

# **Analisi delle prestazioni degli impianti fotovoltaici situati presso il laboratorio di ricerca e sviluppo HEnergia di Forlì**

Augusto Bianchini, Michele Gambuti, Marco Pellegrini, Cesare Sacconi

DIN, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna

Viale Risorgimento, 2 – 40136 – BO

## **Abstract**

Nasce a Forlì un laboratorio innovativo di ricerca e sviluppo del gruppo Hera che si pone come obiettivo quello di studiare diverse tecnologie per la produzione di energia da fonte rinnovabile presenti sul mercato e acquisire il know-how necessario alla valutazione, progettazione e gestione di impianti di questa tipologia.

A partire dai dati climatici e di produzione elettrica acquisiti e disponibili nel database che gestisce tali informazioni, sono stati realizzati modelli di valutazione delle prestazioni delle diverse tecnologie fotovoltaiche presenti presso il laboratorio: in questo elaborato vengono presentate delle prime stime relative alla produttività di tre diversi impianti.

## **Il parco fotovoltaico**

Lo scopo principale dell'impianto fotovoltaico è quello di testare diversi impianti di piccola taglia per diverse tecnologie disponibili sul mercato, con l'intento di valutare le prestazioni del singolo dispositivo nelle medesime condizioni ambientali, ovvero a parità di radiazione solare, condizioni atmosferiche (nuvolosità, pioggia ecc.) e vento; tali condizioni vengono continuamente monitorate grazie ad una stazione meteo locale.

I sistemi solari installati presso il laboratorio sono si seguito elencati:

Moduli	Tecnologia	Marca/Modello	Installazione	Potenza elettrica	Potenza termica
10 moduli fotovoltaici da 240 Wp	Silicio monocristallino	Panasonic – HIT-N240SE10	Fissa su cavalletti	2,4 kWp	0 kWt
9 moduli fotovoltaici da 240 Wp	Silicio policristallino	CNPV – CNPV-240P	Fissa su cavalletti	2,16 kWp	0 kWt
32 moduli fotovoltaici da 82,5 Wp	Tellururo di cadmio	First Solar – FS-382	Fissa su cavalletti	2,31 kWp	0 kWt
12 moduli fotovoltaici da 120 Wp	Silicio amorfo	Sharp – NA-F121	Fissa su copertura	1,44 kWp	0 kWt
4 moduli da 230 Wp elettrici + 0,8 kW termici	Policristallino	Anaf Solar	Fisso sopra cavalletto su piazzola	0,92 kWp	3,20 kWt
4 pannelli da 440Wp	Sistema a concentrazione con lenti di Fresnel	Arima	Inseguimento biassiale su piazzola	1,76 kWp	0 kWt
4 pannelli da 240Wp	Policristallino	CNPV – CNPV-240P (Heliantus)	Inseguimento monoassiale su piazzola	0,96 kWp	0 kWt
1 concentratore piano	Sistema a concentrazione con lenti di Fresnel	Sun Flower	Inseguimento biassiale su piazzola	1,14 kWp	0 kWt
7 moduli	Sistema a doppia concentrazione con lenti di cassegrain	GPS III Solar – GPS 600	Inseguimento monoassiale su piazzola	1,14 kWp	0 kWt
1 Paraboloide	Paraboloide a concentrazione termica	Solarbeam	Inseguimento biassiale su piazzola	0 kWp	11,5 kWt

Tabella 1 – Sistemi solari installati presso il laboratorio H Energia di Forlì

I pannelli in silicio mono e policristallino, amorfo e con tellururo di cadmio sono fissi, ovvero non dotati di un dispositivo di inseguimento e sono stati installati sul tetto del laboratorio.

Le tecnologie a concentrazione solare invece non sono fisse ma provviste di un sistema di inseguimento che consente alle celle di erogare la potenza di picco per un numero di ore superiore rispetto all'installazione fissa. A causa delle dimensioni e del peso del sistema d'inseguimento (oltre che dei pannelli stessi e della loro struttura), si è deciso di collocare i pannelli a concentrazione al suolo. Sempre al suolo sono stati installati il pannello solare ibrido fotovoltaico e termico e il pannello policristallino movimentato con sistema di inseguimento ad un asse.

Sia gli impianti fissi che quelli a inseguimento sono connessi alla rete in regime di scambio sul posto. Pertanto, essi richiedono degli inverter dedicati per la conversione dell'energia elettrica prodotta da corrente continua a corrente alternata.

### Valutazioni di produttività

La stazione meteorologica è entrata in funzione a metà settembre dopodiché si è verificata un'avaria alla scheda elettronica che ha comportato il fuori servizio della stazione e l'impossibilità di registrare i dati meteorologici successivi al mese di ottobre. Sono pertanto utilizzati i dati di irraggiamento misurato grazie al piranometro installato sulla stazione meteo sul tetto del laboratorio raccolti relativamente al periodo autunnale che va dal 17 settembre al 31 ottobre del 2013. Gli andamenti giornalieri rilevati sono stati i seguenti:

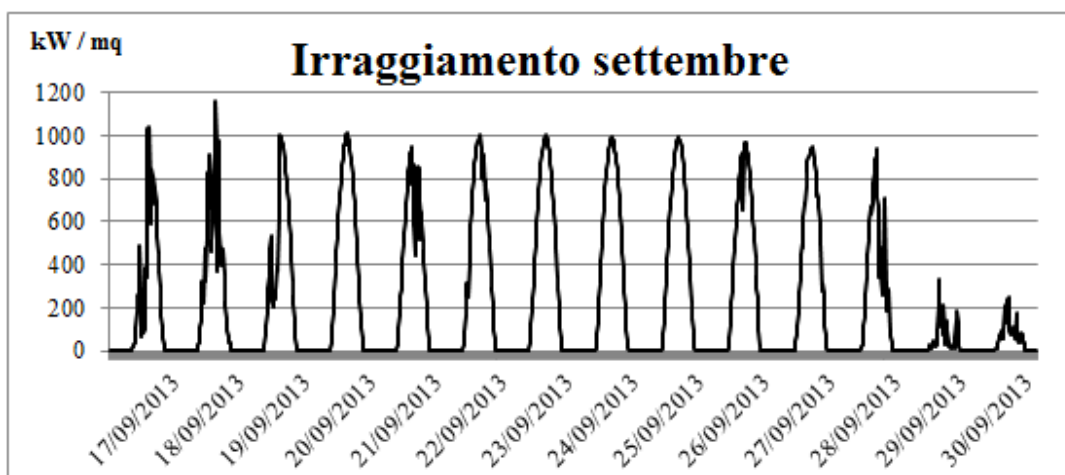


Figura 1 - Irraggiamento dal 17 settembre al 30 settembre

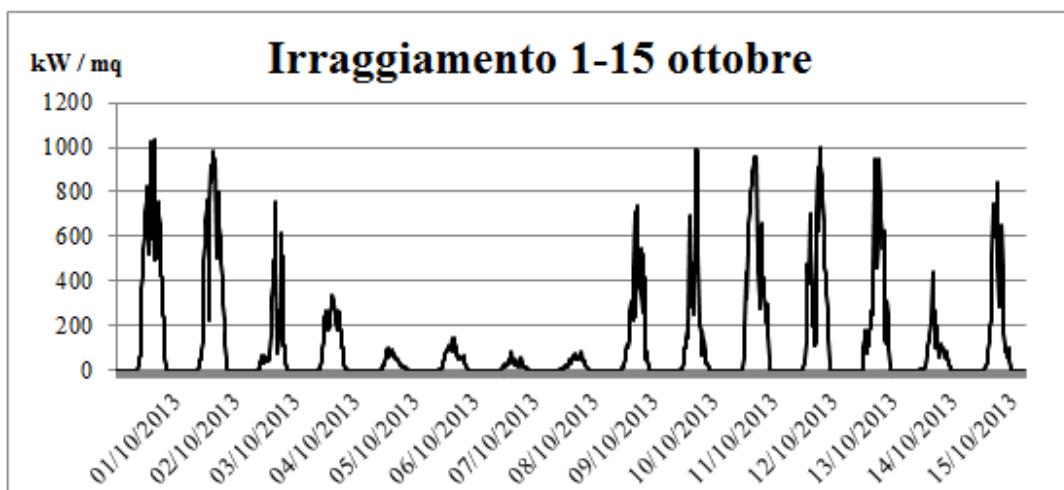


Figura 2- Irraggiamento dall'1 ottobre al 15 ottobre

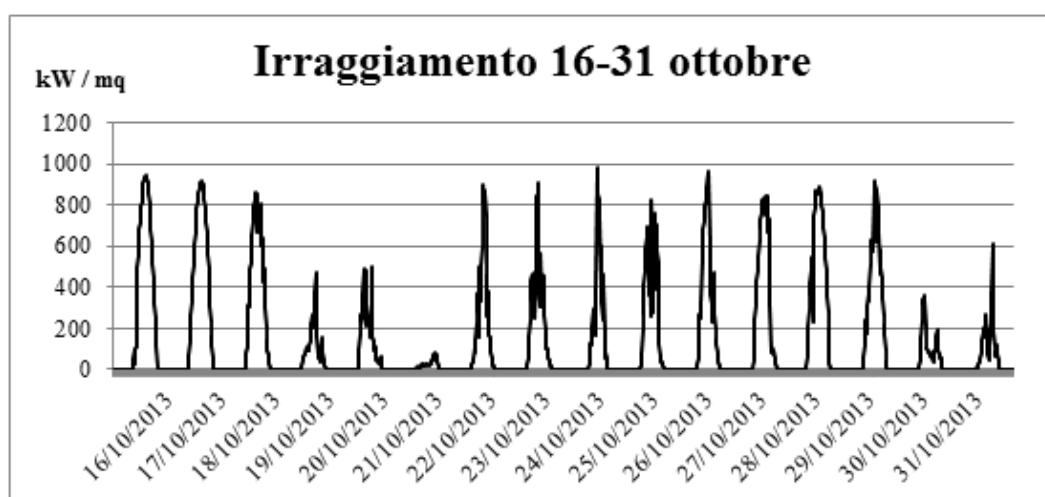


Figura 3- Irraggiamento dal 16 ottobre al 31 ottobre

Gli andamenti relativi alla seconda metà del mese di settembre sono tipici di giornate soleggiate con qualche eccezione dovuta a giornate variabili e a pioggia negli ultimi giorni. Ottobre è stato caratterizzato dall'alternarsi di giorni sereni e giorni coperti e con precipitazioni.

Per ogni giornata è stato calcolata l'energia solare totale giornaliera, per unità di superficie, giunta sulla superficie dei moduli sommando i diversi contributi mediati e registrati ogni 15 minuti. Dividendo questo valore con l'irraggiamento di riferimento preso pari a  $1 \text{ kW/m}^2$  otteniamo il Reference Yield ( $Y_r$ ) per la giornata in esame; esso permette di valutare il potenziale produttivo della giornata e viene espresso in termini di ore equivalenti durante le quali l'irraggiamento è stato pari al valore di riferimento.

In ugual modo sono stati registrati i valori giornalieri di energia totale prodotta (misurata all'uscita dell'inverter, pertanto energia AC) e rapportati alla potenza nominale dell'impianto per ottenere il Final Photovoltaic System Yield ( $Y_f$ ), ottenendo così indicazioni relative alla effettiva produzione dell'impianto rispetto al valore di taglia in termini di ore equivalenti di funzionamento.

I due indici confrontati tra loro permettono di risalire al Performance Ratio (PR) e valutare le prestazioni dell'impianto.

Il rendimento dell'impianto viene infine ottenuto dividendo l'energia giornaliera prodotta per l'energia ricevuta dai moduli (ricavata conoscendo la superficie totale dei moduli esposta alla radiazione solare).

Gli impianti analizzati in questo articolo sono i seguenti:

- Impianto con moduli in silicio monocristallino rivestiti da un film di silicio amorfo:

<i>n° moduli:</i>	10 moduli Panasonic HIT-N240SE10
<i>potenza nominale installata:</i>	2,4 kWp
<i>rendimento nominale:</i>	19 %
<i>superficie totale occupata:</i>	12,6 m <sup>2</sup>

- Impianto con moduli in silicio policristallino:

<i>n° moduli:</i>	9 moduli CNPV CNPV-240P
<i>potenza nominale installata:</i>	2,16 kWp
<i>rendimento nominale:</i>	14,7 %
<i>superficie totale occupata:</i>	14,7 m <sup>2</sup>

- Impianto con moduli in tellururo di cadmio:

<i>n° moduli:</i>	28 moduli First Solaer FS-382
<i>potenza nominale installata:</i>	2,31 kWp
<i>rendimento nominale:</i>	10,4 %
<i>superficie totale occupata:</i>	20,16 m <sup>2</sup>

Gli andamenti dei parametri di prestazione considerati sono riportati nei seguenti grafici.

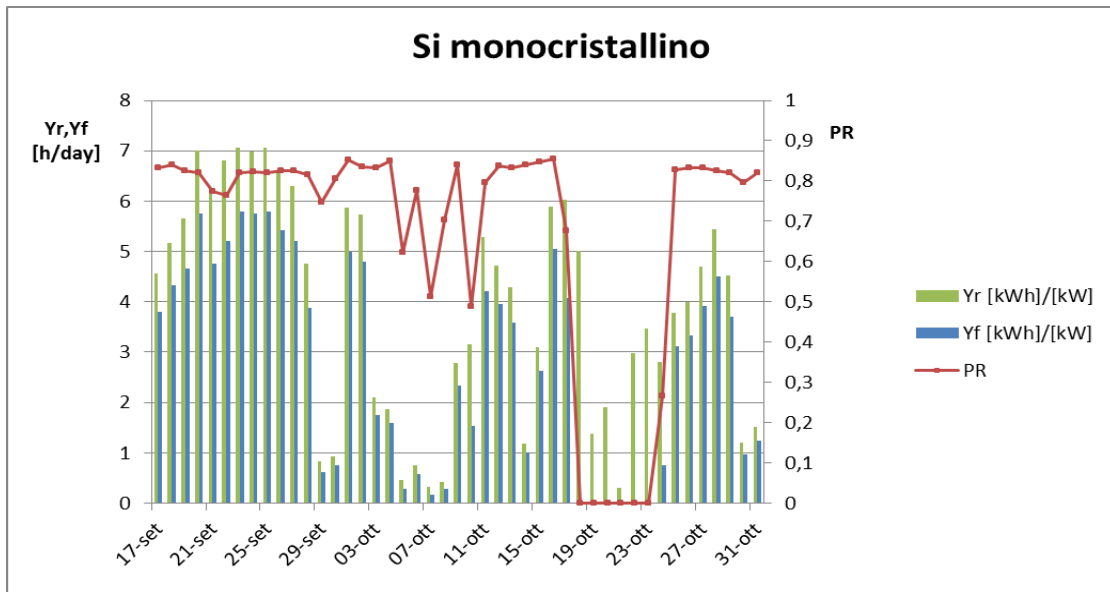


Figura 4 - Yr, Yf, Pr (impianto Si monocristallino)

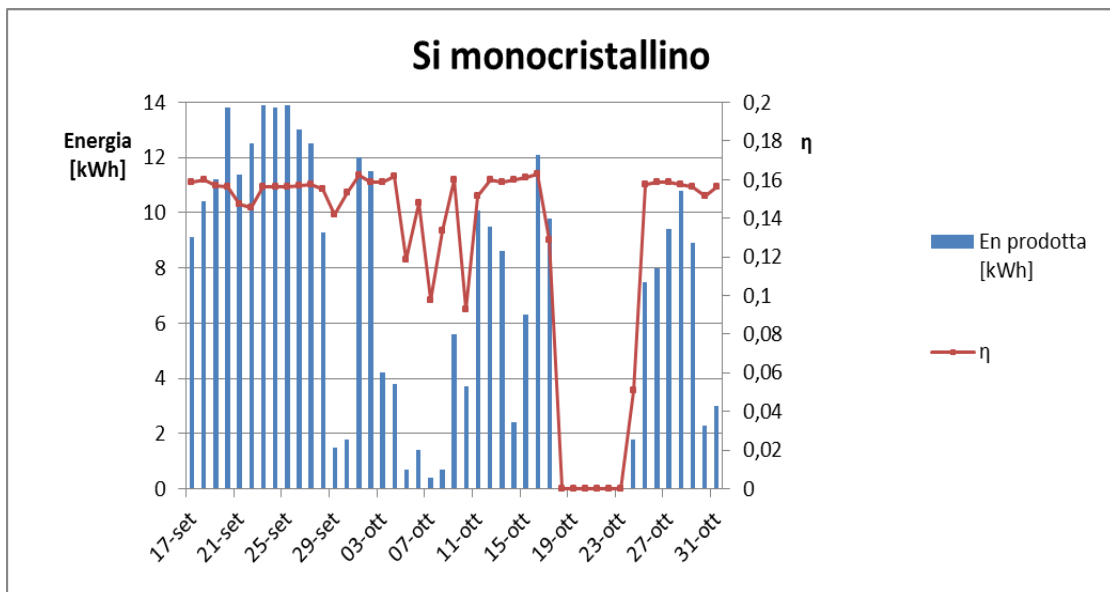


Figura 5 - Energia prodotta e rendimenti (impianto Si monocristallino)

I valori ottenuti nelle giornate di pioggia e di scarso irraggiamento sono dati che risultano sovrastimati. Infatti in queste condizioni è stato rilevato un comportamento anomalo da parte del sistema d'acquisizione dati che commette errori nel contabilizzare l'energia prodotta.

Purtroppo non è stato possibile isolare questo errore dai dati di produzione effettivi ed eliminarlo. Tra gli obiettivi della futura campagna di sperimentazione vi è quello di intervenire sul software di gestione e sul sistema d'acquisizione dati per ottimizzarlo e risolvere i problemi riscontrati.

Tali considerazioni valgono anche per i rimanenti due impianti, di seguito analizzati.

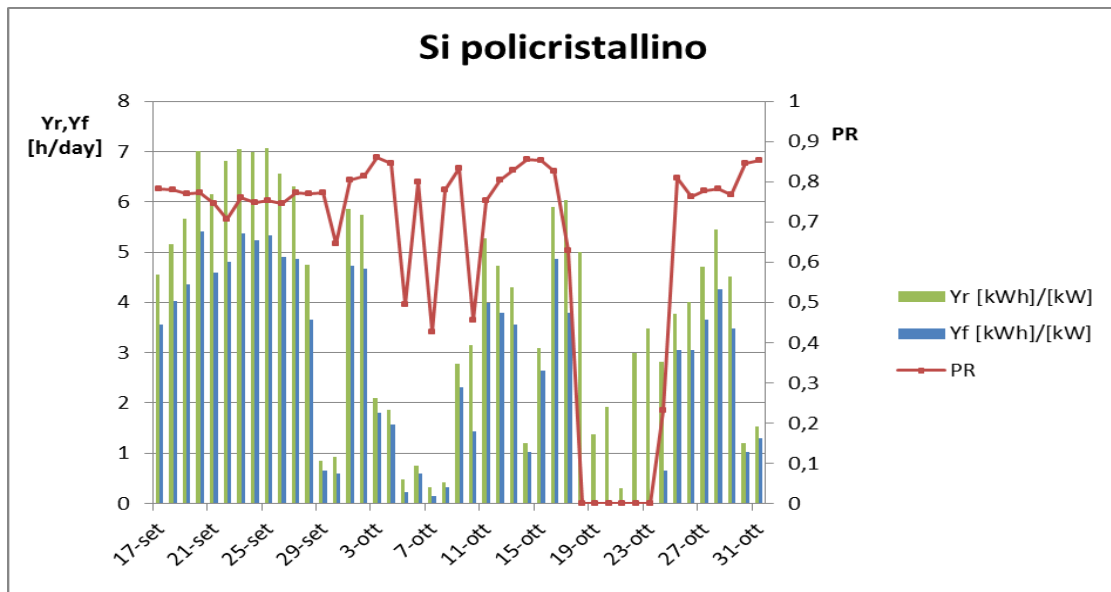


Figura 6 - Yr, Yf, Pr (impianto Si policristallino)

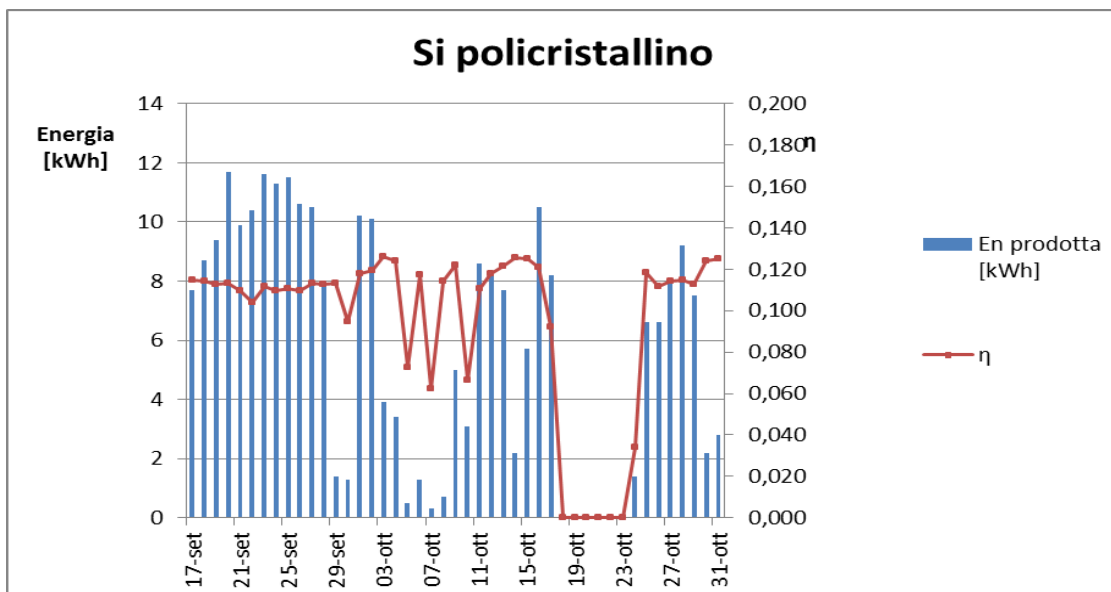


Figura 7- Energia prodotta e rendimenti (impianto Si policristallino)

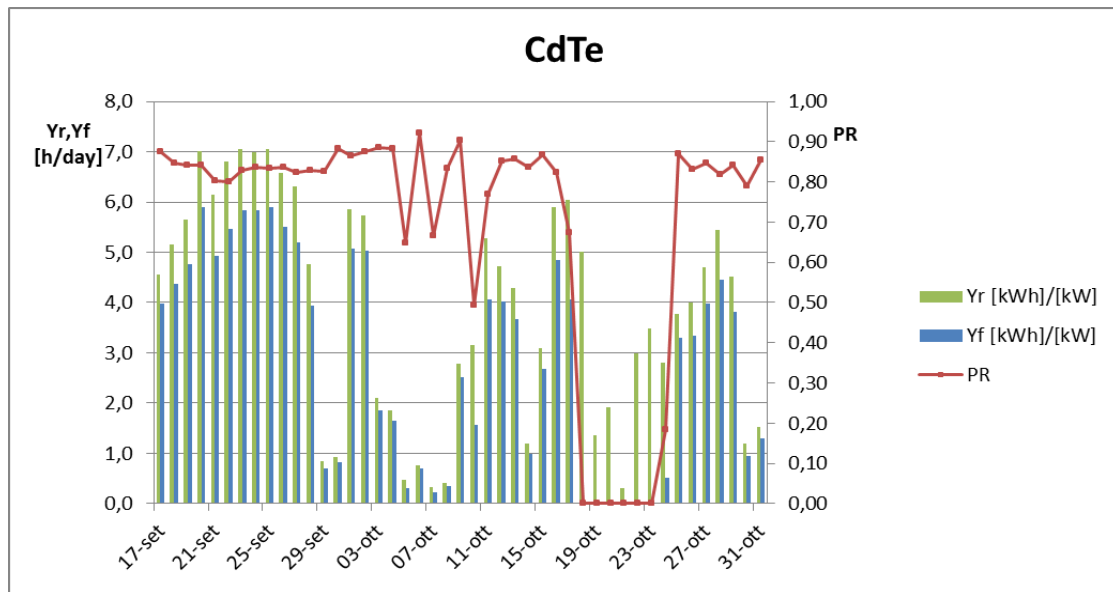


Figura 8 - Yr, Yf, (impianto CdTe)

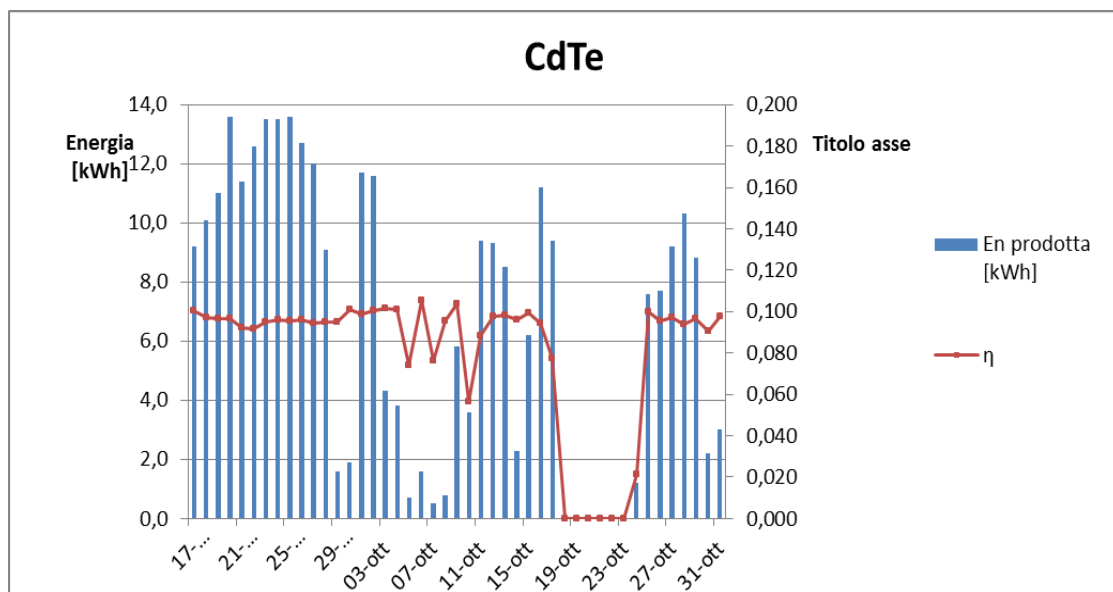


Figura 9 - Energia prodotta e rendimenti (impianto CdTe)

È possibile fare ulteriori valutazioni per i mesi di settembre e di ottobre costruendo un profilo di irraggiamento medio giornaliero e guardando come cambiano i diversi parametri.



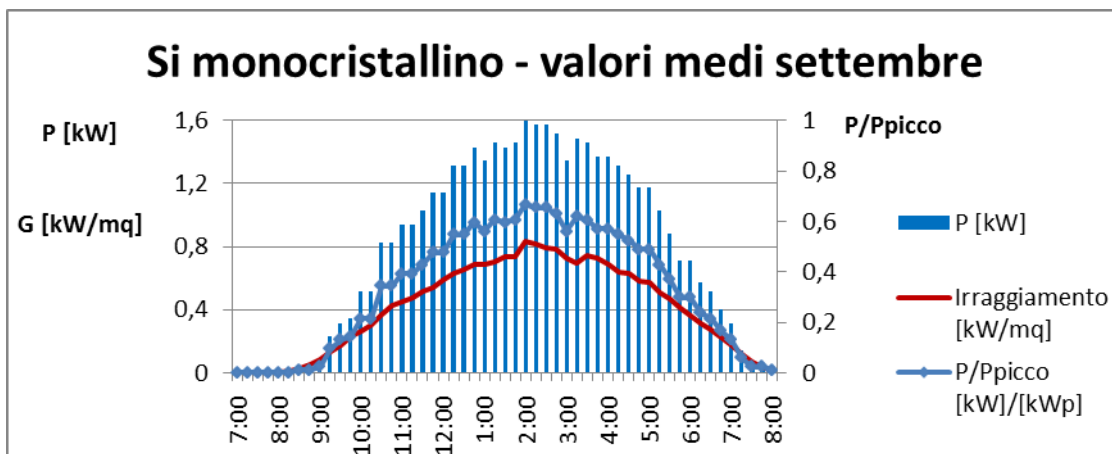


Figura 10 - Potenza, Irraggiamento e P/Ppicco medi giornalieri di settembre (impianto Si monocristallino)

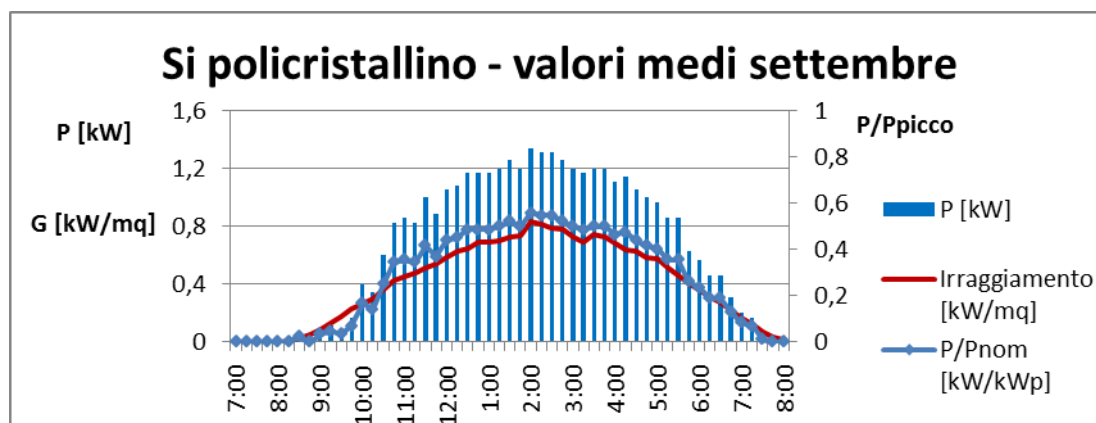


Figura 11- Potenza, Irraggiamento e P/Ppicco medi giornalieri di settembre (impianto Si policristallino)

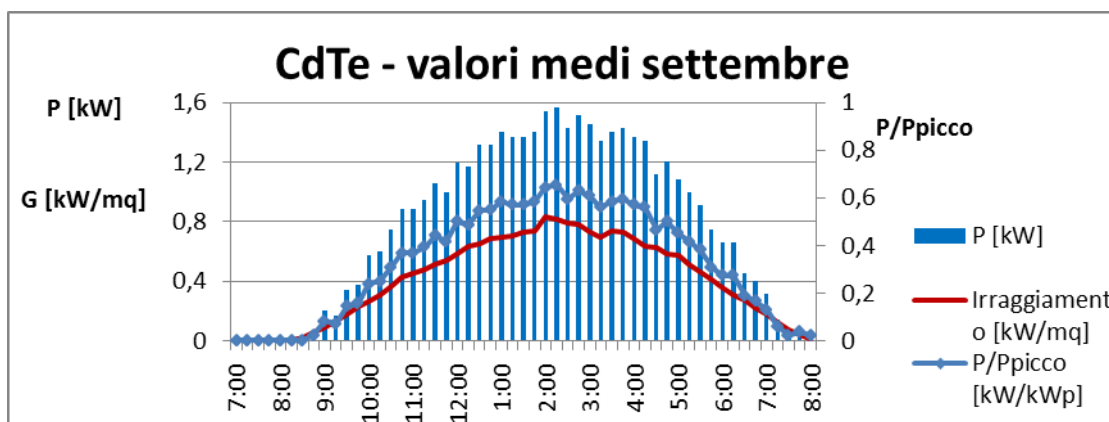


Figura 12- Potenza, Irraggiamento e P/Ppicco medi giornalieri di settembre (impianto CdTe)

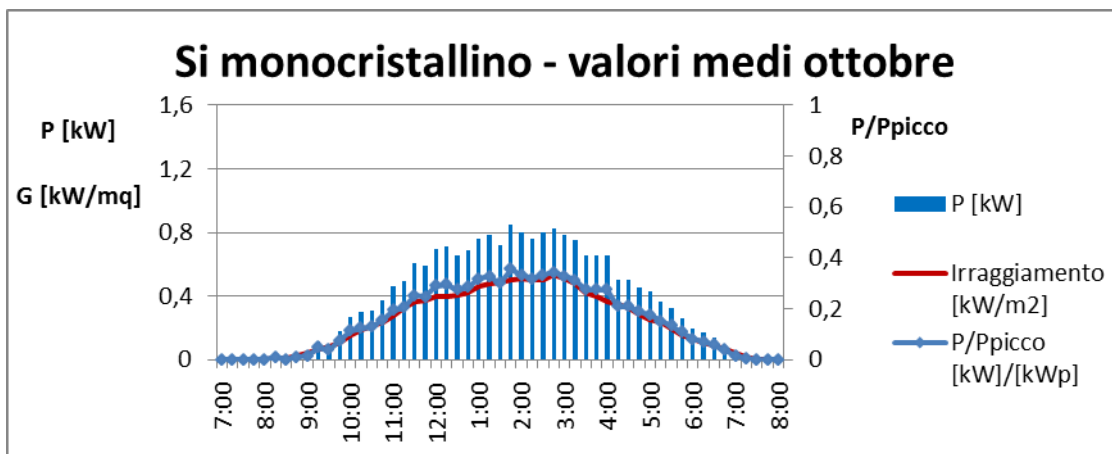


Figura 13 - Potenza, Irraggiamento e P/Picco medi giornalieri di ottobre (impianto Si monocristallino)

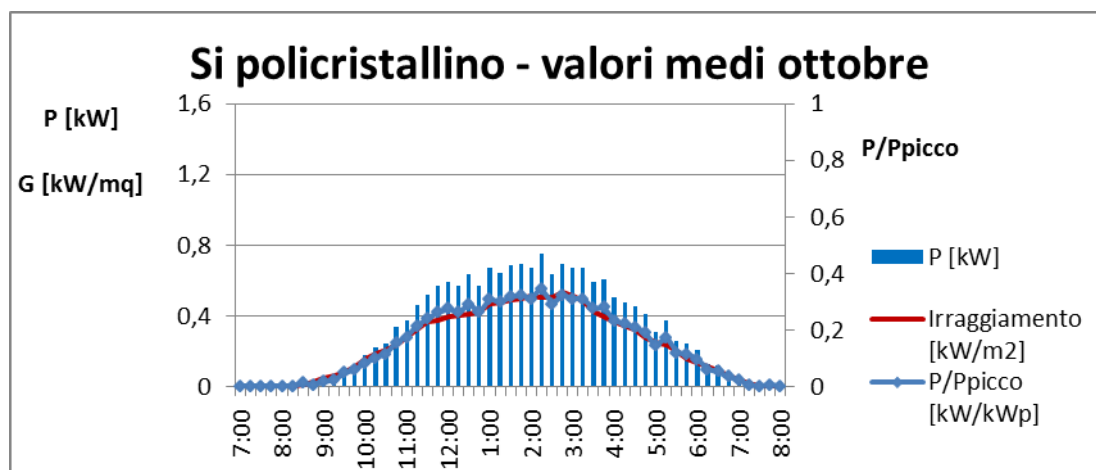


Figura 14 - Potenza, Irraggiamento e P/Picco medi giornalieri di ottobre (impianto Si policristallino)

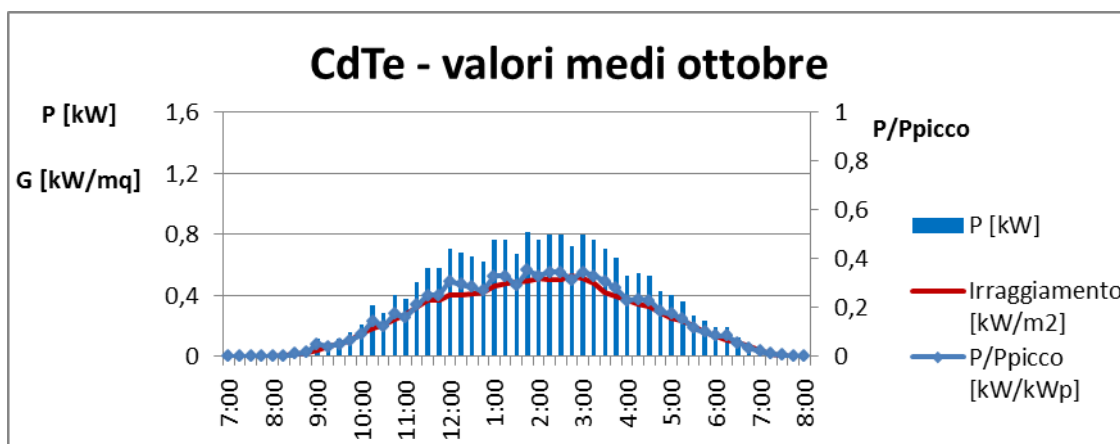


Figura 15 - - Potenza, Irraggiamento e P/Picco medi giornalieri di ottobre (impianto CdTe)

Le prestazioni medie giornaliere ricavate dai precedenti profili, valutate nei due diversi periodi di settembre e ottobre per i tre impianti considerati, vengono confrontate in tabella.

Mese	Settembre			Ottobre		
Impianto	Si mono	Si poli	CdTe	Si mono	Si poli	CdTe
P nominale [kWp]	2,4	2,16	2,24	2,4	2,16	2,24
$\eta$ nominale	19	14,7	10,4	19	14,7	10,4
Superficie totale [m <sup>2</sup> ]	12,6	14,7	20,16	12,6	14,7	20,16
Energia AC [kWh/day]	10,6	8,8	10,4	5,0	4,3	4,9
[kWh/ (m <sup>2</sup> day)]	0,84	0,60	0,52	0,40	0,29	0,24
Yf [h/day]	4,4	4,1	4,5	2,1	2,0	2,1
Yr [h/day]	5,4			3,1		
PR giornaliero	0,81	0,76	0,83	0,66	0,64	0,67
$\eta$ giornaliero	0,155	0,111	0,095	0,126	0,094	0,077

Tabella 2 - Valori medi giornalieri a confronto

Appare chiaro come l'impianto abbia lavorato in maniera più performante nelle giornate di settembre, per la maggior parte serene. I rendimenti del mese di ottobre sono negativamente influenzati dalla maggior variabilità delle condizioni climatiche registrate e dal fermo impianto verificatosi.

È anche evidente come, pur avendo una potenza installata maggiore, l'impianto con moduli HIT-N240SE10 Panasonic (monocristallini rivestiti con un sottile film di silicio amorfo) ha richiesto l'occupazione di una superficie minore rispetto agli impianti con moduli policristallini 240P CNPV e con moduli al tellururo di cadmio FS-380 First Solar. Questi ultimi con un rapporto di 0,11 kWp/m<sup>2</sup> sono risultati essere i più penalizzati sotto questo punto di vista. Andando a vedere l'effettiva produzione di energia elettrica per m<sup>2</sup> occupato, si evince come nel caso del primo impianto sia stata utilizzata in maniera migliore la superficie del tetto a disposizione

Gli impianti che hanno fatto registrare un maggior PR sono risultati essere l'impianto con moduli al CdTe e l'impianto con moduli in Si monocristallino, con valori medi superiori all'80% nei giorni di settembre. Le particolari condizioni verificatesi nel mese di ottobre (precipitazioni e fermo impianti) si riflettono in una diminuzione di PR.

## Note

Per quanto riguarda gli altri impianti presenti si sono riscontrati problemi relativamente all'utilizzo dei dati registrati. È stato infatti verificato che periodicamente nel database vengono registrate piccole produzioni di energia in realtà non verificatesi (alle volte persino durante le ore notturne). Il dato di potenza in uscita dall'inverter assume valori diversi da zero e il totalizzatore di energia registra tale produzione.

Questo problema è tanto più accentuato per gli impianti con minore potenza di picco installata, soprattutto nelle giornate piovose dove non ci si aspetterebbe una produzione di energia. Analizzandone le prestazioni ci si accorge infatti di come nei giorni con poco irraggiamento (giornate coperte o con precipitazioni) risultino valori di  $Y_f$  (ore equivalenti di funzionamento pari alla potenza nominale) decisamente sovrastimati che si riflettono in PR e rendimenti errati.

A titolo esemplificativo viene riportato quanto registrato il 30 settembre:

Ora	Impianto	Potenza AC [kW]	Energia AC [kWh]
04:30	INV4	0	793,7
04:45	INV4	0,399902	793,8
05:00	INV4	0	793,8
05:15	INV4	0	793,8
05:30	INV4	0	793,8
05:45	INV4	0	793,8
06:00	INV4	0	793,8
06:15	INV4	0	793,8
06:30	INV4	0	793,8
06:45	INV4	0	793,8
07:00	INV4	0	793,8
07:15	INV4	0	793,8
07:30	INV4	0,400146	793,9
07:45	INV4	0	793,9
08:00	INV4	0	793,9
08:15	INV4	0	793,9
08:30	INV4	0	793,9
08:45	INV4	0	793,9

Ora	Impianto	Potenza AC [kW]	Energia AC [kWh]
09:00	INV4	0	793,9
09:15	INV4	0	793,9
09:30	INV4	0	793,9
09:45	INV4	0	793,9
10:00	INV4	0	793,9
10:15	INV4	0	793,9
10:30	INV4	0	793,9
10:45	INV4	0	793,9
11:00	INV4	0	793,9
11:15	INV4	0	793,9
11:30	INV4	0,399902	794
11:45	INV4	0	794
12:00	INV4	0	794
12:15	INV4	0,399902	794,1
12:30	INV4	0,399902	794,1
12:45	INV4	0	794,2
13:00	INV4	0,399902	794,3
13:15	INV4	0	794,3

Tabella3 – Errori di registrazione in banca dati

## **Conclusioni e sviluppi futuri**

Il laboratorio HEnergia costituisce un'ottima risorsa per valutare efficacia, efficienza e oneri gestionali delle tecnologie presenti. La gestione di impianti per la produzione di energia da fonte rinnovabile richiede infatti ancora diverse fasi di studio e analisi soprattutto relativamente alle reali condizioni operative e capacità produttive di questi sistemi, alle problematiche legate a manutenzione e mantenimento delle prestazioni, alla quantificazione del ritorno economico legato a questa tipologia di impianti.

Per effettuare corrette valutazioni prestazionali e di confronto tra le diverse tecnologie è necessario partire da una procedura ben definita e appropriata; anche se sono stati riscontrati errori relativi al conteggio di energia prodotta da parte del sistema di acquisizione dati in alcune situazioni, è stato comunque possibile effettuare delle prime considerazioni per alcuni sistemi fotovoltaici utilizzando i dati al momento acquisiti e disponibili nel database che gestisce tali informazioni.

Parlando di prestazioni dei vari impianti non si possono trascurare i diversi aspetti economici legati alla produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile. Un'importante discriminante per la scelta di utilizzare una certo tipo di tecnologia piuttosto che un'altra è sicuramente il ritorno economico dell'investimento. Ecco quindi come impianti meno performanti ma caratterizzati da costi di investimento, gestione, manutenzione e tempi di ritorno economico minori, acquistano competitività rispetto ad impianti ad alte prestazioni ma costosi o problematici da gestire.

La campagna di sperimentazione avviata presso il laboratorio permetterà di approfondire al meglio queste tematiche.

## **Bibliografia**

C. Anzalone, D. Giunchi, M. Pellegrini, A. Bianchini, C. Saccani, “Laboratorio di ricerca e sviluppo sulle energie rinnovabili”, Impiantistica Italiana, N.1 gennaio-febbraio 2010.

L. M. Maccioni, G. Benvenuti, “Progettazione di impianti fotovoltaici”, Dario Flaccovio Editore, 2013.

F Groppi, C. Zuccaro, “Impianti solari fotovoltaici a norme CEI”, Editoriale Delfino, 2011.

A. Caffarelli, G. de Simone, M. Stiza, A D’Amato, “Sistemi solari fotovoltaici: progettazione e valutazione economica in Conto Energia”, Maggioli Editore, 2009.

F. Lasnier, T.G. Ang “Photovoltaic Engineering Handbook”, Adam Hilger, 1990

Dati raccolti e messi a disposizione dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università di Bologna.

Dati raccolti e messi a disposizione da Hera S.p.A.