esima riga, si ha la probabilità di transizione dallo stato

¹Si verifica quando la probabilità di transizione dipende solamente dall'intervallo temporale k ed è tempo-invariante

1.2. PROBABILITÀ DI TRANSIZIONE DELLE CATENE DI MARKOV3

i allo stato j in k passi:

$$\mathbf{P}(k) = \begin{pmatrix} p_{1,1}(k) & \dots & p_{1,j}(k) & \dots & p_{1,n}(k) \\ p_{2,1}(k) & \dots & p_{2,j}(k) & \dots & p_{2,n}(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{i,1}(k) & \dots & p_{i,j}(k) & \dots & p_{i,n}(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n,1}(k) & \dots & p_{n,j}(k) & \dots & p_{n,n}(k) \end{pmatrix}$$

La matrice $\mathbf{P}(k)$, per $k = 1$, svolge un ruolo fondamentale nella teoria delle catene di Markov; essa, conosciuta come *matrice di transizione*, rappresenta la probabilità di transizione al passo immediatamente successivo. Si nota che, per soddisfare gli assiomi di uno spazio di probabilità, è necessario che la somma degli elementi di ogni riga sia pari a 1. Inoltre, nella diagonale principale della matrice, si legge le probabilità di rimanere nello stesso stato.

Due importanti proprietà delle catene di Markov a tempo discreto, sfruttate durante lo sviluppo del modello presentato, sono le seguenti:

Proposizione 1 (Tempo di soggiorno in uno stato). *I tempi di soggiorno, s_j , di una catena di Markov a tempo discreto, in uno stato $j \in S$, sono dei vettori aleatori indipendenti e identicamente distribuiti, con una distribuzione geometrica di parametro*

$$1 - p_{j,j}$$

con funzione di probabilità

$$\mathbb{P}_{s_j}(k) = (1 - p_{j,j})p_{j,j}^k$$

e media

$$m_{s_j} = \frac{1}{1 - p_{j,j}}$$

Questa affermazione informa circa la probabilità di rimanere nello stesso stato prima di spostarsi in un altro.

Proposizione 2 (Equazione di Chapman-Kolmogorov). *Per ogni coppia di interi positivi n, k , e per $i, j \in S$ vale:*

$$p_{i,j}(n+k) = \sum_{s=0}^n p_{i,s}(n) p_{s,j}(k)$$

che fa assumere la forma matriciale:

$$\mathbf{P}(n+k) = \mathbf{P}(n)\mathbf{P}(k)$$

in modo equivalente, nota la matrice nello stato n , dopo k passi si avrà:

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{P}^k$$

L'equazione di Chapman-Kolmogorov ci fornisce l'utile informazione circa le probabilità di trovarsi negli stati indicati dalla matrice \mathbf{P} dopo k passi. In altre parole, la conoscenza delle probabilità iniziali $\mathbb{P}(0)$ e della matrice di transizione \mathbf{P} , permette di determinare il vettore di probabilità di stato in ogni istante temporale, nel seguente modo:

$$\mathbb{P}(k) = \mathbb{P}(0)\mathbf{P}(k)$$

1.2.1 Diagramma delle transizioni

È possibile rappresentare la matrice delle transizioni \mathbf{P} tramite un grafico detto *diagramma delle transizioni*. Quest'ultimo è costituito da un grafo in cui i nodi rappresentano i singoli stati e gli archi, orientati ed etichettati con la probabilità, indicano le possibili transizioni.

Per esempio, consideriamo la matrice:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/4 & 0 & 1/4 \\ 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

ad essa corrisponde il seguente grafico:

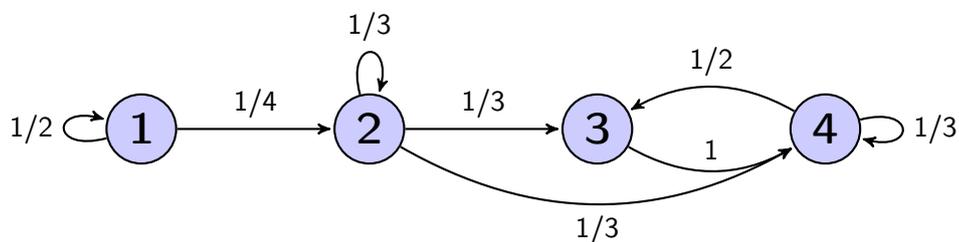


Figura 1.1: Diagramma delle transizioni relativo alla matrice \mathbf{P}

1.2.2 Cammini aleatori

Una particolare struttura della matrice di transizione \mathbf{P} è impiegata per costruire i cammini aleatori. Un cammino aleatorio è un processo markoviano nel quale le transizioni possono verificarsi solamente tra gli stati adiacenti; ad esempio, se lo stato attuale è i , i possibili stati successivi sono solamente i , $i + 1$ oppure $i - 1$; le transizioni tra quelli non adiacenti non sono possibili in un solo passo. Allora, detta $r_i = p_{i,i+1}$ la probabilità di andare nello stato $i + 1$, $p_i = p_{i,i}$ la probabilità di rimanere nello stesso stato, e $q_i = p_{i,i-1}$ la probabilità di andare in $i - 1$, si ottiene che la matrice \mathbf{P} è così costruita ²:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & r_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ q_2 & p_2 & r_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_3 & p_3 & r_3 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & q_n & p_n \end{pmatrix}$$

Le matrici con questa struttura ben si adattano a rappresentare una situazione nella quale si vuole simulare la disponibilità energetica, come ad esempio, l'irraggiamento solare [29].

²Si noti che $r_i + p_i + q_i = 1$

Capitolo 2

Descrizione dell'irraggiamento solare

La radiazione solare è l'energia radiante emessa nello spazio interplanetario dal sole, generata dalle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel nucleo solare e che producono radiazioni elettromagnetiche a varie frequenze, le quali si propagano poi nello spazio circostante [11]. La Terra riceve dal sole 1366 W/m^2 [34]; tale quantità è il valore massimo d'irraggiamento diurno che si può misurare sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre e comprende la somma di tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico emesso. Questa energia viene ricevuta in prossimità del suolo in modo ridotto a causa dell'atmosfera; quest'ultima, come qualsiasi corpo, riflette, diffonde ed assorbe i raggi incidenti. La quantità di energia che raggiunge il suolo dipende da diversi fattori [33], e principalmente:

- dall'inclinazione della superficie e dalla posizione geografica
- dall'ora del giorno e dalla stagione
- dalle condizioni meteorologiche, presenza o meno di nuvole e indice di limpidezza

dove i primi due fattori sono una componente deterministica del fenomeno mentre l'ultimo è una condizione puramente aleatoria.

2.1 Componente deterministica

Nello studio effettuato, tramite il quale si vogliono simulare i valori d'irraggiamento in una giornata, la componente deterministica è stata sintetizzata assumendo che l'inclinazione della superficie (come per esempio la

superficie di un pannello solare) sia costante e non variabile durante il giorno e, poiché i dati rilevati si riferiscono ad una stazione meteo fissa, che la posizione geografica rimanga immutata. Si è ipotizzato poi, che nel periodo di rilevamento dei dati, maggio 2012, non si verificano variazioni sensibili a causa della diversa inclinazione dell'asse terrestre rispetto al sole [9, 30, 24].

Per quanto riguarda invece la quantità irradiata in funzione dell'ora della giornata è necessario assumere una notevole semplificazione. Astrofisici e geologi si sono interessati a presentare una formula dettagliata per esprimere la potenza irradiata sulla superficie dell'atmosfera [2, 34]; la radiazione luminosa è rappresentabile matematicamente mediante la seguente formula:

$$P = \frac{86400G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{2n\pi}{365}\right)\right) (\cos \psi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \psi \sin \delta)$$

dove G_{sc} è la potenza irradiata dal sole in prossimità della superficie atmosferica, n rappresenta un giorno dell'anno, ψ è la latitudine, δ è la declinazione e ω_s è l'angolo al tramonto. Tale descrizione risulta fin troppo dettagliata per l'obiettivo di questo elaborato; allora, sia in forma sperimentale, dalle osservazioni dei dati di riferimento, sia in modo analitico, a fronte della semplificazione delle formule sopra citate, si può utilizzare la funzione $\sin^2(\pi t)$, con $0 < t < 1$, al fine di ottenere un andamento molto prossimo alla situazione reale.

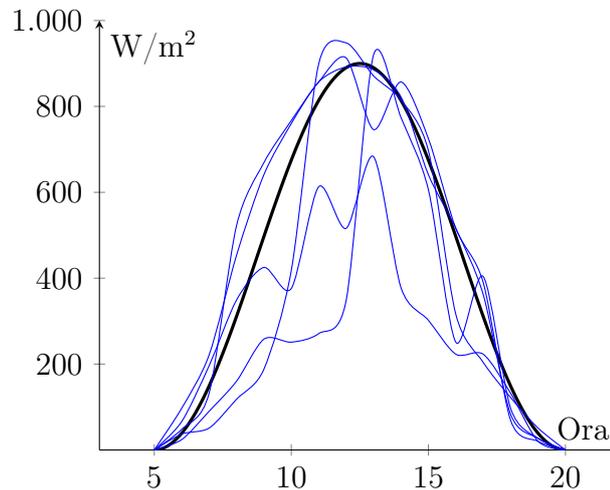


Figura 2.1: Valori d'irraggiamento solare in funzione dell'ora

Il grafico qui rappresentato mostra l'andamento della funzione $\sin^2(\pi \frac{t-5}{15})$, nel dominio orario $t \in [5..20]$, in nero, mentre in colore blu, sono riportati

i valori d'irraggiamento registrati in 5 giornate (1,2,3,4,5 di maggio 2012). Anche se a livello solo intuitivo, considerata la somiglianza tra le curve, si può ritenere che l'approssimazione introdotta rappresenti con sufficiente bontà l'andamento deterministico della quantità di energia radiata dal sole.

2.2 Componente aleatoria

La componente stocastica del processo aleatorio può essere rappresentata con una distribuzione di probabilità normale, interpretando così la variabilità come un rumore bianco gaussiano; per rumore gaussiano bianco si intende un segnale descritto da una variabile aleatoria con distribuzione gaussiana, a valore medio nullo e varianza che corrisponde alla potenza del disturbo. Tuttavia, nessuno studio ha impiegato questo approccio, poiché non tiene conto delle diverse tipologie di giornata. Con ciò si intende che, noti i valori medi per una certa ora del giorno, non è possibile ottenere giornate nelle quali si rileva, per esempio, una bassa insolazione, in quanto queste risulterebbero mediamente dello stesso tipo.

Il modello che si presenta impiega le catene di Markov per ottenere un andamento casuale della variabilità climatica [25]. In particolare si impiegano due catene: la prima genera una sequenza di 15 situazioni, una per ogni ora diurna¹, mentre la seconda produce il dettaglio orario, ottenendo così 600 valori d'irraggiamento in un'ora. Come nella quasi totalità degli studi, la stima dei parametri delle matrici è stata dedotta dallo storico dei dati disponibili e dalle rilevazioni sperimentali [30, 20, 25]; così facendo, è possibile confrontare i dati simulati con il reale andamento climatico e validare l'attendibilità del modello. La seguente tabella [1] fornisce una stima dell'irraggiamento solare

¹Questo perché nell'intervallo temporale studiato si registrano 15 ore di luce.

in relazione alle condizioni climatiche e all'indice di limpidezza:

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m ²	600 W/m ²	500 W/m ²	400 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	100 W/m ²	50 W/m ²
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Figura 2.2: Irraggiamento in funzione dell'indice di chiarezza

Si definisca la prima catena *catena tipologia d'irraggiamento* (\mathbf{T}_i), composta dai seguenti quattro stati, *sole pieno*, *variabilità*, *nuvolosità*, *bassa radiazione* caratterizzati per:

- **sole pieno (S)**: ora in cui l'irraggiamento è massimo e l'indice di limpidezza è alto; la media è ai valori massimi (oltre 800 W/m² alle ore 12) e la varianza è bassa (± 50 W/m²).
- **variabile (V)**: ora in cui l'irraggiamento è molto alternante, come si può registrare in giornate con nuvolosità sparsa e composte da nuvole e schiarite; i valori medi sono alti (600 W/m² a mezzogiorno), ma la varianza è molto elevata (± 150 W/m²).
- **nuvoloso (N)**: ora in cui l'irraggiamento è basso, tipico di quei periodi in cui il cielo è coperto; i valori medi sono bassi (400 W/m² nell'ora più luminosa) e la varianza è media (± 80 W/m²).
- **bassa radiazione (B)**: ora in cui l'irraggiamento è molto scarso e quasi assente, come si può registrare durante una pioggia o un temporale, il cielo è molto coperto con una nuvolosità fitta; la media è ai valori minimi (non superiore a 150 W/m²) e la varianza bassa (± 30 W/m²).

È da tener presente che media e varianza dell'irraggiamento sono in funzione dell'ora della giornata, e che il valore riportato nella descrizione si riferisce a quello massimo registrato alle ore 12. La matrice di transizione

che rappresenta il processo Markoviano appena descritto è la seguente:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \end{pmatrix}$$

la cui rappresentazione grafica è:

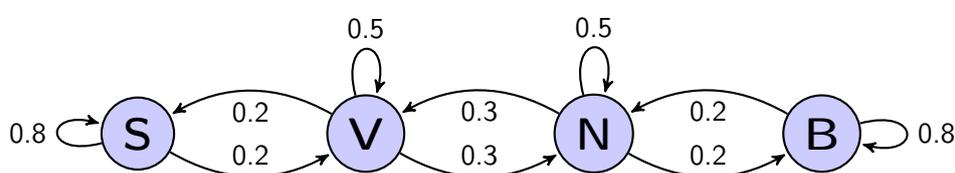


Figura 2.3: Diagramma delle transizioni della matrice \mathbf{P}

Ci sono due importanti osservazioni da evidenziare sulla struttura di questa matrice. Si è assunto che, in un'ora, sia possibile spostarsi solamente nello stato adiacente, verificando quindi la condizione dei cammini aleatori. In pratica non sono possibili transizioni, in un solo passo, dallo stato $S \rightarrow N, B$, da $V \rightarrow B$, da $N \rightarrow S$ e da $B \rightarrow V, S$. Inoltre la catena così costruita è aperiodica ed irriducibile con probabilità asintotica di $1/4$ per ogni stato².

Tale deduzione è stata tratta dalle statistiche meteorologiche dagli anni 2000 ad oggi [17]; infatti si sono registrate le frequenze medie delle tipologie di giornate e, dividendo per il numero di giorni in un mese, si è ottenuta la probabilità di ogni situazione. Questa operazione ha prodotto i seguenti risultati:

- **Sole:** 8,1 giorni $\Rightarrow Prob[\text{sole}] = 0,26$
- **Variabile:** 7,8 giorni $\Rightarrow Prob[\text{variabile}] = 0,25$
- **Nuvoloso:** 6,3 giorni $\Rightarrow Prob[\text{nuvoloso}] = 0,21$
- **Basso irraggiamento:** 8,8 giorni $\Rightarrow Prob[\text{basso irragg.}] = 0,28$

²Si ricorda che si definisce distribuzione asintotica di probabilità per una catena di Markov aperiodica e irriducibile il limite di $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}(0)\mathbf{P}(n)$ se esiste.

Si osserva che, essendo all'incirca equiprobabili i possibili andamenti climatici, l'assunzione fatta per la matrice \mathbf{P} è corretta; infatti il comportamento asintotico di \mathbf{P}^n è pari a $1/4 = 0,25$ per ciascun stato.

La seconda catena di Markov impiegata nella simulazione, che viene qui chiamata *catena dei livelli d'irraggiamento* (\mathbf{V}_i), è composta da 20 stati rappresentanti ciascuno un valore d'irraggiamento. Tali valori sono equidistribuiti in modo discreto nell'intervallo $0 \sim 1000 \text{ W/m}^2$, in modo che allo stato 1 della catena corrisponda la potenza irradiata nell'intervallo $0 \sim 50 \text{ W/m}^2$, allo stato 2 corrisponda la potenza di $50 \sim 100 \text{ W/m}^2$, e così via fino allo stato 20, in cui si ha $950 \sim 1000 \text{ W/m}^2$ [20].

Per ogni stato della *catena tipologia d'irraggiamento* è stata costruita una matrice ³ di dimensione 20×20 , e quindi anche una catena, che rappresenti i valori d'irraggiamento in quella particolare condizione atmosferica. Infatti, per rispettare le caratteristiche climatiche è necessario che asintoticamente la matrice di transizione, \mathbf{P}^n , presenti una particolare struttura. Anche quest'ultima matrice presenta le caratteristiche del *cammino aleatorio*, rendendo possibile una transizione al passo successivo solamente tra i valori d'irraggiamento adiacenti. Le quattro matrici ottenute hanno le seguenti caratterizzazioni

- Matrice irraggiamento *Sole*: presenta un andamento asintotico tale per cui i valori di radiazione alti (tra $700\text{-}1000 \text{ W/m}^2$) sono più probabili così ottenendo la distribuzione di probabilità di stati:

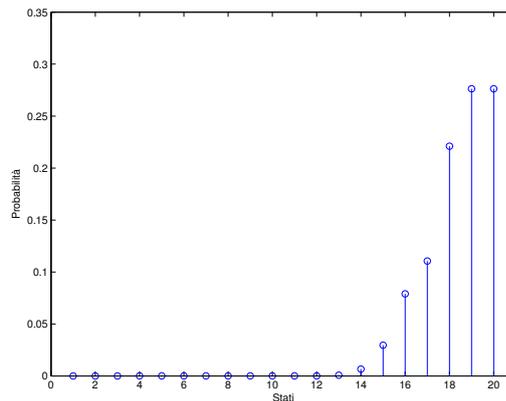


Figura 2.4: Probabilità asintotica - Matrice d'irraggiamento *sole*

³Le matrici sono riportate in appendice

- Matrice irraggiamento *Variabile*: presenta asintoticamente i valori di probabilità circa omogenei nei valori centrali della catena (stati 13-15, 600-700 W/m²), ma, proprio per la caratterizzazione di una condizione climatica variabile, è significativa anche la probabilità di trovarsi negli stati indicanti quantità di energia irraggiata medio-alta (stati 16-17, 750-850 W/m²) e media (stati 8-12, 400-550 W/m²).

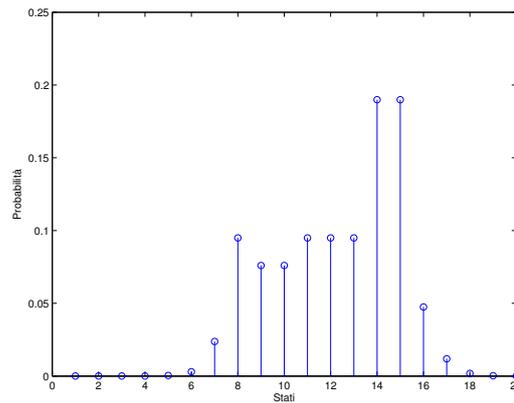


Figura 2.5: Probabilità asintotica - Matrice d'irraggiamento *variabile*

- Matrice irraggiamento *Nuvoloso*: si caratterizza per probabilità asintotiche nei valori bassi di radiazione solare, con un massimo di probabilità del $\sim 0,4$ nello stato 7 (corrispondente a 350 W/m²). La distribuzione che si ottiene è:

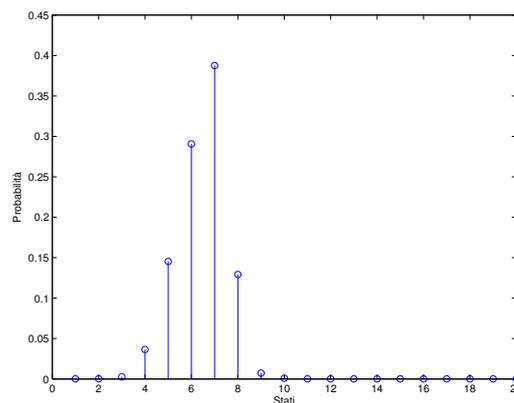


Figura 2.6: Probabilità asintotica - Matrice d'irraggiamento *coperto*

- Matrice irraggiamento *Basso radiazione*: presenta alta probabilità di permanenza degli stati iniziali della catena (2-6, corrispondenti a 100-300 W/m²), in particolare in 3 con una media irraggiata di 150 W/m². La distribuzione asintotica ottenuta è

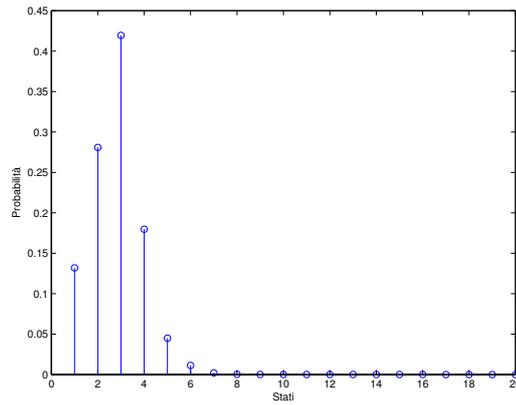


Figura 2.7: Probabilità asintotica - Matrice d'irraggiamento *basso irraggiamento*

Capitolo 3

Dati simulati in MATLAB. Osservazioni

Per simulare i valori d'irraggiamento nell'arco della giornata è stata implementata una funzione MATLAB che genera una sequenza di 9000 campioni, ciascuno rappresentante un livello d'irraggiamento. Ogni campione rappresenta il valore medio d'irraggiamento, espresso in W/m^2 , in un intervallo temporale di 6 secondi. L'algoritmo sfrutta le informazioni dalla matrice di *tipologia d'irraggiamento* \mathbf{T}_i al fine di ottenere una sequenza di 15 situazioni meteorologiche, ciascuna delle quali corrispondente alle 15 ore di luce giornaliere, e le matrici dei *livelli d'irraggiamento* \mathbf{V}_i per stimare i singoli campioni. Se si considerano contemporaneamente le quattro matrici dei livelli d'irraggiamento (sole, variabile, nuvoloso, basso irraggiamento), si può assumere che la matrice della *tipologia d'irraggiamento* esprima la probabilità di transizione tra le altre quattro matrici - quelle dei *livelli d'irraggiamento* - nell'intervallo orario.

Per ricavare una sequenza casuale di valori secondo le caratteristiche di un processo markoviano si è fatto uso della funzione `markov.m` [16]; quest'ultima richiede come parametri d'ingresso la matrice di transizione \mathbf{T} , lo stato iniziale s_0 e il numero di passi di simulazione N . I passi che la procedura adotta per simulare i dati possono esser sintetizzati come segue:

1. Viene estratto casualmente con probabilità uniforme (tra le possibilità sole, variabile, nuvoloso, basso irraggiamento) la prima tipologia d'ora di irraggiamento, s_0 ; questo perché si è assunto che la prima ora della giornata abbia un andamento casuale e non dipenda da altri fattori al fine delle simulazione¹.

¹È possibile estendere e migliorare l'algoritmo in modo da prevedere un andamento mensile o annuale, ma ciò esula dallo scopo del modello giornaliero presentato.

2. La funzione `markov.m` genera una sequenza markoviana di 15 valori, indicati con Y_k con $k = 1, 2, \dots, 15$, che a partire dallo stato iniziale s_0 , determinato in 1, e seguendo le probabilità della matrice di *tipologia d'irraggiamento* \mathbf{T}_i , rappresentano le quattro condizioni atmosferiche delle 15 ore luminose diurne.
3. Per ogni ora, cioè per ogni valore della sequenza Y_k trovata in 2, viene generata una seconda serie I_n con $n = 1, 2, \dots, 600$ che rappresenta i 600 valori d'irraggiamento nell'arco della singola ora. Anche la serie I_n è generata dalla funzione `markov.m`, nella quale i parametri d'ingresso sono la matrice \mathbf{V}_i corrispondente allo stato attuale della catena Y_k e l'ultimo livello (valore) d'irraggiamento nell'ora precedente $Y_{k-1}[I_{600}]$, dove $k > 0$; diversamente si assume che, nella prima ora della giornata, $l = 1$ cioè il livello più basso d'irraggiamento;
4. Ciascun campione d'irraggiamento raccolto nelle sequenze I_n , viene adattato secondo la componente deterministica del processo aleatorio, cioè rispetto alla funzione $\sin^2(\pi \frac{t}{9000})$.

I singoli valori di potenza radiata son rappresentabili dalla seguente funzione:

$$P_t = Y_k[I_n] \sin^2(\pi \frac{t}{9000}) + v_{k,n}$$

dove $t = 0, 1, \dots, 9000$, $Y_k[I_n]$ rappresenta l'intera sequenza (cioè 9000 campioni) dei livelli d'irraggiamento e $v_{k,n}$ è rumore gaussiano bianco additivo e dipendente da $Y_k[I_n]$.

L'impiego del rumore bianco additivo è motivato dal fatto che nell'arco di 6 secondi, passo di campionamento del processo, si assume che l'irraggiamento sia costante; inoltre, essendo discreta la suddivisione dell'intervallo della potenza irraggiata (la catena di Markov \mathbf{V}_i è composta da 20 stati discreti con ampiezza corrispondente a $50W/m^2$), è necessario che i campioni presentino medie lievemente differenti e non costanti al fine di rendere più realistico il processo.

3.1 Risultati di alcune simulazioni

I valori simulati vengono rappresentati in un grafico dove, sull'asse delle ascisse, è riportato l'intervallo orario individuato dai 9000 campioni, ed in ordinate, i valori d'irraggiamento espressi in kW/m^2 .

Ogni simulazione genera una tipologia di giornata differente e non prevedibile a priori; in seguito vengono riportate alcune simulazioni ritenute particolarmente significative e ottenute con particolari sequenze.

Confronto delle tipologie d'irraggiamento

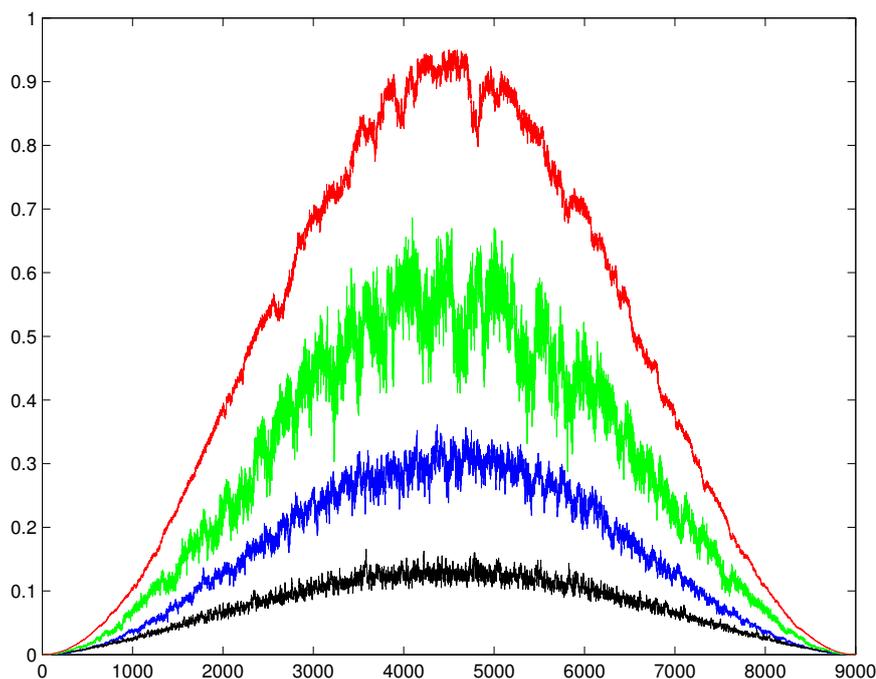


Figura 3.1: Confronto tipologie d'irraggiamento

Nella figura soprastante è raffigurato l'andamento ipotetico di quattro giornate, ciascuna rappresentata da una curva di colore diverso. Questo grafico è significativo perché permette di confrontare le 4 *tipologie d'irraggiamento*: la curva rossa rappresenta il possibile andamento di una giornata in cui l'irraggiamento è sempre massimo, la curva verde descrive una giornata con insolazione variabile, quella blu una giornata completamente nuvolosa ed infine, la condizione con irraggiamento basso è individuata dalla curva nera. È da tener presente che, poiché una simulazione arbitraria mescolerebbe le quattro caratteristiche, i quattro andamenti qui riportati sono stati indotti modificando l'algoritmo, al fine di ottenere la situazione climatica costante. Si osserva però come, nelle fasce orarie di alba e tramonto, la radiazione so-

lare sia scarsa e con varianza ridotta per tutte e quattro le situazioni, mentre le ore centrali della giornata sono molto diversificate dai fattori atmosferici e dall'indice di limpidezza. Il confronto delle curve permette di notare la varianza dei quattro processi; per esempio, si osserva che nella condizione di variabilità, a seguito dell'alternanza di periodi con luminosità accentuata seguiti da altri con insolazione ridotta, sono più frequenti e marcate le oscillazioni del valore medio rispetto alle altre situazioni meteorologiche; infatti, per come è stata costruita la matrice di transizione per questo tipo d'irraggiamento, le probabilità di transizione, tra gli stati adiacenti della catena di Markov, sono molto più accentuate rispetto alle altre situazioni, ed inoltre, la varianza, introdotta dal rumore bianco gaussiano, è più marcata, rendendo così il processo oscillatorio.

Giornata con irraggiamento pieno

Si propone ora un confronto tra una simulazione e una misura reale dell'irraggiamento in una giornata di piena radiazione. Il grafico sotto riportato rappresenta una situazione artificiale, in cui la curva rossa raffigura i campioni d'irraggiamento e la curva blu la media oraria.

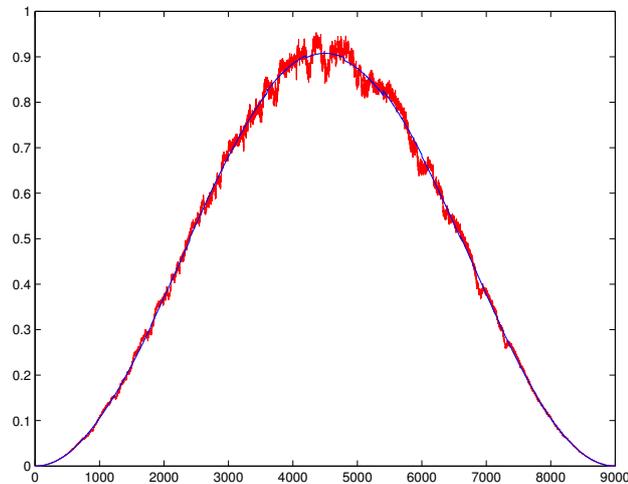


Figura 3.2: Giornata con pieno irraggiamento

Se si confrontano i valori medi di ogni singola ora con le medie dei dati reali² nelle stesse condizioni meteo, si osservano le seguenti corrispondenze

²I dati si riferiscono alla media mensile di maggio 2012 delle giornate con piena insolazione

tra rilevazioni e simulazioni:

Irraggiamento pieno - Confronto dati reali e simulati		
Ora	Media reali W/m ²	Media simulati W/m ²
5	13,3	11,9
6	43,1	81,1
7	157,8	221,1
8	328,7	389,6
9	524,6	582,0
10	712,5	746,1
11	859,3	869,5
12	939,7	905,5
13	919,9	891,6
14	854,4	851,6
15	790,2	776,7
16	680,2	621,9
17	379,1	399,2
18	323,0	294,4
19	76,2	89,3
20	20,2	13,2

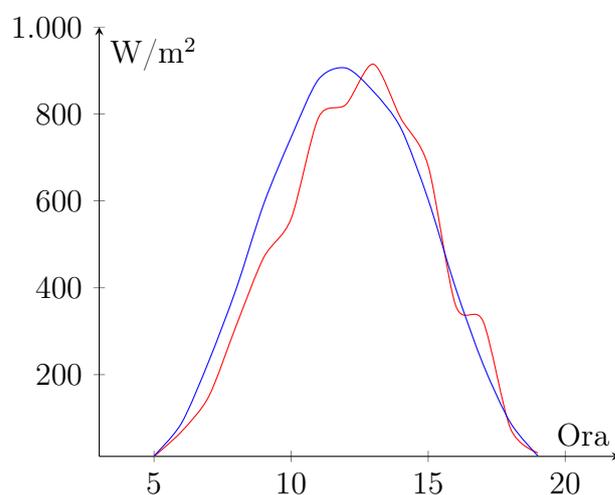


Figura 3.3: Giornata soleggiata - Confronto dati reali e simulati

La curva rossa rappresenta la media oraria dei valori d'irraggiamento misurati nelle giornate soleggiate, mentre la curva blu è la media di 10 simulazioni caratterizzate da massimo irraggiamento.

Giornata con irraggiamento variabile

Si presenta una simulazione relativa ad una giornata con irraggiamento variabile, nella quale si ipotizza un'alternanza frequente di istanti luminosi e momenti con copertura nuvolosa. La varianza dei campioni è molto accentuata proprio per sottolineare una distribuzione oscillatoria; questo si riflette, nel grafico di seguito riportato, con valori di radiazione (rappresentati dalla curva rossa) che si discostano parecchio dal valore medio orario (raffigurato dalla curva blu). L'andamento deterministico è sempre individuato dalla funzione $\sin^2(\pi \frac{t}{9000})$, ma i singoli campioni, nelle ore centrali della giornata, si discostano dal valore medio anche di 100 W/m^2 nell'arco di 10 minuti (=100 campioni), perciò questo fenomeno può raffigurare il passaggio temporaneo di un addensamento nuvoloso. Anche in [31] si osservano dei campioni d'irraggiamento rilevati ogni minuto che presentano le stesse oscillazioni. Le medie orarie reali messe a confronto con quelle simulate, presentano un carattere perturbato, osservabile in più situazioni; questa deduzione conferma le ipotesi delle rapide variazioni della potenza irraggiata [30].

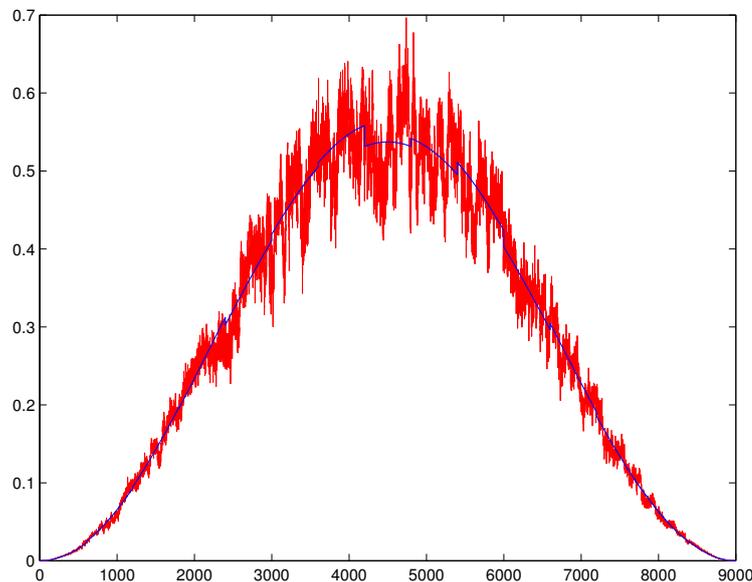


Figura 3.4: Giornata irraggiamento variabile

Irraggiamento variabile - Confronto dati reali e simulati		
Ora	Media reali W/m ²	Media simulati W/m ²
5	10,1	7,7
6	62,0	55,3
7	223,2	143,9
8	432,5	352,5
9	378,6	375,4
10	348,5	464,6
11	661,1	536,5
12	495,2	586,6
13	660,7	525,1
14	571,4	468,2
15	418,2	384,9
16	251,2	246,7
17	190,8	149,5
18	91,0	52,4
19	13,2	8,5
20	1,9	3,2

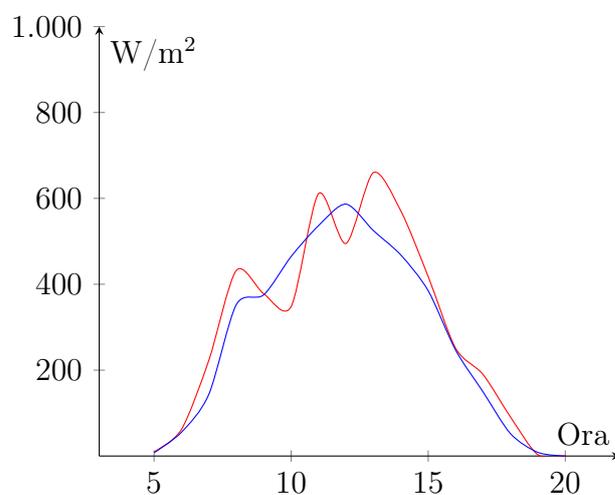


Figura 3.5: Irraggiamento variabile - Confronto dati reali e simulati

Giornata con nuvolosità

Il seguente grafico paragona le medie orarie d'irraggiamento nella situazione reale (curva rossa) e nella simulazione (curva blu). Notiamo che, rispetto alle situazioni finora presentate, i livelli di radiazione nelle ore centrali

della giornata si sono notevolmente ridotti; infatti, si registrano valori non superiori ai 400 W/m^2 ; la simulazione ben si adatta al reale andamento del fenomeno, con valori che non si discostano più del 10%.

Copertura nuvolosa - Confronto dati reali e simulati		
Ora	Media reali W/m^2	Media simulati W/m^2
5	14,2	4,5
6	90,0	29,3
7	125,6	76,0
8	181,4	137,2
9	281,7	197,2
10	271,8	258,0
11	278,5	289,6
12	334,6	315,1
13	320,7	297,1
14	277,4	254,9
15	158,1	197,0
16	104,6	138,0
17	83,7	76,0
18	62,3	30,8
19	3,3	4,5
20	0	0,2

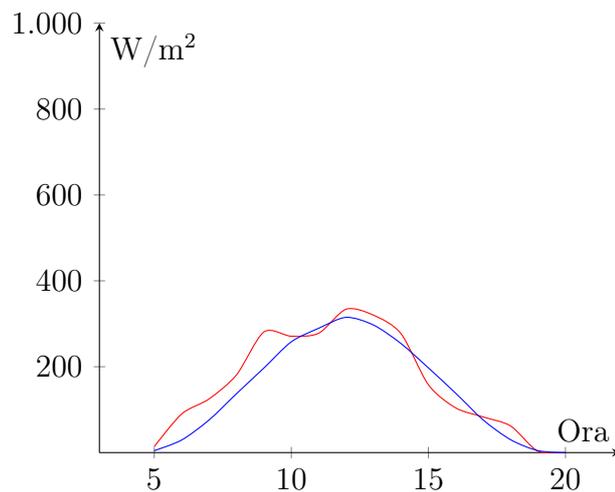


Figura 3.6: Copertura nuvolosa - Confronto dati reali e simulati

Il dettaglio per ogni singolo campione è raffigurato nel grafico seguente:

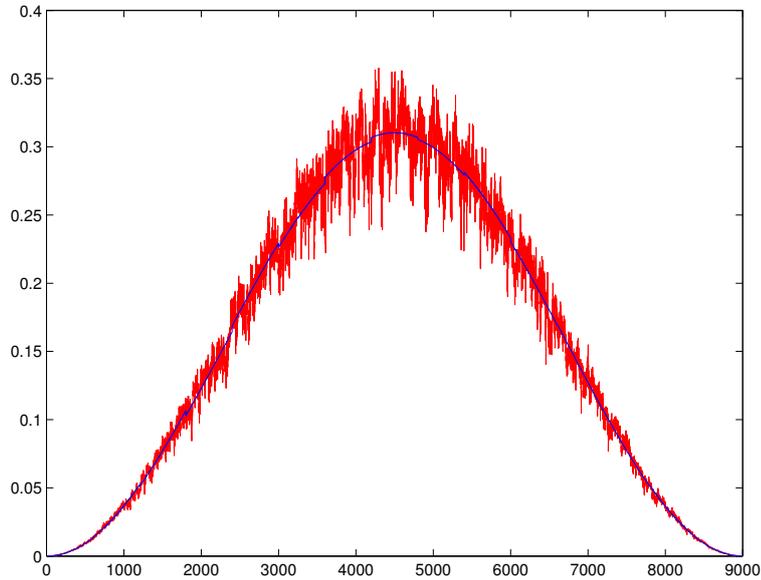


Figura 3.7: Confronto dati reali e simulati

Giornata con basso irraggiamento

Nelle giornate caratterizzate da scarso irraggiamento i valori medi di potenza radiata sono minimi; si nota infatti che, nei momenti di forte copertura nuvolosa, in presenza anche fenomeni piovosi e temporaleschi, si misurano valori massimi d'irraggiamento non superiori a 150 W/m^2 , ma sono possibili anche quantità inferiori a 100 W/m^2 . I dati simulati si adattano solo per quanto riguarda l'andamento medio, mentre tralasciano le oscillazioni che i dati reali presentano.

Copertura nuolosa - Confronto dati reali e simulati		
Ora	Media reali W/m ²	Media simulati W/m ²
5	8,1	5,0
6	56,5	22,3
7	101,3	46,0
8	191,9	71,2
9	97,0	94,3
10	55,7	112,0
11	41,3	124,6
12	51,6	128,0
13	112,7	124,1
14	148,2	113,2
15	25,1	92,4
16	97,2	70,2
17	48,2	45,6
18	12,3	23,1
19	1,5	4,5
20	0	0

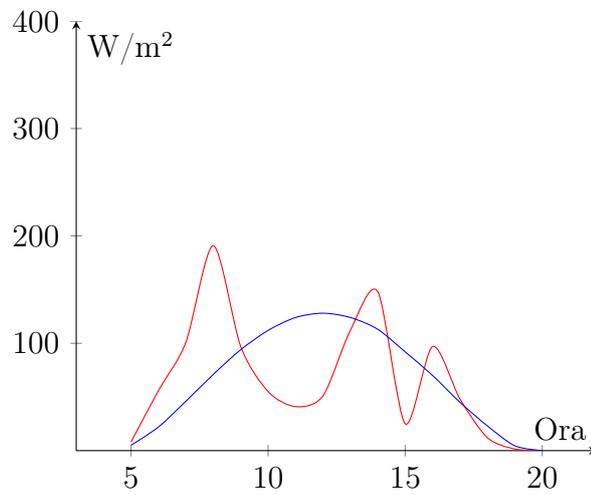


Figura 3.8: Basso Irraggiamento - Confronto dati reali e simulati

Si osserva che, nel grafico che segue che riporta il dettaglio dei singoli campioni, l'irraggiamento massimo non supera i 150 W/m^2 e, a causa delle copertura uniforme, la varianza è bassa, con valori che si discostano dalla media di $\pm 30 \text{ W/m}^2$.

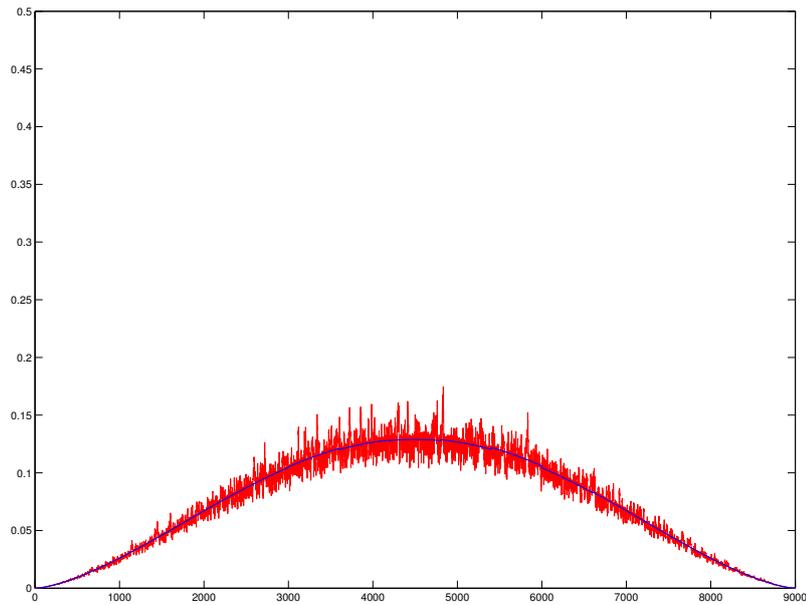


Figura 3.9: Giornata con basso irraggiamento

3.1.1 Simulazione casuale

La simulazione che segue rappresenta una possibile uscita dei valori simulati dall'algoritmo implementato.

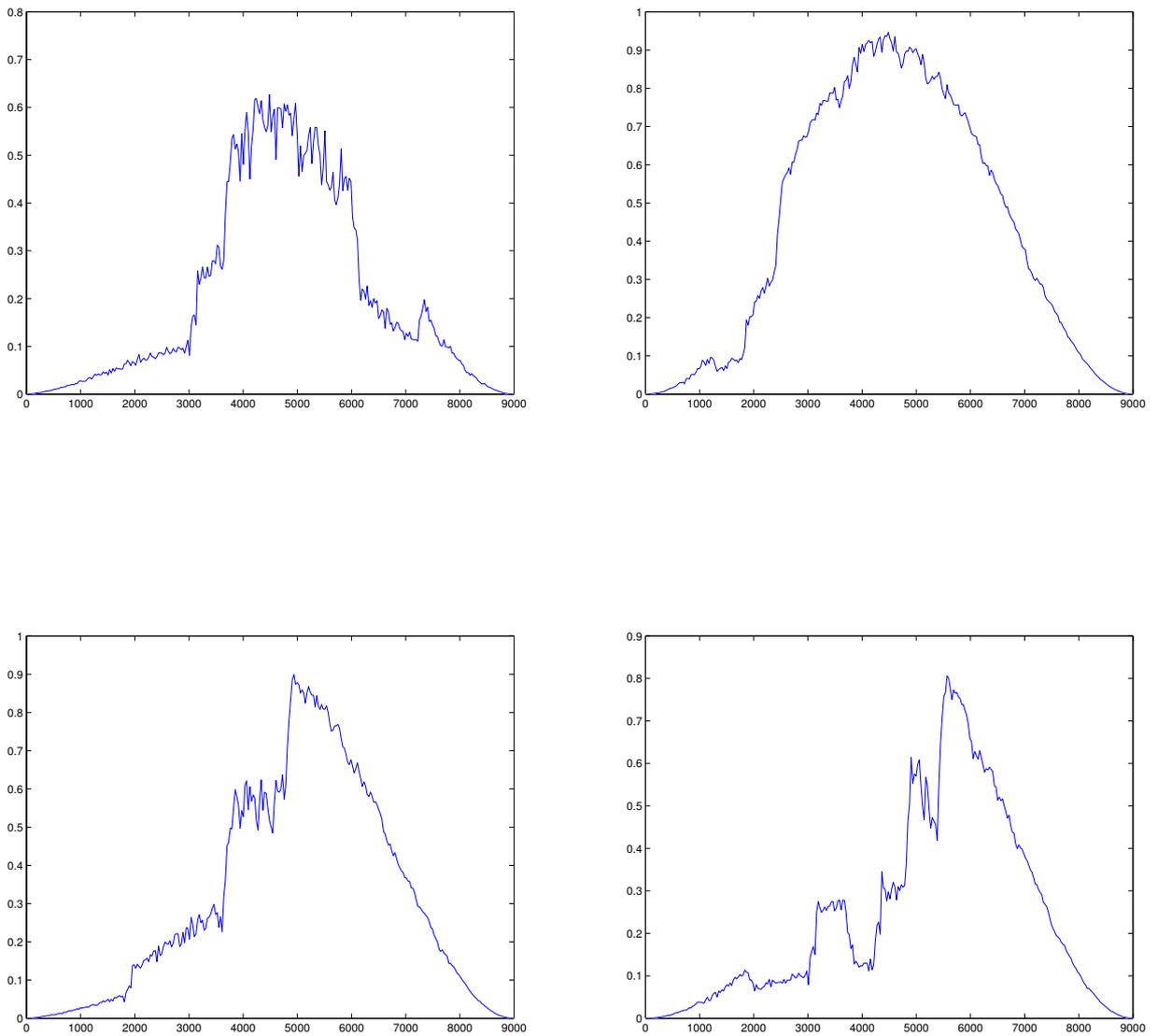


Figura 3.10: Simulazione casuale di quattro giornate

3.2 Analisi della varianza dell'irraggiamento

I dati forniti dalle stazione meteo dell'ARPA [3], forniscono solo una descrizione dell'irraggiamento con cadenza oraria. Nel modello presentato, la frequenza con cui vengono prodotti i campioni d'irraggiamento è di 6 secondi; per ottenere una stima della varianza del processo a questa frequenza, si sono effettuate delle misure sperimentali dell'irraggiamento per mezzo di una piccolo pannello fotovoltaico ricavato da una calcolatrice tascabile. Le misure sono state effettuate quattro volte nelle medesime condizioni climatiche³, e coprono un intervallo di 20 minuti e frequenza di campionamento ogni 6 secondi (200 valori totali). Secondo le ipotesi di non-variabilità delle condizioni climatiche nell'intervallo orario, si ottiene quindi una stima della varianza durante un breve periodo.

La grandezza misurata è la corrente che attraversa una resistenza di 3,3 k Ω ; questa scelta non è arbitraria, infatti, la corrente generata è direttamente proporzionale all'irraggiamento solare (*cfr.* 4.1).

I dati ottenuti sono riportati nella seguente tabella:

		Unità di Misura
Corrente Media	495,98	μA
Dev. St. Corrente	108,57	μA
Irraggiamento Medio	522	W/m ²
Coeff di conversione ⁴	0,95	
I_{SC}/G_{nom}		
Dev. St. Irraggiamento	103,02	W/m ²
Dev. St. Simulata	97,45	W/m ²

Si osserva che entrambe le descrizioni statistiche, sia dell'irraggiamento simulato, sia di quello reale, presentano all'incirca la stessa varianza, confermando quindi le assunzioni fatte.

³irraggiamento variabile dovuto a copertura nuvolosa e schiarite

⁴*cfr.* 4.1

Capitolo 4

Maximum Power Point Tracker - MPPT

Anche se la tecnologia per sfruttare l'energia solare esiste fin dal 1970, presenta ancora numerose sfide in gioco [22]. Grazie all'aiuto dato dell'inseguimento solare e della ricerca del punto di massima potenza (Maximum Power Point Tracker - MPPT), gli ingegneri sono al lavoro per affrontare l'obiettivo principale di migliorare l'efficienza dei sistemi a pannelli fotovoltaici.

4.1 Principio di funzionamento di una cella fotovoltaica

Le celle fotovoltaiche sono realizzate da una giunzione PN intrappolata all'interno di un wafer sottile di semiconduttore, come il silicio [31]. Al buio, la curva caratteristica della cella solare è molto simile all'andamento esponenziale tipico di un diodo. Alla luce, il comportamento cambia: i fotoni, con energia maggiore rispetto all'energia di gap di banda del semiconduttore, sono assorbiti in modo da creare una coppia elettrone-lacuna. Quest'ultime, sotto l'influenza del campo elettrico generato dalla giunzione PN, creano una corrente elettrica proporzionale alla quantità di energia irraggiata sulla superficie.

Il più semplice modello per descrivere una cella fotovoltaica è costituito da un generatore ideale di corrente I_L in parallelo ad un diodo e una resistenza di shunt R_{SH} , e, il tutto, in serie ad una resistenza R_S .

Osservando lo schema qui riportato, si nota fin d'ora che la corrente del generatore I_L dipende in modo lineare dalla quantità di energia irraggiata; infatti, in assenza di luce $I_L = 0$, perciò si ritrova un circuito composto da un

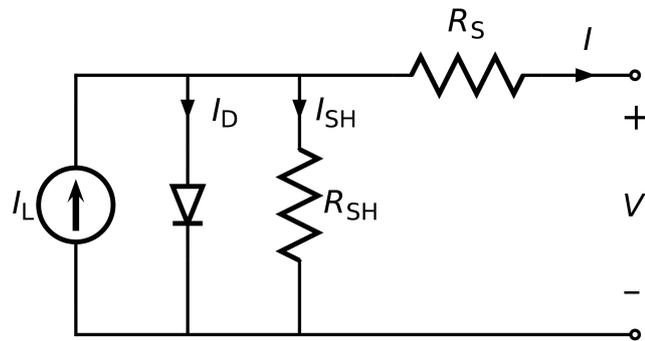


Figura 4.1: Modello equivalente cella fotovoltaica

diodo ed una resistenza che confermano la curva caratteristica del pannello fotovoltaico.

I principali fattori che influiscono sul funzionamento della cella sono la temperatura d'esercizio e le resistenze interne; infatti:

- la corrente di saturazione del diodo, I_0 , dipende dalla temperatura della giunzione;
- il generatore di corrente I_L ha una dipendenza dalla temperatura, oltre che dalla luce irraggiata;
- la resistenza serie R_S fornisce una approssimazione accurata del il punto di massima potenza e della tensione a circuito aperto;
- la resistenza di shunt R_{SH} migliora il comportamento del diodo ideale.

Il modello che viene adottato, al fine delle simulazione realizzata, sfrutta una semplice descrizione algebrica delle caratteristiche della cella fotovoltaica; le grandezze fisiche che si considerano, in funzione della temperatura, sono la corrente I_L e la corrente di saturazione I_0 . Si include nel modello la resistenza serie R_S , mentre si trascura il contributo dovuto alla resistenza di shunt R_{SH} .

4.1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UNACELLA FOTOVOLTAICA31

[31] Le equazione che descrivono la curva caratteristica I-V sono:

$$\begin{aligned}
 I &= I_L - I_0(e^{q(V+IR_S)/nkT} - 1) \\
 I_L &= I_{L(T_1)}(1 + K_0(T - T_1)) \\
 I_{L(T_1)} &= G \cdot I_{SC}/G_{nominal} \\
 K_0 &= (I_{SC(T_2)} - I_{SC(T_1)})/(T_2 - T_1) \\
 I_0 &= I_{0(T_1)} \cdot (T/T_1)^{3/n} \cdot e^{qV_g/nk(1/T-1/T_1)} \\
 I_{0(T_1)} &= I_{SC(T_1)}/(e^{qV_{oc}(T_1)/nkT_1} - 1) \\
 R_S &= -dV/dI_{V_{OC}} - 1/X_V \\
 X_V &= I_{0(T_1)} \cdot q/nkT_1 \cdot e^{qV_{OC}(T_1)/nkT_1}
 \end{aligned}$$

Si osserva che la corrente del generatore, $I_{L(T_1)}$, in funzione della temperatura, è direttamente proporzionale alla potenza irradiata sulla cella, G , espressa in W/m^2 . Si ricorda che q indica la costante della carica elementare, n è il fattore di idealità del diodo, k è la costante di Boltzman ¹, mentre gli altri parametri (tensione a vuoto, V_{OC} , corrente di corto circuito, I_{SC}) sono dati forniti dal costruttore del pannello.

I parametri usati nella simulazione sono relativi al pannello solare *XOB17-01x8* prodotto dalla *IXOLARTMSolarBITS* [18]; nel relativo datasheet si leggono i seguenti parametri costruttivi:

Caratteristiche tecniche cella XOB17-01x8			
Simbolo	Descrizione	Valori Tipici @ 25°C	Unità
V_{OC}	Tensione a vuoto	4,90	V
I_{SC}	Corrente di Corto Circuito	4,2	<i>mA</i>
dV_{OC}/dT	Coefficiente di temp. a circuito aperto	-2,1	<i>mV/K</i>
$K_0 = dI_{SC}/dT$	Coefficiente di temp. in corto circuito	0,12	<i>mA/cm²K</i>

Ecco che, noti i parametri costruttivi e l'irraggiamento incidente sulla superficie della cella fotovoltaica, si può conoscere la quantità di corrente elettrica generata.

¹Carica elementare $q = 1,6 \cdot 10^{-19}C$
 Fattore di idealità del diodo $1 < n < 2$
 Costante di Boltzman $k = 1,38 \cdot 10^{-23}JK^{-1}$

4.2 Descrizione del punto di massima potenza e dell'MPPT

La ricerca del punto di massima potenza per un sistema a celle fotovoltaiche è un elemento essenziale che non può essere trascurato quando si vuole massimizzare l'efficienza di un impianto che sfrutta le energie rinnovabili [14]. Il problema che si risolve con la tecnica dell'MPPT è quello di ricercare automaticamente il valore di tensione V_{MPP} o di corrente I_{MPP} al quale il pannello fotovoltaico deve operare per massimizzare la potenza estratta (P_{MPP}) per un dato valore d'irraggiamento e temperatura. Essendo l'irraggiamento incidente una variabile casuale, è necessario che un efficiente sistema MPPT, rilevi il punto di lavoro ottimale in un tempo breve. La curva caratteristica di tensione e corrente di un pannello fotovoltaico è raffigurata nel seguente grafico:

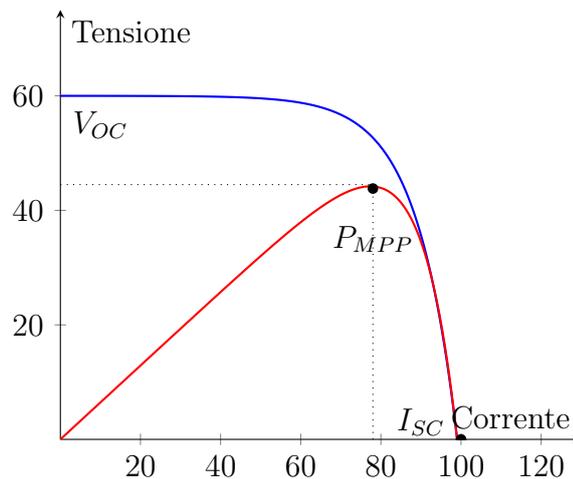


Figura 4.2: Curva caratteristica PV

In blu si rappresenta la curva caratteristica di tensione e corrente di un generico pannello fotovoltaico, per una certa quantità d'irraggiamento. Le intersezioni della curva con gli assi cartesiani forniscono i suoi punti fondamentali; essi rappresentano la corrente di cortocircuito I_{SC} (intersezione con l'asse delle ascisse) e la tensione a vuoto, o circuito aperto, ai capi della cella, V_{OC} (intersezione con l'asse delle ordinate).

La curva rossa, invece, riporta la potenza estratta in funzione del carico collegato ad essa, e quindi, in funzione della corrente e tensione. Nell'ipotetica curva qui raffigurata, il punto di lavoro in cui la potenza trasferita è massima (P_{MPP}) si ottiene in corrispondenza dei valori di tensione pari a

45V e di corrente pari a 78A; un sistema MPPT si preoccupa, quindi, di identificare e mantenere tale condizione di lavoro, imponendo la tensione e la corrente al circuito.

4.3 Paronamica degli algoritmi di MPPT

I circuiti che si occupano di ricercare il punto di massima potenza sono, il più delle volte, implementati con un microcontrollore che gestisce il carico applicato [13]. Si possono contare fino ad una ventina di tecniche e sviluppi differenti, ognuna delle quali si diversifica per efficienza, costi realizzativi, versatilità d'impiego e complessità implementativa. I principali algoritmi in catena chiusa che vengono adottati e di cui si dispone una maggiore diffusione, sono il *perturba ed osserva* e l'algoritmo della *conduttanza incrementale* [8]. Entrambi basano la ricerca del punto ottimale di lavoro sulla potenza istantanea assorbita e tenendo presente che, la condizione in cui $dP/dV = dP/dI = 0$, corrisponde al punto P_{MPP} .

4.3.1 Perturba ed Osserva

L'algoritmo del *Perturba ed Osserva* è uno dei primi realizzati e tutt'oggi presenta ancora larga diffusione. Il funzionamento è, nella maggior parte dei casi, gestito da un controllore a tempo discreto che, ad ogni intervallo k , misura corrente e tensione e ne calcola il prodotto [10]; se quest'ultimo è aumentato rispetto al passo precedente, allora si aumenta il valore di tensione di un fattore ΔV , altrimenti, si diminuisce di ΔV . Qui di seguito si espone, per mezzo di un flowchart, il percorso di confronti e decisioni che l'algoritmo effettua per ricercare la situazione ottimale.

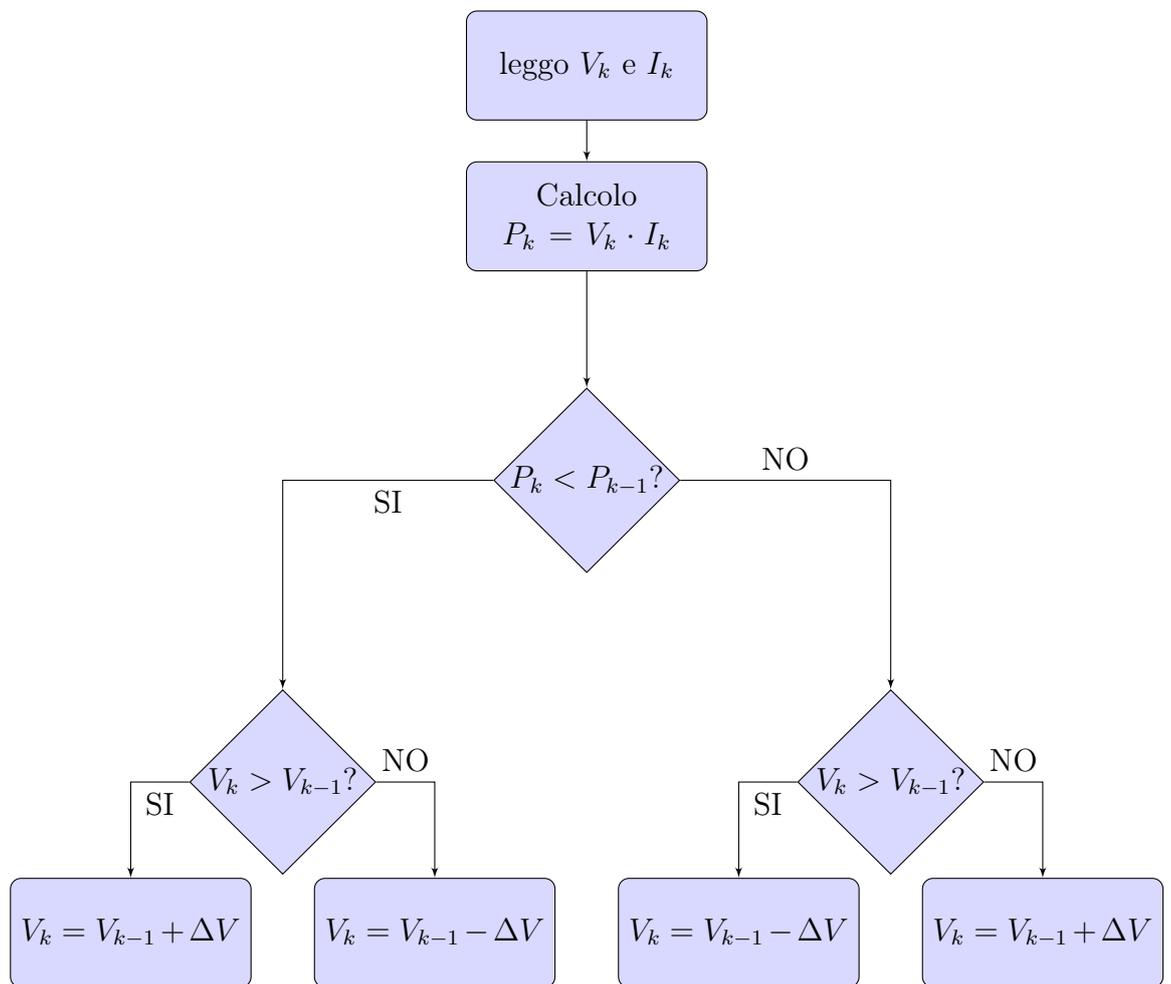


Figura 4.3: FlowChart algoritmo *Perturba ed Osserva*

L'andamento della tensione ai capi della cella, quando l'algoritmo si por-

ta in una situazione di regime con irraggiamento costante, oscilla in modo discreto tra i valori $V_{ref} - \Delta V$, V_{ref} e $V_{ref} + \Delta V$.

Il seguente grafico presenta l'andamento della tensione in funzione del tempo con irraggiamento costante.

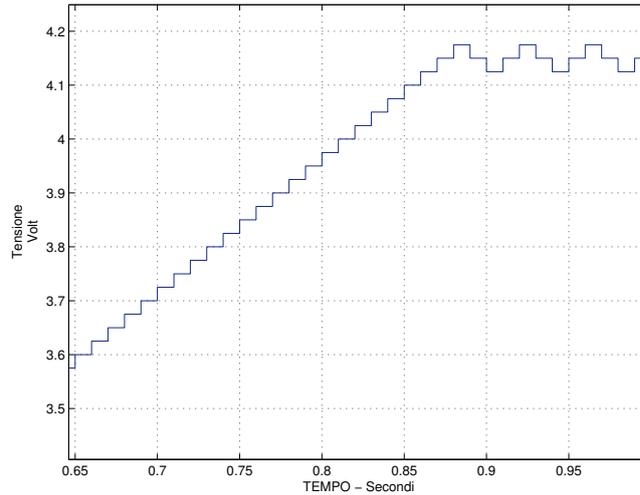


Figura 4.4: Tensione in uscita dell'algoritmo

Osserviamo che nel primo tratto del grafico, da 0.65 a 0.85 secondi, l'algoritmo si sta portando nel punto ottimale di lavoro, raggiungendolo a 0.9 secondi². Da questo istante in poi i valori di tensione rimangono costanti, oscillando tra 4.125 e 4.175 Volt.

La logica dell'algoritmo di ricerca della massima potenza, unita alla possibilità di apprezzare anche piccole variazioni di potenza, conduce inevitabilmente alla generazione di una oscillazione di regime del *ciclo limite*. L'esistenza di questa oscillazione è solamente funzione dei passi di quantizzazione in ingresso e in uscita dell'algoritmo ed è indipendente da qualunque parametro del generatore.

In questo esempio, la quantità di incremento o decremento della tensione è pari a $\Delta V = 0.025$ Volt, invece il valore medio in uscita è dato da:

$$\frac{(V_{ref} - \Delta V) + V_{ref} + (V_{ref} + \Delta V)}{3} = \frac{3V_{ref}}{3} = V_M = 4.150 \text{ Volt}$$

²In questo intervallo $P_k > P_{k-1}$ e $V_k > V_{k-1}$ e quindi il valore imposto di tensione aumenta, $V_k = V_{k-1} + \Delta V$

Un raffinamento di questo algoritmo è dato dal *Perturba ed Osserva Adattivo*, nel quale l'incremento e decremento di tensione ΔV non è un parametro fissato a priori, ma dipende della variazione di potenza rispetto al passo precedente [31]. Ovvero:

$$\Delta V_k = M \frac{P_k - P_{k-1}}{\Delta V_{k-1}}$$

dove M è una costante che dipende dalla massima potenza estratta dalla cella fotovoltaica. Questa piccola variazione implementativa consente di ridurre le oscillazioni attorno al punto di massima potenza e di velocizzare la convergenza dell'algoritmo in caso di variazioni rapide d'irraggiamento.

4.3.2 Conduttanza incrementale

Questo metodo, più sofisticato dal punto di progettuale rispetto al *Perturba ed Osserva*, basa il principio di funzionamento sul fatto che l'inclinazione della curva di potenza della cella fotovoltaica è nulla nell'intorno del punto di massima potenza, P_{MPP} [14]. Infatti:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 & \text{nel MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0 & \text{a sinistra di MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{a destra di MPP} \end{cases}$$

Un modo meno evidente, ma efficace, di eseguire l'algoritmo della *conduttanza incrementale* è quello di considerare il segnale:

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

Questa quantità rappresenta la conduttanza³ della sorgente e, tenendo presente che $\frac{dP}{dV} = 0$, quando $\delta \sim 0$, si garantisce il funzionamento della cella fotovoltaica nel punto di massima potenza.

Una realizzazione dell'MPPT che frutta la tecnica della *conduttanza incrementale* si può ottenere, in modo analogico, grazie ad un semplice controllore proporzionale e integrale (PI), oppure, per via digitale, con un microprocessore. Nel secondo caso l'algoritmo verifica, per ogni intervallo k , se la quantità $\delta \stackrel{\leq}{\geq} 0$ e di conseguenza aumenta o diminuisce la tensione (o la corrente) imposta al pannello.

³La conduttanza è il reciproco di una resistenza, cioè il rapporto tra una corrente ed una tensione; da questa considerazione deriva il nome dell'algoritmo.

4.4 Simulazione SIMULINK di un algoritmo di MPPT

Il modello scelto per implementare un sistema di ricerca del punto di massima potenza è quello appena descritto del *Perturba ed Osserva*. È stata realizzata una simulazione Simulink nella quale si sono testate le qualità dell'algoritmo sfruttando i dati d'irraggiamento simulati ed in precedenza descritti.

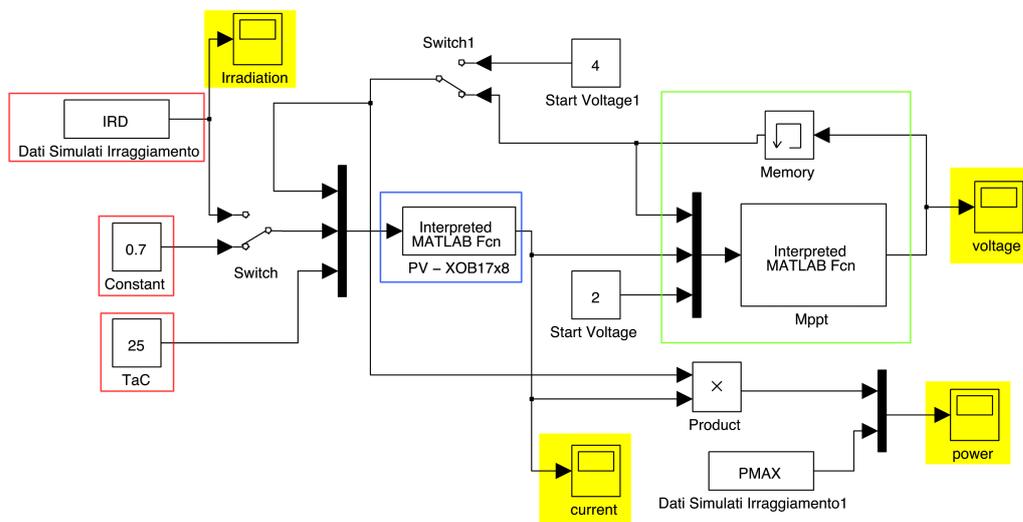


Figura 4.5: Modello Simulink MPPT

Lo schema a blocchi qui raffigurato rappresenta il modello implementato; possiamo evidenziare dei gruppi fondamentali:

- Il gruppo riquadrato in rosso rappresenta i blocchi che forniscono i parametri d'ingresso della cella fotovoltaica e sono i valori d'irraggiamento e la temperatura a cui si trova la cella;
- il gruppo riquadrato in blu si occupa di simulare, tramite una funzione, il pannello solare; in ingresso vengono portati i segnali relativi alla potenza irraggiata, la temperatura della cella e la tensione operativa. L'uscita del blocco produce un valore di corrente in accordo con la descrizione matematica della pannello fotovoltaico e con i parametri costruttivi della cella XOB17-01x8.
- Il riquadro verde racchiude il vero e proprio algoritmo di MPPT del *Perturba ed osserva*. I parametri d'ingresso sono la corrente e la tensione ai

capi della cella ed il valore iniziale imposto alla cella; il blocco *Memory* si occupa di memorizzare il valore di tensione nel passo precedente.

- I riquadri gialli invece sono i punti di misura delle grandezze considerate.

4.4.1 Risultati della simulazione

Il modello Simulink descritto ha una frequenza di aggiornamento della tensione d'uscita di 1 kHz; l'MPPT è stato testato con i valori d'irraggiamento simulati e supponendo che la temperatura delle celle solari rimanga costante⁴. La potenza teorica estratta dall'algoritmo, non considerando eventuali perdite dovute all'efficienza della cella e ai circuiti dell'MPPT, è prossima alla potenza irraggiata sul pannello; il grafico qui di seguito riporta l'andamento della potenza irraggiata e della potenza estratta dall'MPPT.

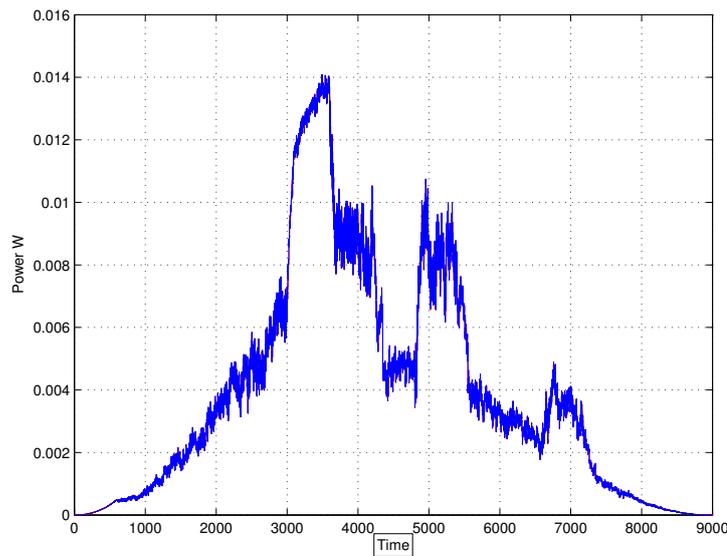


Figura 4.6: Potenza estratta dall'algoritmo

⁴Ipotesi semplificativa che in realtà non si verifica per un reale pannello

Per apprezzare il dettaglio della potenza utile, si riporta un ingrandimento relativo ad un intervallo di 6 secondi; la curva rossa rappresenta la potenza a valle del sistema MPPT, mentre la curva blu la potenza a monte:

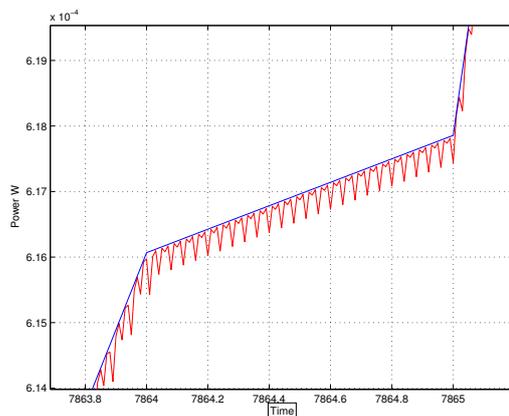


Figura 4.7: Dettaglio potenza estratta

Il grafico seguente mostra l'energia totale irraggiata (curva rossa) e l'energia elettrica estratta (curva blu) durante tutta la simulazione; osserviamo come l'algoritmo adatta il punto di lavoro in modo da ottenere una perdita di potenza totale durante le ore diurne inferiore al 0.037%.

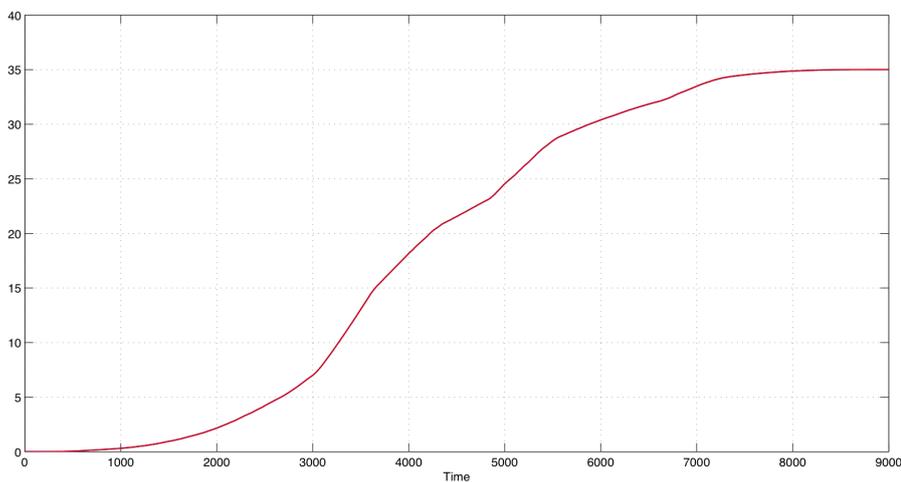


Figura 4.8: Cumulativo energia estratta

Infatti, un dettaglio dei valori finali mostra come la differenza tra le due quantità sia minima.

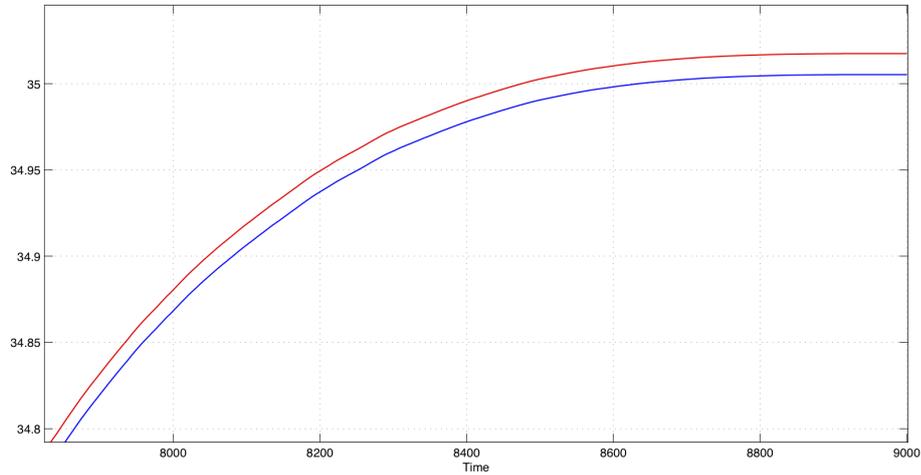


Figura 4.9: Dettaglio energia prodotta ed estratta

Per quanto riguarda la tensione imposta alla cella, si osserva che, quando la potenza raggiata sul pannello è superiore a 50 W/m^2 , è superiore a 3 Volt; con valori d'irraggiamento prossimi a 500 W/m^2 , la tensione in uscita si porta a circa 4 Volt. Tale valore è anche confermato dai dettagli tecnici del pannello XOB17-01x8, nel quale si legge che il punto di massima potenza tipico è di 4 Volt [18].

L'andamento della tensione in funzione dell'insolazione giornaliera è riportato nel grafico:

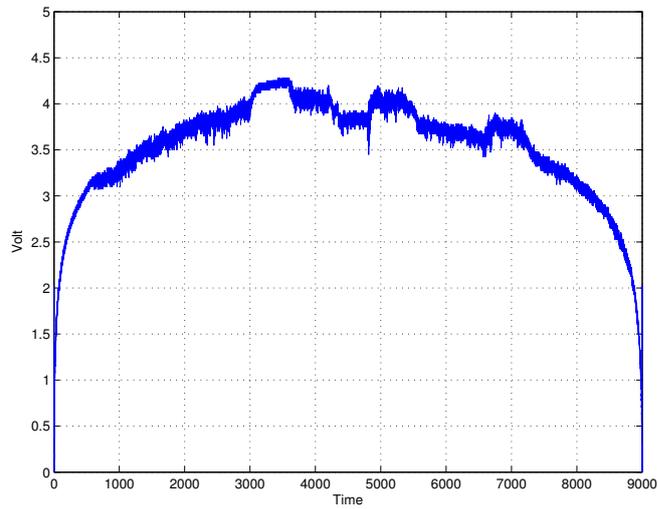


Figura 4.10: Tensione in uscita

e in dettaglio si osserva la tensione d'uscita che oscilla attorno al ciclo limite individuato dal punto di massima potenza:

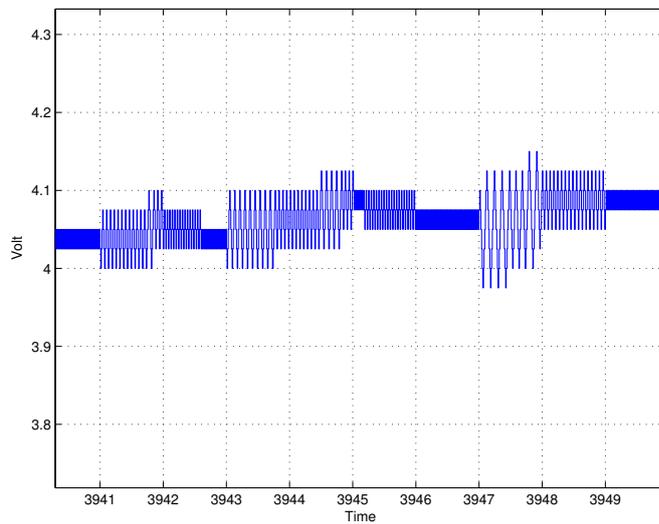


Figura 4.11: Dettaglio tensione in uscita

Capitolo 5

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di presentare uno strumento che possa rilevarsi utile per gli studi che trattano l'estrazione di energia elettrica dalle fonti rinnovabili, ed in particolare i dispositivi Energy Harvesting.

Avere a disposizione un modello atto a simulare l'irraggiamento solare si rileva utile quando sono necessarie grandi quantità di dati statistici e ci si vuole svincolare dai dati rilevati. L'analisi a lungo termine di dispositivi Energy Harvesting richiede numerose e differenti situazioni d'irraggiamento al fine di rilevare e prevedere condizioni energetiche sfavorevoli e consentire, quindi, all'ingegneria di vincere le sfide di efficienza ed ecosostenibilità.

Il modello che simula i valori della radiazione solare copre la maggior parte delle possibili condizioni climatiche che si sono registrate nel periodo di analisi. È da notare che, sebbene il lavoro presentato sia dipendente dalle condizioni climatiche della zona studiata, è possibile estendere lo strumento implementato ad altri orizzonti. Inoltre, disponendo della descrizione climatica annuale, si è in grado di riprodurre artificialmente l'irraggiamento per un intervallo di tempo superiore alla giornata; si possono presentare simulazioni che generano valori mensili, stagionali o annuali.

Un contributo notevole lo si può fornire alle ricerche sui dispositivi Energy Harvesting, infatti, si deve considerare che, con piccole modifiche all'algoritmo, si può simulare qualsiasi fonte energetica non deterministica sfruttata da tali applicazioni.

Anche la simulazione del sistema di ricerca di massima potenza mostra l'efficienza dell'algoritmo; infatti le perdite dovute al ciclo limite sono inferiori al 0,05% in più simulazioni. È chiaro come la simulazione dei valori d'irraggiamento si riveli utile per testare l'efficienza di un secondo sistema, l'MPPT; quest'ultimo, presente il più delle volte nei dispositivi Energy Harvesting, è un anello chiave nell'efficienza. Sebbene l'algoritmo presenta eccellenti pre-

stazioni di efficienza, è comunque da tener presente che la sua esecuzione su microcontrollore è un consumo di potenza, non trascurabile. Nuovi sistemi *low power* di MPPT sono in sviluppo per applicazioni al limite dell'economia energetica [22, 27] .

Appendice A

Matrici d'irraggiamento

0,1	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,01	0,19	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,01	0,29	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,01	0,39	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,01	0,39	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,01	0,49	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,01	0,49	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,01	0,49	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,85	0,14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,85	0,14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,9	0,09	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,9	0,09	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,9	0,09	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,9	0,09	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,9	0,08	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,9	0,07	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,9	0,05	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,025	0,95	0,025	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,96	0,02
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,98

Figura A.1: Matrice di transizione - Irraggiamento pieno

0,1	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0,15	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,05	0,15	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,05	0,15	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,1	0,1	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,1	0,1	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,2	0,6	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,6	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,6	0,2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,8	0,1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,8	0,1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,5	0,1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,5	0,1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,65	0,25	0,1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,2	0,05	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,1	0

Figura A.2: Matrice di transizione - Irraggiamento variabile

0,1	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0,15	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,05	0,25	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,05	0,55	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,1	0,7	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,1	0,8	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,08	0,9	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,08	0,9	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,45	0,5	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,45	0,5	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	0,25	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	0,25	0,05	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0,15	0,05	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0,15	0,05	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,85	0,1	0,05	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,85	0,1	0,05	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,075	0,03	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,95	0,03	0,025	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,95	0,025	0,03
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,99	0,01

Figura A.3: Matrice di transizione - Copertura nuvolosa

0,1	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,5	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0,25	0,65	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,25	0,65	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,4	0,5	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,4	0,5	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,55	0,35	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,7	0,25	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0,7	0,25	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0,15	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,08	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,08	0,03	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,08	0,03	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,08	0,03	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,95	0,04	0,01	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,95	0,04	0,01	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,95	0,04	0,01	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,95	0,04	0,01	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,96	0,03	0,01
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,99	0,01

Figura A.4: Matrice di transizione - Basso irraggiamento

Bibliografia

- [1] tech. rep., ACCA. http://www.acca.it/Portals/1/AllegatiBiblus/Approfondimenti_Tecnici/Impianti_Solari_Teoria_73.pdf.
- [2] R. G. ALLEN, R. TREZZA, AND M. TASUMI, *Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes*, Agricultural and Forest Meteorology, (2006), pp. 55–73. www.sciencedirect.com.
- [3] ARPAV, *Dati irraggiamento*, tech. rep., Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione, 2012. http://www.arpa.veneto.it/teolo/radar/menu_staz.
- [4] D. AUDET ET AL., *Scheduling recurring tasks in energy harvesting sensors*, in Workshop on Green Communications and Networking - IEEE INFOCOM, 2011.
- [5] L. BADIA ET AL., *An optimization framework for joint sensor deployment, link scheduling and routing in underwater sensor networks*, ACM Mobile Computing and Communication Review (MC2R), (2007).
- [6] L. BADIA ET AL., *Energy and connectivity performance of routing groups in multi-radio multi-hop networks*, Wiley’s Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC) Journal, special issue on Mobility Management and Wireless Access, (2008).
- [7] N. BENVENUTO AND M. ZORZI, *Principles of Communication Networks and Systems*, Wiley, 2011.
- [8] S. BIFARETTI AND V. IACOVONE, *Convertitori per sistemi di generazione fotovoltaici*, Corso di elettronica di potenza - Università degli Studi di Roma Tor Vergata. http://www.uniroma2.it/didattica/EP/deposito/Convertitori_PV.pdf.
- [9] J. BOLAND, *Modeling Solar Radiation at the Earth’s Surface: Recent Advances*, Springer, April 2008.

- [10] S. BUSO, *Introduzione alle tecnologie fotovoltaiche*, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali - DTG - Università degli Studi di Padova. <http://www.dei.unipd.it/wdyn/?IDfile=3996&IDsezione=3272>.
- [11] D. CHIARAMONTI AND D. FIASCHI, *Radiazione solare*, Università degli studi di Firenze, Facoltà di ingegneria, Dipartimento di Energetica S. Stecco, 2006. <http://www2.de.unifi.it/Macchine/Martelli/CORSI-MARTELLI/ENERGIE-RINNOVABILI/Dispense/Radiationesolare1.pdf>.
- [12] P. H. CHOU AND S. KIM, *Techniques for maximizing efficiency of solar energy harvesting systems*, tech. rep. The Henry Samueli School of Engineering - University of California - <http://www.ece.uci.edu/~chou/icmu10.pdf>.
- [13] T. ESRAM ET AL., *Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control*, IEEE Transactions on Power Electronics, 21 (2006).
- [14] —, *Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 22 (2007).
- [15] N. FEMIA ET AL., *Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method*, IEEE Transactions on Power Electronics, 20 (2005).
- [16] G. HALL, *Funzione matlab markov.m*, tech. rep. <http://people.brandeis.edu/~ghall/econ303/markov.m>.
- [17] ILMETEO.IT, *Dati storici*, tech. rep., ilMeteo.it, 2012. <http://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo>.
- [18] IXYS, *datasheet of xob17-01x8, ixolartm high efficiency solarbit*, tech. rep.
- [19] R. KUMAR AND L. UMANAND, *Estimation of global radiation using clearness index model for sizing photovoltaic system*, Renewable Energy, 30, pp. 2221–2233.
- [20] Y. LI AND J. NIU, *Forecast of power generation for grid-connected photovoltaic system based on markov chain*, Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific.

- [21] N. MICHELUSI, L. BADIA, ET AL., *Correlated energy generation and imperfect state-of-charge knowledge in energy harvesting devices*, Wiley's Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC) Journal, (2012).
- [22] NI, *Maximum power point tracking*, tech. rep., National Instruments Developer Zone. <http://www.ni.com/white-paper/8106/en>.
- [23] D. NIYATO ET AL., *Sleep and wakeup strategies in solar-powered wireless sensor/mesh networks: Performance analysis and optimization*, IEEE Transactions on Mobile Computing, 6 (2007).
- [24] S. P. PEREZ ET AL., *Characterization of the solar power impact in the grid*, Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference on. 21-23 May 2007.
- [25] P. POGGI ET AL., *Stochastic study of hourly total solar radiation in corsica using a markov model*, Internal Journal of Climatology, (2000), p. 1843–1860.
- [26] C. W. RICHARDSON, *Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation*, Water Resources Research, 17 (1981), pp. 182–190.
- [27] TI, *New power management techniques*, tech. rep., Texas Instruments. http://www.ti.com/lstds/ti/analog/powermanagement/power_portal.page.
- [28] J. P. TORREGOZA ET AL., *Battery model for wireless networks using photovoltaic cells*, 2006 8th International Conference Advanced Communication Technology - Feb. 20-22, 2006 ICA0T2006.
- [29] A. URBINA ET AL., *Reliability of rechargeable batteries in a photovoltaic power supply system*, Journal of Power Sources, 80 (1999), p. 30–38.
- [30] F. VIGNOLA, *Variability of solar radiation data over short time intervals*, tech. rep. University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratories - <http://solardat.uoregon.edu/download/Papers/VariabilityofSolarRadiationDataoverShortTimeIntervals.pdf>.
- [31] G. WALKER, *Evaluating mppt converter topologies using a matlab pv model*, Journal of Electrical and Electronics Engineering Australia, 21 (2001), pp. 49–55.

- [32] J. WIDÈN ET AL., *A combined markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand*, Energy and Buildings, 41 (2009), p. 1001–1012.
- [33] J. WIDÈN, *Distributed Photovoltaics in the Swedish Energy System (Model Development and Simulations)*, PhD thesis, Uppsala Universitet, Sweden.
- [34] B. S. WILLIAM AND M. GEYER, *Power From The Sun*, John Wiley and Sons, 2001.