

**POLITECNICO DI MILANO**

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica



**CARATTERIZZAZIONE DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI CON RECUPERO  
TERMICO COMMERCIALI**

Relatore: Prof. Giampaolo MANZOLINI

Tesi di Laurea di:

Claudia BACCHI MELLINI  
Matr. 783853

Anno Accademico 2013 – 2014



## Ringraziamenti

Desidero ringraziare per la disponibilità, il grande interesse e gli interessanti spunti di riflessione e di confronto a livello pratico-ingegneristico legati ad uno studio innovativo, che mi sono risultati assolutamente fondamentali, il professor Giampaolo Manzolini, insieme alla collaborazione ed aiuto dei dottorandi Gioele di Marcoberardino e Stefano Foresti.

Reputo inoltre sia stato indispensabile il sostegno sotto tutti i punti di vista prestatomi, durante tutto il mio percorso di studi universitario e nonostante le difficoltà dell'ultimo periodo, da mia madre Anna Maria Bernasconi, che perciò per tale motivo ringrazio e a cui mi presto a dedicare il lavoro qui presente da me svolto.



## Sommario

Ringraziamenti .....	1
Indice delle tabelle.....	1
Indice delle figure .....	1
Sommario .....	1
Abstract.....	1
Parole chiave.....	1
Key words.....	1
Capitolo 1 .....	1
Introduzione.....	1
Capitolo 2 .....	3
Descrizione impiantistica .....	3
Capitolo 3 .....	13
Metodologia.....	13
Radiazione: localizzazione spaziale e temporale .....	13
Analisi e misura delle diverse componenti generali .....	16
Confronto tra i diversi valori di radiazione e scelta del valore esatto .....	21
Analisi delle prestazioni (lato termico): procedura di calcolo e variabili di interesse	28
Rendimento ottico .....	28
Approssimazioni applicate nello schema di impianto quanto allo studio di prestazioni: caso pannello singolo - pannello doppio .....	31
Rendimento: definizioni e variabili considerate. ....	32
Calcolo dei rendimenti. ....	34
Analisi della metodologia applicata ai dati scelti ed estratti nel calcolo delle prestazioni: .....	36
caso run-time e caso a posteriori (non istantaneo) da dati meteo. ....	36

Metodologia nella verifica della “esattezza” delle prestazioni dei collettori: incertezza nella misura.....	36
Calcolo dell’incertezza.....	36
Calcolo dell’incertezza nel caso RUN-TIME.....	36
Calcolo dell’incertezza nel caso non istantaneo .....	42
Capitolo 4 .....	47
Risultati.....	47
Analisi di stabilità e caratteristica del rendimento in funzione delle condizioni ambiente e della portata.....	47
Stazionarietà termica. ....	48
Stazionarietà della radiazione. ....	49
Stazionarietà della radiazione quanto ai dati forniti dalla stazione meteo. ....	49
Stazionarietà della radiazione( criterio esterno rispetto agli errori forniti dal sistema di acquisizione). ....	50
Stazionarietà della temperatura ambiente.....	51
Stazionarietà quanto a portata costante nel circuito di immissione (pompa di alimentazione).....	52
Sovrapposizione tra fasce di stazionarietà.....	53
Operazioni sperimentali effettuate sui pannelli influenzanti le prestazioni degli stessi.....	56
Analisi dei risultati. ....	56
Risultati ottenuti dall’analisi sperimentale. ....	66
Analisi sperimentale di prestazione legata a stabilità (costanza) quanto a portata di fluido circolante nel sistema. ....	66
Capitolo 5 .....	73
Inferenza statistica .....	73
Inferenza statistica nel caso RUN-TIME. ....	73
Analisi sperimentale (valori medi giornalieri per il caso RUN-TIME) .....	77
Analisi sperimentale 2 (valori istantanei giornalieri per il caso RUN-TIME). ....	79
Inferenza statistica nel caso non istantaneo.....	79

Analisi sperimentale(valori medi giornalieri):.....	79
Capitolo 6.....	83
Confronto prestazioni elettriche pannelli fotovoltaici standard e pannelli a recupero termico.....	83
Capitolo 7.....	87
Conclusioni.....	87
Allegati: parte impiantistica.....	91
Allegato 1: Schema di impianto foto termico da Labview.....	91
Allegato 2: Vista complessiva superficie del tetto ricoperta da pannelli fotovoltaici, foto termici, termici.....	91
Allegato 3: aleo_s19 sol (pannelli fotovoltaici).....	91
Allegato 4: Data sheet pannelli foto termici Fototherm Series Cs.....	91
Allegati parte inferenza statistica.....	101
Allegato 1: Tabella di riferimento dei quantili di una distribuzione normale standard.....	101
Nomenclatura.....	105
Bibliografia.....	109





## Indice delle tabelle

Tabella 3. 1 Errori assoluti medi giornalieri per i pannelli F74D, F6F1, F550 tra la Pel, in e Ppan, i .....	26
Tabella 4. 1 Analisi delle prestazioni giornaliere nel caso delle due diverse metodologie .....	57
Tabella 4. 2 Valori di incertezza istantanei del rendimento da costruttore e del rendimento termico per pannelli singolo e doppio .....	61
Tabella 4. 3 Valori di incertezza non istantanei del rendimento da costruttore e del rendimento termico per pannelli singolo e doppio .....	65
Tabella 5. 1 Analisi di inferenza statistica per valori medi giornalieri di rendimento termico e rendimento da costruttore per il caso RUN-TIME .....	78
Tabella 5. 2 Analisi di inferenza statistica per valori medi giornalieri di rendimento termico e rendimento da costruttore per il caso non istantaneo. ....	80
Tabella 6. 1 Analisi delle energie complessive giornaliere generate (Wh): solo elettrica per il pannello A 4.2 ed elettrica e termica per il pannello A 6.1- A6.2 .....	85



## Indice delle figure

Figura 2. 1 Schematizzazione della giunzione p-n di un diodo (Zondag et al. 2003) .....	4
Figura 2. 2 Vari concetti di collettore: PVT sottovuoto, PVT a canale, PVT a flusso libero, PVT a due assorbitori (tipo isolato) (Zondag et al., 2003) .....	10
Figura 3. 1 Analisi dell'andamento annuale della declinazione solare .....	15
Figura 3. 2 Radiometro globale .....	17
Figura 3. 3 Radiometro diretto senza puntamento o eliofanometro .....	18
Figura 3. 4 Andamento dell'errore assoluto e dell'errore relativo quanto a differenza tra DNI calcolata e RadDiretta misurata dalla stazione meteo (3 settembre 2013).....	22
Figura 3. 5 Andamento dell'errore assoluto e dell'errore relativo quanto a differenza tra DNI calcolata e RadDiretta misurata dalla stazione meteo (12 novembre 2013)....	22
Figura 3. 6 Valutazione dell'errore assoluto tra i diversi valori di radiazione solare a disposizione (3 settembre 2013). .....	24
Figura 3. 7 Valutazione dell'errore assoluto tra i diversi valori di radiazione solare a disposizione (12 novembre 2013).....	24
Figura 3. 8 Valutazione per tre pannelli fotovoltaici dell'impianto (F74D,F550,F61F) della differenza tra potenza elettrica misurata dall'inverter e potenze elettriche calcolate in Watt tramite i diversi valori di radiazione solare disponibili (3 settembre 2013). .....	26
Figura 3. 9 Valutazione dell'errore assoluto complessivo per i tre pannelli nel caso del confronto tra potenza elettrica misurata e potenze elettriche misurate in Watt con i diversi valori di radiazione (3 settembre 2013) .....	27
Figura 3. 10 Valutazione per tre pannelli fotovoltaici dell'impianto (F74D,F550,F61F) della differenza tra potenza elettrica misurata dall'inverter e potenze elettriche calcolate in Watt tramite i diversi valori di radiazione solare disponibili (12 novembre 2013) .....	27
Figura 3. 11 Valutazione dell'errore assoluto complessivo per i tre pannelli nel caso del confronto tra potenza elettrica misurata e potenze elettriche misurate con i diversi valori di radiazione (12 novembre 2013).....	28
Figura 4. 1 Analisi percentuale fasce orarie stabili dal punto di vista termico. ....	49
Figura 4. 2 Analisi fasce orarie stabili quanto alla radiazione solare (Gtotale 1 calcolata).....	51

Figura 4. 3 Analisi percentuale fasce orarie stabili quanto a temperatura ambiente misurata dalla stazione meteo.....	52
Figura 4. 4 Esempio (12 marzo 2014) di prestazioni valutate per pannello singolo con valori stabili e non stabili nel caso di una giornata tipo: evidenza di deviazione dal valore opportuno stimato esatto (caso stazionario) dei valori non stazionari. ....	55
Figura 4. 5 Pannello singolo: 5 e 12 marzo analisi delle differenze tra caso RUN-TIME e NON ISTANTANEO quanto a rendimento termico e rendimento da costruttore.....	60
Figura 4. 6 Pannello doppio: 5 e 12 marzo analisi delle differenze tra caso RUN-TIME e NON ISTANTANEO quanto a rendimento termico e rendimento da costruttore.....	60
Figura 4. 7 Esempio della relazione tra la pendenza delle curve di prestazioni termiche dei pannelli foto termici e il valore della portata di fluido circolante nel sistema: 6 marzo 2014.....	67
Figura 4. 8 Esempio della relazione tra la pendenza delle curve di prestazioni termiche dei pannelli foto termici e il valore della portata di fluido circolante nel sistema: 12 marzo 2014.....	68
Figura 4. 9 Analisi delle differenze di temperatura all’uscita del pannello singolo il 6 marzo 2014 nel caso in cui si ipotizzi il rendimento termico pari a quello del costruttore (t out ip) e nel caso reale, ove rendimento del costruttore e rendimento termico differiscono.....	69
Figura 4. 10 Analisi del transitorio di stagnazione a livello della curva di prestazioni termiche del pannello doppio il 5 marzo 2014 .....	71
Figura 4. 11 Analisi del transitorio di stagnazione a livello della curva di prestazioni termiche del pannello doppio il 12 marzo 2014. ....	72
Figura 6. 1 Analisi andamento della potenza elettrica nel periodo invernale (5 novembre 2013).....	85
Figura 6. 2 Analisi andamento della potenza elettrica nel periodo primaverile (5 marzo 2014). ....	86

## Sommario

In relazione allo studio di un impianto costituito da pannelli fotovoltaici a recupero termico commerciali, innovativi sul mercato e mai valutati approfonditamente dal punto di vista sperimentale, si è voluto darne una caratterizzazione specifica per consentire ad operatori esterni di conoscerne a priori il funzionamento e le peculiarità (sia quanto alle loro potenzialità, sia quanto ad eventuali problemi riscontrati).

Il circuito in studio è dotato di molteplici strumenti di misurazione sia per un'analisi delle condizioni climatiche (stazione meteo), sia per il rilevamento di tutte le grandezze termiche ed elettriche necessarie per calcolare le prestazioni di tali pannelli, in svariate situazioni di partenza e per sviluppare considerazioni quanto all'andamento dei rendimenti stessi a livello giornaliero singolo e per paragoni degli stessi in diversi periodi dell'anno.

Si è potuto riscontrare che le curve di prestazioni reali non differiscono in modo significativo dai valori ipotizzati e verificati dallo studio del costruttore e fornitore dei pannelli; ci si è però dovuti interfacciare con la presenza di incertezze nelle misurazioni che hanno inciso comunque sui risultati, al punto da doverne tenere conto nell'elaborazione del metodo di studio proposto. Nonostante le limitazioni del sistema in esame, quanto soprattutto alla parte strumentale, si è verificato che le prestazioni dei pannelli fotovoltaici a recupero termico offrono una loro buona auspicabilità di utilizzo anche rispetto ai tradizionali, sia a livello elettrico che termico appunto, per prospettive future, prevalentemente per uso domestico.



## Abstract

In relation to the study of a system consisting of photovoltaic panels with thermal recovery in commercial, innovative on the market and never fully evaluated by the experimental point of view, we wanted to give a specific characterization to enable external operators to get to know before the operation and peculiarities (both as to their potential, both as to any problems encountered).

The circuit under study is with various measuring instruments for both an analysis of weather conditions (weather station), and for the detection of all the variables needed to calculate thermal and electrical performance of these panels, in various situations and to develop considerations regarding the performance of yields on a daily individual and for comparisons of the same in different periods of the year.

It was found that the curves of empirical performance does not differ significantly from the values assumed and verified by the study of the manufacturer and supplier of the panels; there is, however, due to interface with the presence of uncertainties in the measurements that have affected the results in any case, to the point of having to take into account in developing the method proposed study. Despite the limitations of the test system, especially as the instrumental part, it was verified that the performance of solar panels to heat recovery offer a good desirability of their use even compared to traditional, on both electrical and thermal point of view, for future prospects, mainly for domestic use.





## Parole chiave

- pannello foto-termico (o fotovoltaico a recupero termico);
- radiazione solare;
- calore;
- prestazioni;
- incertezza;
- inferenza statistica.

## Key words

- Photo-thermal panel (photovoltaic or thermal recovery);
- Solar radiation;
- Heat;
- Performance;
- Tolerance of measurement;
- Statistical inference.



# Capitolo 1

## Introduzione

Il Dipartimento di Energia dell'Istituto Politecnico di Milano ha consentito la valutazione di pannelli fotovoltaici a recupero termico, con moduli FOTOTHERM, installati sul piano terminale scoperto, a falda orizzontale, dell'edificio che ospita tale Facoltà di studio.

Si tratta di pannelli fotovoltaici, quindi atti alla produzione di energia elettrica dalla fonte solare, con la peculiarità di un superamento delle prestazioni standard di un impianto fotovoltaico tradizionale, per venire a produrre in modo combinato calore, ovvero il risultato atteso di un impianto termico semplice; le sorgenti di origine di quest'ultimo sono offerte sia dalla radiazione solare, sia dal recupero termico di calore in parte rappresentato dalla quota parte di radiazione non convertita in potenza elettrica e in parte minima disperso dal processo foto-elettrico stesso.

Il motivo che ha spinto a testare questi sistemi innovativi nasce dalla disponibilità di fruizione di un tetto, che presenta da un certo periodo numero diciotto pannelli fotovoltaici e numero tre pannelli termici, asserviti sia a studi sperimentali (il lato termico infatti non produce calore ad un livello sufficiente per consentirne lo sfruttamento diretto in loco, conseguenza per cui viene disperso), sia per l'utilizzo diretto sul posto dell'energia elettrica prodotta dai primi. Questa variegata attività di base ha indotto ad allargare il campo ponendo l'attenzione anche sui sistemi ibridi sopra citati, ove le potenze generate sono sfruttate in modo analogo ai precedenti.

In particolare si è puntualizzata l'analisi di quattro pannelli ibridi, facenti parte di un unico circuito, di cui numero due sono posti in serie e numero due sono valutati singolarmente (di essi nello specifico numero uno non è stato dotato di alcun strumento di misurazione, ma viene fatto operare come a sé stante).

Le verifiche devono necessariamente tenere in conto l'obbligo di interfacciarsi con le condizioni climatiche esterne, che ne influenzano le prestazioni e di cui la presenza del sole ne è "base vitale- operativa"; si fa perciò presente che di conseguenza i dati valutati sono riferiti solo a quelle condizioni ambientali favorevoli (giornate molto soleggiate con quasi completa assenza di nubi per evitare dispersioni della radiazione), tenendo comunque presente che i pannelli possono in ogni caso operare anche in stato non ottimale. Le fasce orarie

studiate sono quelle per cui le realtà sopra indicate vengono ad essere più evidenti.

Date queste premesse, il lavoro consta in una “caratterizzazione di impianti fotovoltaici a recupero termico”, i cui risultati sono esposti nei capitoli seguenti.

## Capitolo 2

### Descrizione impiantistica

(riferimento ad allegati parte impiantistica: allegato 1 per impianto fotovoltaico a recupero termico, allegato 2 per schema di impianto complessivo)

L'energia solare può essere convertita in vari modi :

in un sistema fotovoltaico, solo una piccola frazione di radiazione assorbita dal pannello viene convertita in energia elettrica . Vale a dire , una sottosezione di radiazione solare assorbita viene utilizzato dalle cellule fotovoltaiche per generare elettricità , lasciando la maggior parte della radiazione trasformarsi in calore. Ciò comporta la diminuzione di efficienza del modulo causa di un aumento della temperatura delle celle fotovoltaiche. In particolare un modulo fotovoltaico è un dispositivo optoelettronico, composto da celle fotovoltaiche, in grado di convertire l'energia solare incidente in energia elettrica mediante effetto fotovoltaico, tipicamente impiegato come generatore di corrente in un impianto fotovoltaico. Può essere meccanicamente preassemblato a formare un pannello fotovoltaico, pratica caduta in disuso con il progressivo aumento delle dimensioni dei moduli, che ne hanno di fatto incorporato le finalità. E' il caso della maggior dei pannelli della struttura di riferimento presenti sul tetto , come si può vedere dallo schema di impianto (in particolare i pannelli sono i seguenti: A 5.1, A 5.2, A 3.1, A 3.2, A 3.3, A 4.1, A 4.2, A 4.3, A 4.4, A 4.5, A 1.1, A 1.2, A 1.3, A 2.1, A 2.2, A 2.3, A 2.4, A2.5 ). Nello specifico il meccanismo con cui il sistema opera, noto come effetto foto voltaico, è il seguente: quando una radiazione elettromagnetica (come la radiazione solare, fonte energetica del sistema in studio) investe un materiale può, in certe condizioni, cedere energia agli elettroni più esterni degli atomi del materiale e, se questa è sufficiente, l'elettrone risulta libero di allontanarsi dall'atomo di origine. L'assenza dell'elettrone viene chiamata in questo caso lacuna. L'energia minima necessaria all'elettrone per allontanarsi dall'atomo (passare quindi dalla banda di valenza che corrisponde allo stato legato più esterno alla banda di conduzione ove non è più legato) deve essere superiore alla banda proibita del

materiale. Il meccanismo di funzionamento si basa sull'utilizzo di materiali semiconduttori, il più utilizzato dei quali è attualmente il silicio. Infatti, nel caso di materiali isolanti, il band gap o Energy gap risulta troppo elevato per poter essere eguagliato dall'energia del fotone incidente, mentre per i materiali conduttori l'energia del band gap è piccolissima, quindi a temperatura ambiente c'è una continua creazione e distruzione di coppie elettrone-lacuna e l'energia necessaria alla creazione viene fornita direttamente dalle fluttuazioni termiche. Quando un flusso luminoso investe invece il reticolo cristallino di un semiconduttore, si verifica la transizione in banda di conduzione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un egual numero di lacune che passa in banda di valenza. Si rendono pertanto disponibili portatori di carica, che possono essere sfruttati per generare una corrente. Per realizzare ciò è necessario creare un campo elettrico interno alla cella, stabilendo un eccesso di atomi caricati negativamente (anioni) in una parte del semiconduttore ed un eccesso di atomi caricati positivamente (cationi) nell'altro. Questo meccanismo si ottiene mediante drogaggio del semiconduttore che generalmente viene realizzato inserendo atomi del terzo gruppo come ad esempio il boro e del quinto gruppo, ovvero il fosforo, per ottenere rispettivamente una struttura di tipo p (con un eccesso di lacune) ed una di tipo n (con un eccesso di elettroni).

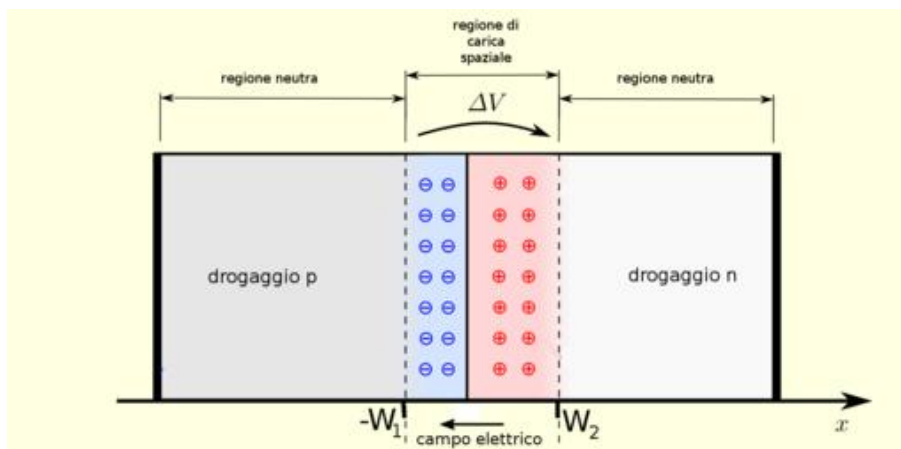


Figura 2. 1 Schematizzazione della giunzione p-n di un diodo (Zondag et al. 2003)

Lo strato drogato con elementi del quinto gruppo, che hanno cinque elettroni esterni (o di valenza) contro i tre di quelli del terzo gruppo, presenta una carica negativa debolmente legata, costituita da un elettrone in eccesso per ogni atomo drogante. Nello stesso modo, nello strato drogato con elementi del terzo gruppo, che hanno invece tre elettroni esterni, si ottiene un eccesso di

## Capitolo 2

carica positiva, data dalle lacune degli atomi droganti. Il primo strato, a carica negativa, viene generalmente chiamato strato n, l'altro, a carica positiva, strato p, la zona di separazione è detta giunzione p-n. Va sottolineato che il materiale risulta essere globalmente neutro, dato che il drogaggio viene realizzato con atomi neutri (non ioni), quello che cambia è l'eccesso di elettroni nei legami covalenti, da una parte, e il difetto degli stessi dall'altra. Mettendo a contatto i due materiali così ottenuti, si viene a verificare un flusso di diffusione di elettroni dalla zona n alla zona p e di lacune in direzione opposta, fino al raggiungimento dell'equilibrio elettrostatico, che determina un eccesso di carica positiva nella zona n, un eccesso di elettroni nella zona p e una regione intermedia detta regione di svuotamento. Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo (definito come tensione di built-in) che si estende a cavallo della regione di svuotamento, generalmente spessa pochi micrometri. A questo punto, se viene illuminata con fotoni (provenienti dal sole) la giunzione dalla parte n, vengono a crearsi delle coppie elettrone-lacuna sia nella zona n che nella zona p. Il campo elettrico di built-in permette di dividere gli elettroni in eccesso (ottenuti dall'assorbimento dei fotoni da parte del materiale) dalle lacune, e li spinge in direzioni opposte gli uni rispetto agli altri. Gli elettroni, una volta oltrepassata la zona di svuotamento non possono quindi più tornare indietro, perché il campo impedisce loro di invertire la marcia. Connettendo la giunzione con un conduttore esterno, si otterrà un circuito chiuso nel quale il flusso di elettroni parte dallo strato n, a potenziale maggiore, verso lo strato p, a potenziale minore fintanto che la cella resta esposta alla luce. Ciò che si viene ad utilizzare nei pannelli fotovoltaici a cui si fa riferimento è proprio l'energia che consente di soddisfare il gap all'interno della cella per consentire produzione elettrica; la restante parte di energia risulta invece essere dispersa;

in un sistema solare termico, il pannello solare termico (detto anche collettore solare) è un dispositivo atto alla conversione della radiazione solare in energia termica e al suo trasferimento, per esempio, verso un accumulatore termico per un uso successivo, tipicamente sotto forma di acqua calda, riscaldamento e in alcuni casi energia elettrica. In genere è utilizzato per impianti ACS, ovvero per la produzione di acqua calda sanitaria, oppure per il riscaldamento tramite l'utilizzo di un impianto radiante a pavimento per il riscaldamento degli ambienti. Il principio è basato su di un bilancio termico che trasforma la radiazione, come calore, proveniente dal sole, in calore del fluido termovettore che circola nell'impianto. E' necessario però tenere conto anche una serie di fattori che sono parti costituenti della struttura del pannello e che ne influenzano il bilancio energetico a livello termico: questi fattori sono dovuti specialmente ai coefficienti di scambio termico tra il fluido e i tubi in cui esso

circola (sia da un punto di vista di conduzione di calore, sia da un punto di vista di convezione di calore; questo a livello interno) e alle dispersioni, in particolare a livello ottico, che si vengono ad avere sulla superficie esterna del pannello e che riducono l'entità della radiazione incidente; tra questi ultimi particolare rilievo oltre al rendimento ottico stesso, è assunto dal fattore di rimozione del calore FR;

in un sistema in cui può essere utilizzata per la produzione di energia elettrica direttamente o per produrre calore : la combinazione di fotovoltaico e termico ( PV / T ) è particolarmente interessante per la sua efficienza nel convertire direttamente l'energia solare in energia elettrica e calore , contemporaneamente . Un modulo fotovoltaico / termico ( PV / T ) comprende principalmente un pannello fotovoltaico e un collettore solare termico , formando i componenti principali di un impianto fotovoltaico / termico ( PV / T )

L'oggetto di studio è rappresentato da questa ultima tipologia di impianti, in cui l'interesse è rivolto in particolare a pannelli a circolazione naturale o forzata di aria o altro fluido ( come nel caso preso in esame acqua e glicole al 33 % v / v ) che può essere utilizzata anche per raffreddare celle fotovoltaiche (come quelle usate in tale caso), il fluido termovettore riscalda il sistema termico fotovoltaico ( PV / T ). Il sistema PV / T integra dispositivi di estrazione di calore dalla cella PV per ridurre la temperatura del modulo fotovoltaico e per aumentare la produzione di elettricità e calore utile simultaneamente , aumentando così l'efficienza complessiva del sistema PV / T .

I tipi di materiale di cui è costituita la cella PV influenzano lo stato di funzionamento del sistema PV / T :

- Silicio cristallino;
- Silicio policristallino;
- Film sottili in silicio amorfo (recentemente sfruttati).

Si prendono in considerazione moduli monocristallini (o cristallini) : sono costituiti da un cristallo singolo di silicio, che ha un reticolo cristallino continuo, senza interruzioni (bordi di grano) in tutto il solido. Può essere intrinseco, cioè contenente solo silicio ultra-puro, o drogato mediante l'aggiunta di piccolissime quantità di altri elementi che permettono di modificare in modo controllato le



sue proprietà di semiconduttore. Il drogaggio in genere aumenta la conducibilità del semiconduttore. Un drogaggio pesante può fargli assumere proprietà elettriche simili a quelle di un metallo "semiconduttore degenere". Con drogaggio di tipo n ci si riferisce al fatto che l'atomo drogante ha un elettrone in più di quelli che servono per soddisfare i legami del reticolo cristallino e tale elettrone acquista libertà di movimento all'interno del semiconduttore. Le quantità di elementi droganti utilizzate per effettuare il drogaggio sono, in termini percentuali, bassissime: si parla di impurità elettroniche in quanto tali impurità sono in grado di modificare le proprietà elettroniche, ma non le proprietà chimiche del semiconduttore. L'entità del drogaggio si misura in *atomi/cm<sup>3</sup>*. Riferendosi al silicio, il semiconduttore più utilizzato, che è composto da atomi tetravalenti, il drogaggio di tipo n può essere effettuato mediante atomi di fosforo o arsenico.

Dal riferimento all'allegato 2 della parte impiantistica si vede che i pannelli in studio fanno parte del circuito foto termico ed in particolare si analizzano l'A 6.1 ( o CF99) e l'A 6.2 (o F726): si tratta di pannelli aleo Serie AL 245 con potenza nominale di riferimento di 245 W della Tekneco. Sono realizzati con un telaio in alluminio anodizzato idoneo a soddisfare elevati standard di qualità per resistenza alla corrosione.

Inoltre la combinazione di vetro antiriflesso, pellicole incorporamento altamente trasparente e connettori di celle speciali significa che i moduli fanno uso particolarmente efficiente della luce solare. Connettori di cellule speciali aumentano le prestazioni ancora di più: la superficie strutturata della "string raccolta della luce" (LHS) dirige più luce alle celle solari. Ciò significa che i moduli aleo producono una grande quantità di uscita su una piccola quantità di spazio. I moduli garantiscono la massima trasparenza, grazie al sofisticato utilizzo del vetro solare 3,2 millimetri di spessore con uno strato di plastica trasparente (pellicola EVA). Il vetro antiriflesso utilizzato consente a più luce di penetrare nel modulo grazie al suo rivestimento sottile sulla superficie di vetro. Il film incorporamento EVA possiede migliori proprietà di trasparenza, in particolare nello spettro ultravioletto. Ciò migliora le prestazioni di ogni modulo nel campo operativo. A livello della struttura il telaio è in alluminio così da consentire la resistenza alla torsione dei moduli; esso non è "avvitato" sul modulo stesso, ma risulta invece essere costruito utilizzando dei connettori forma-montaggio. Questo metodo fornisce la massima stabilità. I pannelli presentano anche fori di drenaggio nei telai di 50 millimetri di spessore, in modo che l'acqua stagnante possa defluire.

Il sistema PV / T ha una serie di vantaggi :

- Doppio effetto utile : il sistema è integrato in grado di generare elettricità e calore ;
- Flessibile ed efficiente: con la limitata superficie del tetto ( nel caso in esame si considerano pannelli di  $1,58 \text{ m}^2$  ciascuno e si hanno quattro pannelli nel sistema foto - termico) ;
- Applicazione multipla : il calore generato può essere utilizzato non solo per il riscaldamento ma anche per il raffreddamento ( nel caso preso in considerazione il calore generato è ottenuto in un intervallo di temperatura troppo bassa per cui è usato solo per studio sperimentale; il calore viene disperso all'esterno grazie a un ventilatore a circolazione forzata ) ;
- Economico e pratico : il sistema PV / T è semplice da essere adattato o integrato in diversi tipi di edifici con rimodellamento insignificante.

I sistemi PV/T possono variare nel design per adattarsi a diverse applicazioni che vanno dai sistemi ad acqua calda PV / T, alle strutture fotovoltaiche ventilate, ai concentratori PV raffreddati attivamente. La domanda termica richiesta può essere soddisfatta scegliendo appropriati sistemi PV/T. Esistono diverse forme di impianti PV/T che dipendono dal tipo di modulo PV così come anche dal suo design e dalla tipologia di fluido di lavoro per estrazione del calore.

Questi sistemi possono essere classificati come sotto riportato:

- Collettori PV/T a liquido;
- Collettori PV/T ad aria;
- PV ventilati con accumulo di calore;
- Concentratori PV/T.

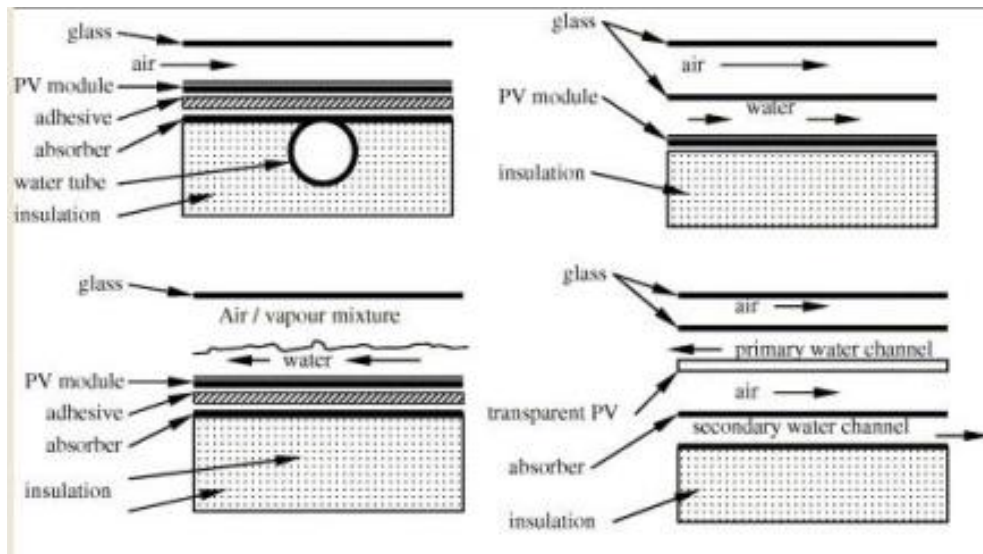
Indipendentemente dal design e dalla tipologia operativa "interna" del collettore, l'assorbitore di ciascun collettore PV/T è fornito di un rivestimento esterno rappresentato da una copertura di vetro, utile per ridurre le perdite termiche. Nel caso in cui sia presente una copertura di questo tipo (come nel caso in studio) il collettore viene definito "smaltato"; collettori di questo tipo hanno una riduzione delle perdite termiche e perciò possono raggiungere temperature di fluido termovettore più elevate. Per apparecchiature da medie fino ad alte temperature questo migliora significativamente la resa termica annua. Collettori smaltati evidenziano alte temperature di stagnazione che possono essere critiche per alcuni tipi di cella PV (rischio di ingiallimento e

delaminazione) con conseguenti “punti bollenti”. Inoltre, diodi di bypass possono surriscaldarsi a causa di un ulteriore isolamento. Le perdite di riflessione sulla copertura a vetro riducono ulteriormente le prestazioni elettriche. L’aumento dei livelli di temperatura abbassa il rendimento elettrico. Bisogna prestare attenzione però che per i moduli di riferimento il campo termico relativo non raggiunge temperature elevate e i valori di stagnazione non si spingono ad alti valori.

I collettori PV/T a liquido (quelli in esame fanno riferimento a tali specifiche) sono il risultato di una ricerca legata ad una tecnologia ibrida PV/T. Una delle modifiche consta nel miglioramento della performance del modulo PV attraverso la circolazione di acqua per estrarre calore usando l’acqua stessa come refrigerante. Questi collettori PV/T sono simili ai collettori piani tradizionali; un assorbitore realizzato con un tubo a serpentina o una serie di montanti paralleli viene applicato, su cui un PV è stato laminato o incollato come punto adesivo epossidico. Recentemente questi tipi di collettori sono stati raggruppati in quattro diverse categorie:

- Collettori solari a lamiera;
- Collettori a canale;
- Collettori a flusso libero;
- Collettori a due assorbitori.

La seguente immagine ne riporta uno schema generale dei moduli sopra citati:



**Figura 2. 2 Vari concetti di collettore: PVT a lamiera, PVT a canale, PVT a flusso libero, PVT a due assorbitori (tipo isolato) (Zondag et al., 2003)**

Questi collettori sono designati per pompe forzate di circolazione (come nel caso-studio con pompa di ammissione del fluido circolante).

Sulla base delle analisi numeriche è stato suggerito di impostare il canale in modo da far scorrere il flusso di liquido sotto il modulo fotovoltaico trasparente per effettuare una maggiore efficienza del collettore. Il design più consigliato attualmente è quello con collettori solari a lamiera. Studi effettuati da Erdil et al. (2008) sull'isola di Cipro, quanto ad un sistema ibrido PV/T da essi costruito, dove veniva utilizzata acqua come fluido refrigerante, hanno dimostrato che il pay-back time legato alla modifica da loro proposta per il sistema era di due anni; tale impianto risulta quindi essere economicamente attrattivo non solo dal punto di vista da essi approfondito, ma quanto a tutte le possibili tecnologie in gioco. Le fluttuazioni termiche in un sistema PV/T a liquido sono molto ridotte rispetto a quelle del sistema ad aria PV/T. Inoltre Chow et al. (2006) hanno sviluppato un modello in Cina che è stato esteso ad un ampio campo di temperature "estati calde ed inverni freddi"; tale modello ha evidenziato la potenziale applicabilità di tali apparecchiature per uso domestico. Studi particolari sulle performance effettive del collettore realizzate da Chow et al. (2009) in Cina hanno investigato le prestazioni di un sistema fotovoltaico / acqua-riscaldamento integrato ed hanno rivelato un valore pari al 37,5 % (valori che si mettono in comparazione con quelli dell'impianto in esame).

I soli difetti rispetto ad un sistema ad aria sono i costi addizionali dei tubi per la circolazione ad acqua e il problema inerente al congelamento del fluido di

## Capitolo 2

lavoro: nel caso valutato infatti si considera una miscela di acqua e glicole al 33% v/v.



## Capitolo 3

### Metodologia

Questa parte ha come obiettivo la presentazione delle tecniche utilizzate per la analisi dei dati necessari allo scopo finale di studio delle prestazioni dei pannelli foto-termici, partendo dal valore fondamentale di indagine che rappresenta la fonte di energia dell' impianto, ovvero la radiazione solare, per poi proseguire appunto con un'analisi dettagliata delle prestazioni termiche del sistema di riferimento.

#### **Radiazione: localizzazione spaziale e temporale.**

Per quanto concerne tale aspetto, che risulta essere la fonte energetica fondamentale, grazie a cui un impianto di questo tipo è in grado di convertire, tramite una serie di trasformazioni, la potenza solare in Energia Termica e Potenza Elettrica, bisogna per prima cosa considerare da un lato la localizzazione geografica (dei raggi del sole rispetto all'impianto e di quest'ultimo rispetto alla terra stessa) e temporale dell'impianto e, dall'altro, valutare le diverse componenti di cui la radiazione solare stessa risulta essere costituita.

- Partendo da considerazioni su scala temporale è necessario fare diverse precisazioni:

Si deve valutare il numero del giorno dell'anno in cui ci si trova (ad esempio  $n=246$  corrisponde al 3 settembre).

Per quanto concerne le ore bisogna tenere conto della uniformità della base di riferimento ( se oraria o decimale; nel caso studio ci si attiene a misurare tutto in base decimale).

L'ora locale (base decimale) risulta essere quella che viene letta direttamente sull'orologio; in particolare a seconda del mese a cui ci si riferisce si deve valutare una correzione legata alla presenza o meno dell'ora legale (convenzione di avanzare di un'ora le lancette degli orologi durante il periodo estivo. La soppressione di un'ora a ridosso del periodo estivo serve a indurre le persone ad alzarsi prima in questo periodo dell'anno, il che consente un risparmio energetico nelle ore serali. In particolare il cambio d'ora si

effettua alla fine del mese di ottobre, in cui viene ad essere eliminata tale convenzione e alla fine del mese di marzo in cui viene ad essere introdotta). Tale ora va però riportata per effettuare i diversi conti ad un riferimento solare; occorre qui valutare tre differenti passaggi:

$$h_{sol} = \left(\frac{360}{365}\right) \cdot (n - 81) \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) \quad (3.1)$$

(valore fisso, che dipende dal giorno dell'anno);

$$T_{sun} = 9,87 \cdot \text{sen}(2 \cdot h_{sol}) - 7,53 \cdot \cos(h_{sol}) - 1,5 \cdot \text{sen}(h_{sol}) \quad (3.2)$$

(tempo solare fisso durante il giorno);

$$h_{sol\ var} = h_{loc} + \frac{4(\text{longitudine} - 15 \cdot (+1))}{60} + \left(\frac{T_{sun}}{60}\right) \quad (3.3)$$

(ora locale variabile, riportata ad un riferimento solare variabile anche esso).

L'angolo orario solare: l'angolo orario di un punto sulla superficie terrestre è l'angolo di cui la terra deve girare per portare il meridiano del punto direttamente sotto il sole. La terra ruota, quindi questo spostamento angolare rappresenta il tempo; osservando il Sole dalla Terra, l'angolo solare orario è un'espressione di tempo misurato come un angolo (di solito in gradi), a partire dal mezzogiorno solare. Al mezzogiorno solare, alla longitudine dell'osservatore sulla terra, l'angolo orario è di zero gradi, mentre il tempo prima di mezzogiorno solare è espresso in gradi negativi, e l'ora locale dopo mezzogiorno solare in gradi positivi. L'angolo orario è lo spostamento angolare del Sole a est o a ovest del meridiano locale a causa della rotazione della terra sul suo asse a 15° per ora, con la mattina negativa e il pomeriggio positivo.

$$\omega = (h_{sol} - 12) \cdot 15 \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3.4)$$

(angolo orario solare)

La declinazione solare: angolo tra il piano equatoriale e la congiungente tra il punto in esame e il sole; essa rimane costante durante il giorno e circa costante durante ogni mese dell'anno. Essa può essere calcolata tramite la formula approssimata di Cooper:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}\left(\left(\frac{360}{365}\right) \cdot (n + 284) \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right)\right) \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3.5)$$



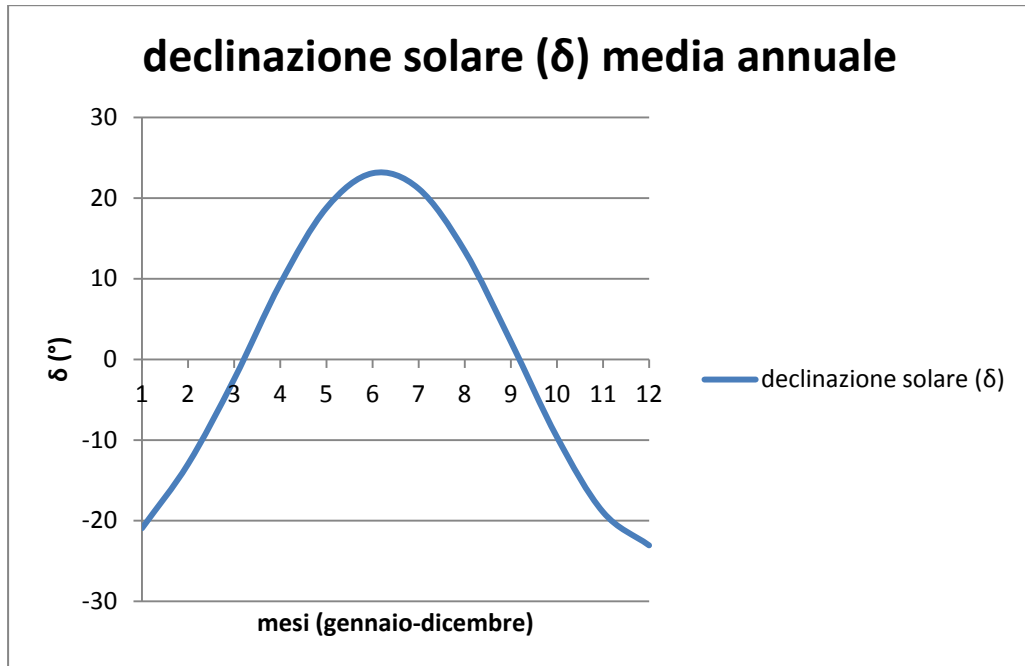


Figura 3. 1 Analisi dell'andamento annuale della declinazione solare.

- Parlando di localizzazione geografica rispetto alla terra si fa riferimento alla città di Milano (l'impianto si trova in Via Lambruschini, zona Bovisa): si pone ad una Latitudine ( $\varphi$ ) di  $45,3^\circ$  Nord e una Longitudine di  $9,65^\circ$  Est con un'indicazione rispetto allo Standard Time (sincronizzazione degli orologi in diverse località geografiche all'interno di un fuso orario) di Greenwich di +1. Inoltre risulta essere rilevante l'inclinazione dei pannelli di un angolo  $\beta = 30^\circ$  rispetto all'orizzontale.
- Parlando di localizzazione spaziale ("geografica") dei raggi solari, bisogna tenere conto diversi valori, necessari per calcolare il valore dell'angolo di incidenza  $\theta$  della radiazione solare rispetto ai pannelli inclinati:

- Zenit solare: angolo tra i raggi del sole e la verticale la superficie ( $\theta_s$ )

$$\theta_s = \text{gradi}(\arccos(\sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi))) \quad (3.6);$$

- Azimut solare: l'angolo tra la proiezione dei raggi del sole (congiungente tra il sole e il punto di riferimento in esame) sull'orizzontale e la direzione Sud ( $\gamma_s$ )

$$\gamma_s = \text{gradi}(\arccos(\cos(\theta_s) * \text{sen}(\varphi) - \text{sen}(\delta) / (\text{sen}(\theta_s) / \cos(\varphi))) \quad (3.7);$$

- Angolo di incidenza: angolo che si viene ad avere tra i raggi solari e il piano dei pannelli solari in esame ( $\theta$ )

$$\Theta = \text{gradi}(\arccos(\cos(\theta_s) * \cos(\beta) + \text{sen}(\theta_s) * \text{sen}(\beta) * \cos(\gamma_s))) \quad (3.8).$$

### Analisi e misura delle diverse componenti generali.

Una volta analizzati questi due aspetti, indispensabili per l'orientazione dei raggi solari nel modo opportuno rispetto ai pannelli occorre considerare i diversi valori di radiazione solare forniti da differenti strumenti di misura posti sul tetto (ove si trovano i pannelli stessi) e attraverso un'accurata procedura definire il valore "esatto" da tenere presente in tutte le successive analisi (risulta infatti che strumenti diversi non riportano lo stesso valore di radiazione, ma valori differenti, perciò occorre capire quale sia quello opportuno da scegliere). Prima di definire le grandezze nello specifico occorre indicare che la stazione meteo, la cui centralina è collocata su un appoggio verticale sul tetto, integrata da un dispositivo di elaborazione dati E-Log Data Logger (\*), si compone di vari strumenti: radiometri globali o piranometri, radiometro diretto senza puntamento o eliofanometro, termo igrometri o termometri (per misura di umidità relativa, temperatura ambiente o dell'aria, velocità del vento, illuminazione e pioggia).

- IRR ( $W/m^2$ ): viene misurata da un rilevatore posto parallelamente ai pannelli solari, acquisito dal sistema Solar\_Tech con una frequenza di un minuto;
- Radiazione globale(RadGLOBale) ( $W/m^2$ ): è il valore globale della radiazione solare, che tiene conto di tutte le componenti esplicate in seguito (diffusa, diretta e riflessa, di quest'ultima non si tiene conto nello studio). Viene misurata da un radiometro globale: si tratta di un sensore per la misura di intensità di radiazione elettromagnetica, emessa

direttamente dal sole o riflessa da altri agenti ambientali (atmosfera, nuvole). Le sue caratteristiche principali sono:

- Sensore a termopila o ad elemento fotovoltaico;
- Riferibilità al WRC (World Radiation Center);
- Stabilità;
- Correzione della risposta al coseno;
- Alta sensibilità;
- Protezione da disturbi elettromagnetici



Figura 3. 2 Radiometro globale

- Radiazione diffusa (R<sub>GlobBANDA</sub>) ( $W/m^2$ ): è il valore della radiazione diffusa, detta anche indiretta, rappresenta quella quota di radiazione che ha colpito almeno una particella dei gas atmosferici cambiando angolo di incidenza e che arriva comunque al suolo perché verso esso indirizzata. Aumenta relativamente alla totale in cieli nuvolosi. Viene misurata con una frequenza di un valore al minuto e acquisita dalla stazione meteo con una frequenza di dieci minuti (media sui dieci minuti) , dal medesimo strumento che misura la radiazione globale: un radiometro globale posto orizzontalmente rispetto ai pannelli solari: esso viene

tramite un oscuratore opportunamente schermato dalla radiazione diretta e di conseguenza misurato il valore della diffusa;

- Radiazione diretta (DNI) ( $W/m^2$ ): detta anche direct normal radiation, è l'energia che incide su una superficie (di inseguimento) perpendicolare ai raggi solari. È la radiazione diretta su una superficie che insegue perpendicolarmente i raggi del sole. In pratica la DNI indica il valore medio della radiazione solare diretta al suolo sul piano ortogonale alla direzione dei raggi del Sole.

Nel caso preso in esame esistono due differenti valori di essa a cui prestare attenzione (uno è un valore misurato (RadDiretta) da un certo strumento e l'altro è un valore calcolato (tramite una particolare espressione); essi dovrebbero risultare uguali, ma da indagine sperimentale, ci si scontra con questa evidenza:

- Valore misurato (RadDiretta): il valore che viene elaborato da E-Log Data Logger (\*) della stazione meteo risulta avere una frequenza di dieci minuti, mediata su valori acquisiti ogni minuto. Il dato risulta essere rilevato da un radiometro diretto senza puntamento o eliofanometro:



Figura 3. 3Radiometro diretto senza puntamento o eliofanometro.

Il sensore C300R misura la durata dell'insolazione (riferita ad una certa soglia) e la radiazione diretta dal sole. La misura avviene nel campo del visibile e vicino infrarosso con le caratteristiche dei piranometri di seconda classe OMM.

Una volta predisposto per la latitudine del luogo, il sensore non necessita di posizionamento stagionale se non quando siano richieste precisioni più ristrette, realizzabili con due soli aggiustaggi annuali. Il principio di misura è il seguente: un complesso di sensori rileva l'illuminamento di una piccola sfera che riceve la luce proveniente da una fascia anulare di cielo alta  $90^\circ$ , avente come equatore il cerchio equinoziale del luogo. Una banda rotante intercetta periodicamente il sole; per ogni rotazione lo strumento definisce le due condizioni di radianza della fascia con e senza l'apporto diretto del disco solare e ne calcola la differenza; questa corrisponde con buona approssimazione al valore della radiazione diretta. Lo strumento fornisce inoltre lo stato dell'insolazione, definita presente quando la radiazione diretta è maggiore di  $120 \text{ W/m}^2$  (standard OMM dal 1981). Il sensore possiede due riscaldatori attivabili: uno continuo anticondensa ed uno termostato per lo sbrinamento. In condizioni di oscurità, la banda viene fermata e lo stato dell'insolazione posto a "no". Per mezzo delle due uscite analogiche, lo strumento è collegabile ad acquisitori, registratori grafici, totalizzatori conta tempo;

- Valore calcolato (DNI): è ricavato dai valori rilevati dalla stazione meteo RadGlobale e RGlobBanda (rilevati sul piano orizzontale) e riportati rispetto al valore dello zenit solare del piano orizzontale di afferenza:

$$\text{DNI calc} = (\text{RadGlobale} - \text{RGlobBanda}) / \cos(\theta_s) \quad (3.9).$$

(\*) E-Log Data Logger :

Caratteristiche principali:

- Acquisizione di 20 misure acquisite dai sensori o derivate in un secondo;
- Memoria dati fissa di tipo Flash da 2 Mb;
- Calcolo di grandezze derivate;
- Rata di acquisizione programmabile indipendentemente per ogni ingresso da 1 sec. a 1 ora;
- Rata di elaborazione statistica programmabile da 1 sec. a 24 ore.

Il suo ridotto consumo, la gamma di segnali che è in grado di ricevere, la sua protezione rispetto a situazioni ambientali gravose, lo rendono particolarmente adatto a misure in applicazioni meteorologiche, idrologiche, di qualità dell'aria, di monitoraggio ambientale in esterno ed in ambienti confinati. E-Log ha una memoria FLASH da 2 Mb in grado di memorizzare valori elaborati con base di elaborazione programmabile da 1 sec. a 24 ore. Per ogni canale è possibile scegliere un'insieme di elaborazioni statistiche:

- valori istantanei
- media aritmetica, minima, massima, deviazione standard
- totalizzazioni e integrazioni sul tempo
- elaborazioni eoliche: direzione risultante/prevalente, velocità risultante, deviazione standard della direzione (sigma-teta), percentuale di calma.

E-Log è configurato in fabbrica con sensori e routine di lavoro tipicamente utilizzati . E' possibile configurare diversamente, come nel caso in esame, l'acquisitore per mezzo del programma 3DOM su PC fornito assieme all'acquisitore. 3DOM è il software per la configurazione degli strumenti ELog e scarico dei dati dalla loro memoria. Consente di programmare tutte le modalità operative, come l'assegnazione dei canali, le modalità di acquisizione/memorizzazione dei dati, la configurazione delle attuazioni elettriche, la configurazione dei protocolli e porte seriali, etc.. La configurazione creata o modificata può essere spedita ad uno o più acquisitori. 3DOM consente inoltre di scaricare i dati dalla memoria in formato ASCII e formati compatibili con i programmi InfoGAP e SQL-GIDAS. La spedizione della configurazione e lo scarico dei dati avviene per mezzo del cavo seriale, oppure modem telefonico. 3DOM permette inoltre di visualizzare i dati istantanei acquisiti dallo strumento collegato e sincronizzare l'orologio dell'acquisitore. La versione 3DOM

Standard è inclusa nel set ELog.

### Confronto tra i diversi valori di radiazione e scelta del valore esatto.

A questo punto dell'analisi della radiazione la scelta del valore corretto si pone con una duplice valutazione: da un lato un'analisi legata al semplice confronto tra le diverse radiazioni e agli errori relativo ed assoluto rilevati nel confronto tra le diverse grandezze, dall'altro un'analisi di tipo elettrico, che consta nella valutazione delle differenze quanto all'andamento della potenza elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici a livello giornaliero: confronto tra valore misurato dagli inverter del sistema e valori calcolati in base alle diverse radiazioni.

N.B: in generale, dopo aver esaminato numerosi campioni di dati quanto ai mesi di Settembre, Ottobre (decisamente poco soleggiato) e Novembre, ci si riferisce come base di indagine a giornate particolarmente soleggiate in cui il valore di radiazione solare si tenga sempre al di sopra dei  $100 \text{ W/m}^2$  e a fasce orarie che possano attenersi a questo indice di riferimento (indicativamente valuto la fascia oraria che va dalle 9 alle 16). In particolare si verranno a riportare come esempi le giornate del 3 settembre 2013 e del 12 novembre 2013, di notevole interesse quanto ai dati sopra indicati.

Nel confronto tra le differenti radiazioni solari per soddisfare l'obiettivo di scegliere il valore di radiazione appropriato da utilizzare nello studio completo dell'impianto, si effettua il confronto tra diverse radiazioni e se ne valuta l'opportuno errore.

In primo luogo per operare esclusivamente con i giorni in cui la radiazione solare risulta significativa, si valuta la differenza tra DNI calc e la RadDiretta (è opportuno soddisfare l'obiettivo indicato precedentemente perché questi valori che apparentemente dovrebbero essere uguali in realtà differiscono) e tengo conto di quei giorni in cui l'errore assoluto (modulo della differenza tra le due grandezze) e errore relativo (modulo della differenza tra le due grandezze, rapportato a una delle due) risultano essere differenti in modo significativo. Come da grafici ci si riferisce ai giorni del 3 settembre e del 12 novembre per lo studio.

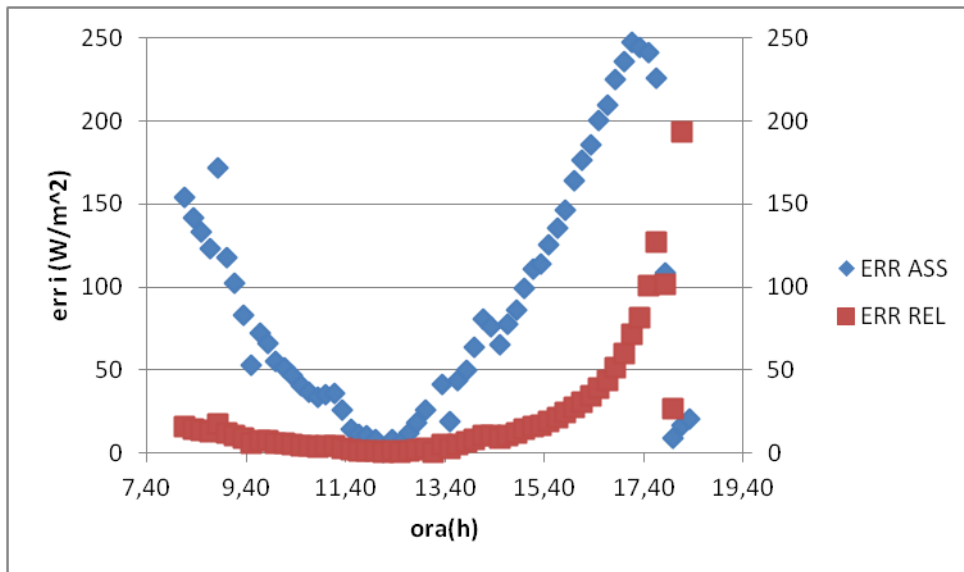


Figura 3. 4 Andamento dell'errore assoluto e dell'errore relativo quanto a differenza tra DNI calcolata e RadDiretta misurata dalla stazione meteo (3 settembre 2013).

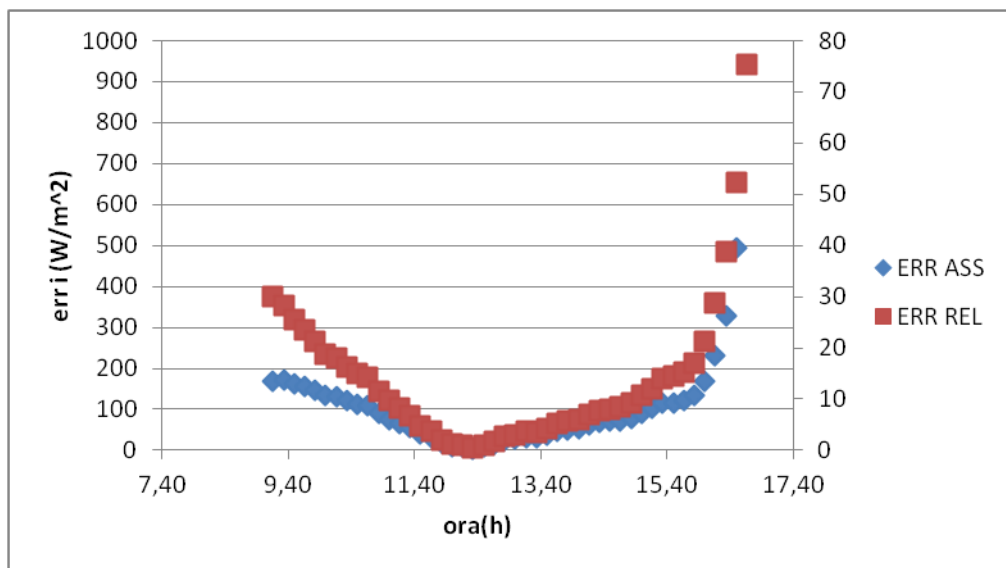


Figura 3. 5 Andamento dell'errore assoluto e dell'errore relativo quanto a differenza tra DNI calcolata e RadDiretta misurata dalla stazione meteo (12 novembre 2013).

A questo punto si considera la differenza tra tre diverse radiazioni per questi due giorni particolarmente significativi:



- IRR ( $W/m^2$ );
- $G_{totale\ 1} = RadDiretta * \cos(\theta) + RGlobBanda * (1 + \cos\beta)/2$   
( $W/m^2$ )

(3.10).

calcolata a partire dai valori misurati dagli strumenti di misura della stazione meteo, il valore diretto è riferito dalla sfera dell'eliofanometro all'angolo di incidenza dei raggi solari sui pannelli dell'impianto e il valore diffuso è riportato al piano parallelo ai pannelli dell'impianto tramite il valore  $(1 + \cos\beta)/2$  pari al fattore di vista dei pannelli rispetto al cielo;

- $G_{totale\ 2} = (RadGlobale - RGlobBanda) * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_s)} + RglobBanda * (1 + \cos(\beta))/2$   
( $W/m^2$ )

(3.11);

calcolata a partire dal valore DNI calc e non misurato, sommato al valore di radiazione diffusa riportato al fattore di vista come sopra.

Dal confronto emergono conclusioni non del tutto precise: infatti dal primo grafico si nota come l'errore minore si abbia al mattino tra i valori  $G_{totale1}$  e  $G_{totale2}$ , mentre al pomeriggio l'errore assoluto minore è tra  $G_{totale1}$  e IRR. Quindi da questo grafico non si riesce a valutare quali valori debbano essere considerati come attendibili. Mentre dal secondo grafico emerge che l'errore assoluto minore si ha tra  $G_{totale1}$  e  $G_{totale2}$ , perciò questi due valori risultano ad una prima analisi i più attendibili. Per questo è necessario procedere con una successiva valutazione dal punto di vista elettrico.

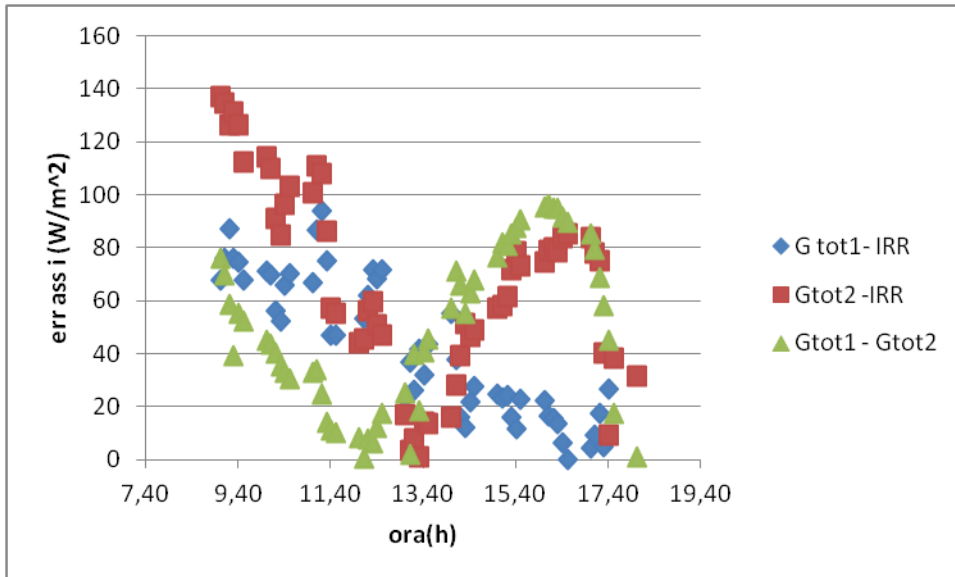


Figura 3. 6 Valutazione dell'errore assoluto tra i diversi valori di radiazione solare a disposizione (3 settembre 2013).

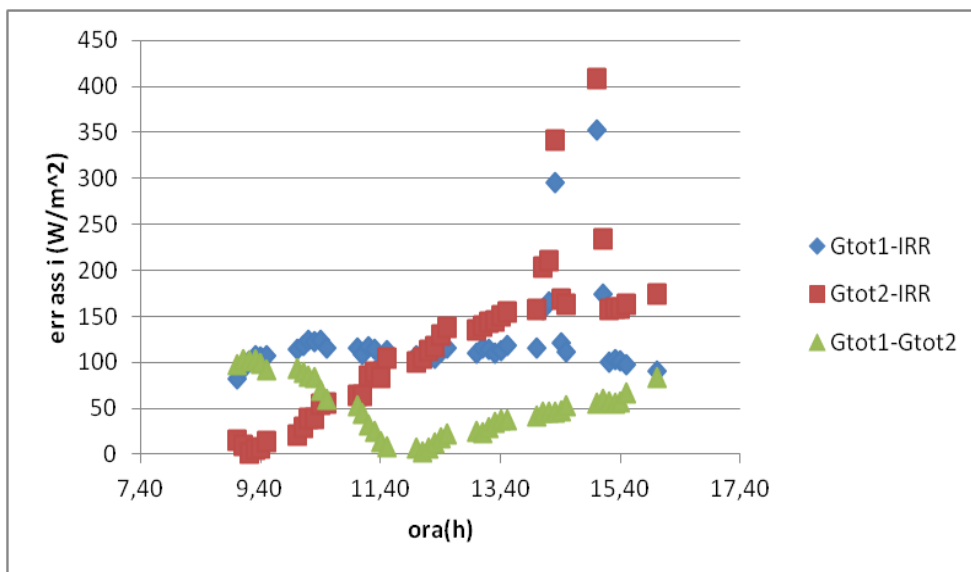


Figura 3. 7 Valutazione dell'errore assoluto tra i diversi valori di radiazione solare a disposizione (12 novembre 2013)

Si effettua quindi un confronto tra Potenza elettrica misurata e Potenza elettrica calcolata riferendosi alle diverse radiazioni solari.

### Capitolo 3

L'analisi viene realizzata a livello giornaliero; lo studio si rivolge all'analisi di tre pannelli fotovoltaici (tradizionali, solo per produzione elettrica, il cui posizionamento sul tetto può essere verificato dall'allegato 2 della parte impiantistica) monocristallini per i due giorni indicati sopra:

- F7-4D: 1112243290 aleo 245W;
- F6-1F: 1112243345 aleo 245W;
- F5-50: 1112243283 aleo 245W.

In particolare le celle fotovoltaiche monocristalline sono realizzate utilizzando un singolo cristallo di silicio; ed è proprio nella purezza del silicio utilizzato che risiede il motivo della loro alta efficienza.

Il confronto viene fatto tra la Potenza elettrica prodotta dal pannello fotovoltaico tradizionale, prima dell'inverter ( $P_{el\ in}$ , quindi non a livello dell'uscita del sistema, si calcola il valore a meno del rendimento dell'inverter  $\eta=0,96$ ) e la potenza prodotta a livello del pannello fotovoltaico  $P_{pan}$  calcolata in base alle tre diverse radiazioni: IRR,  $G_{totale1}$ ,  $G_{totale2}$ .

Come da scheda tecnica (ci si riferisce sempre all'allegato 3 della parte impiantistica) la Potenza nominale dei pannelli "aleo s\_19 sol" è pari a 245 W. E' necessario per calcolare la potenza valutare le seguenti costanti:

NOCT= 47°C

$T_{rif,NOCT}=20^{\circ}C$

$G_{nom\ 1}=800\ W/m^2$

$G_{nom\ 2}=1000\ W/m^2$

$\gamma$  (coefficiente termico, valore percentuale riportato come decimale)= -0,0044

Per calcolare  $P_{pan\_IRR}$ ,  $P_{pan\_G_{totale1}}$ ,  $P_{pan\_G_{totale2}}$ , si usano le seguenti espressioni:

$$T_{pan_i} = T_{amb} + \left( \frac{G_i}{G_{nom}} \right) * (NOCT - T_{rif,NOCT}) \text{ (}^{\circ}C) \quad (3.12)$$

$$P_{pan_i} = P_{nom} * \left( \frac{G_i}{G_{nom}} \right) * (1 + \gamma * (T_{pan_i} - 25)) \text{ (Watt)} \quad (3.13)$$

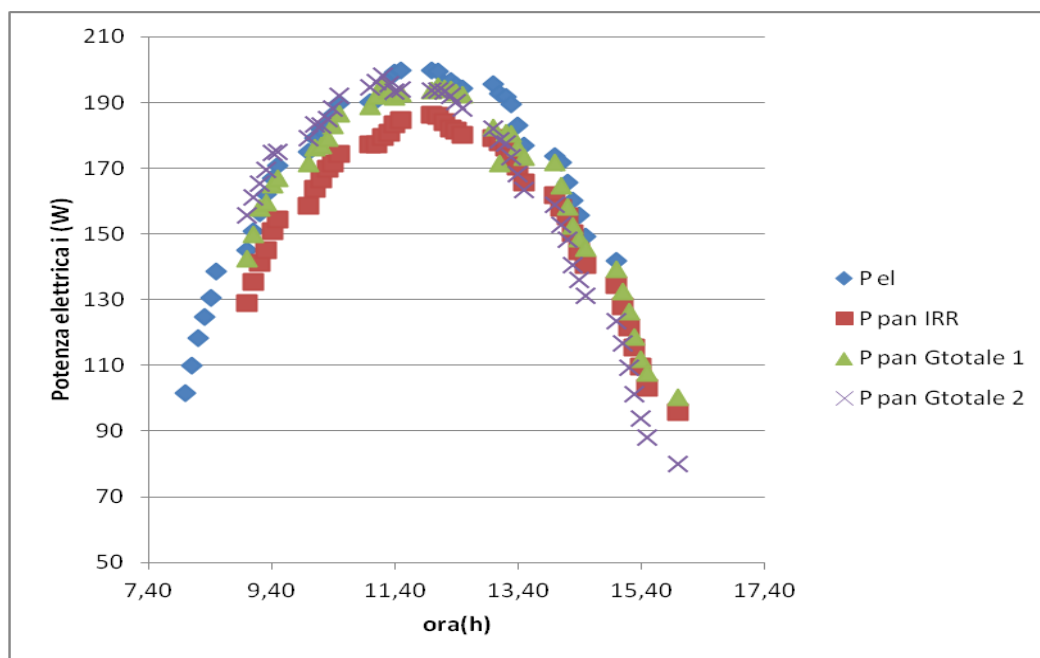
Dai grafici riportati, sia quanto all'analisi del confronto diretto tra i diversi valori di potenza, sia quanto all'analisi dell'errore assoluto nella differenza tra  $P_{el\ in}$  e i tre valori di  $P_{pan\ i}$  si nota come il valore di  $P_{pan\ Gtotale\ 1}$  sia quello caratterizzato dall'errore assoluto medio minore durante tutto il giorno.

Di conseguenza si sceglie di utilizzare come radiazione solare corretta la  $G_{totale1}$ .

Si riportano in tabella indicativamente i valori medi di errore assoluto riscontrati per le due giornate prese in esame, che giustificano insieme ai grafici, la scelta fatta:

**Tabella 3. 1Errori assoluti medi giornalieri per i pannelli F74D,F6F1,F550 tra la  $P_{el,in}$  e  $P_{pan,i}$**

	Pel-Ppan_IRR (W)	Pel-Ppan_Gtotale1 (W)	Pel-Ppan_Gtotale2 (W)
03-sett	23,14081	21,0908	27,8918
12-nov	30,16658	23,9197	34,6956



**Figura 3. 8 Valutazione per tre pannelli fotovoltaici dell'impianto (F74D,F550,F61F) della differenza tra potenza elettrica misurata dall'inverter e potenze elettriche calcolate in Watt tramite i diversi valori di radiazione solare disponibili (3 settembre 2013).**

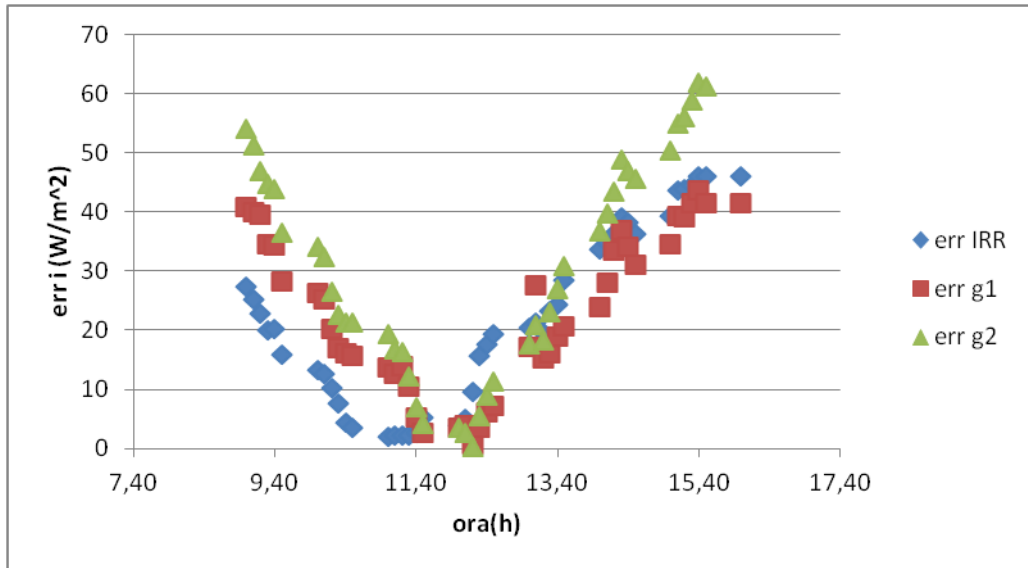


Figura 3. 9 Valutazione dell'errore assoluto complessivo per i tre pannelli nel caso del confronto tra potenza elettrica misurata e potenze elettriche misurate in Watt con i diversi valori di radiazione (3 settembre 2013)

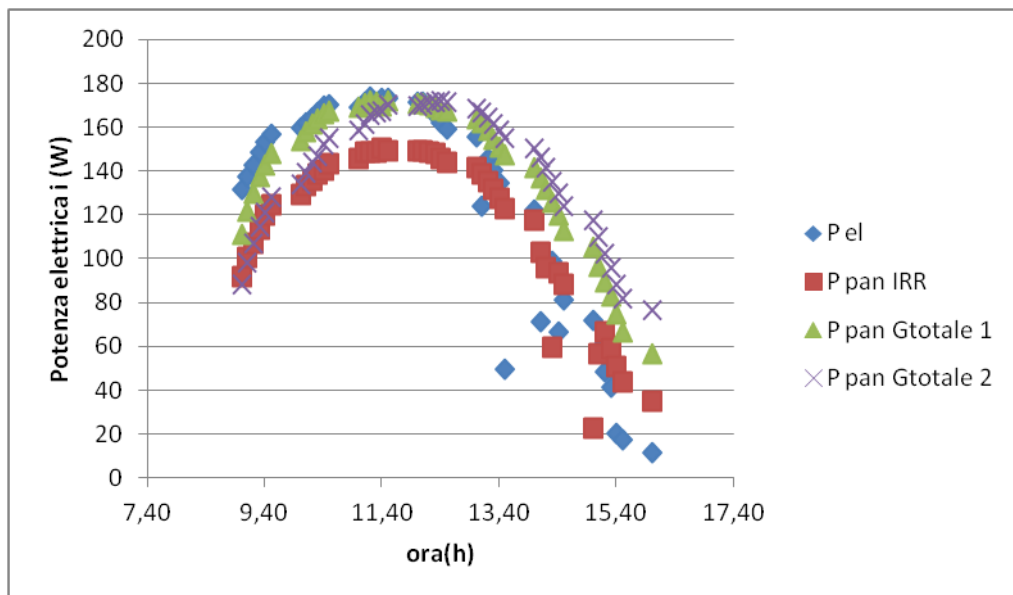


Figura 3. 10 Valutazione per tre pannelli fotovoltaici dell'impianto (F74D,F550,F61F) della differenza tra potenza elettrica misurata dall'inverter e potenze elettriche calcolate in Watt tramite i diversi valori di radiazione solare disponibili (12 novembre 2013)

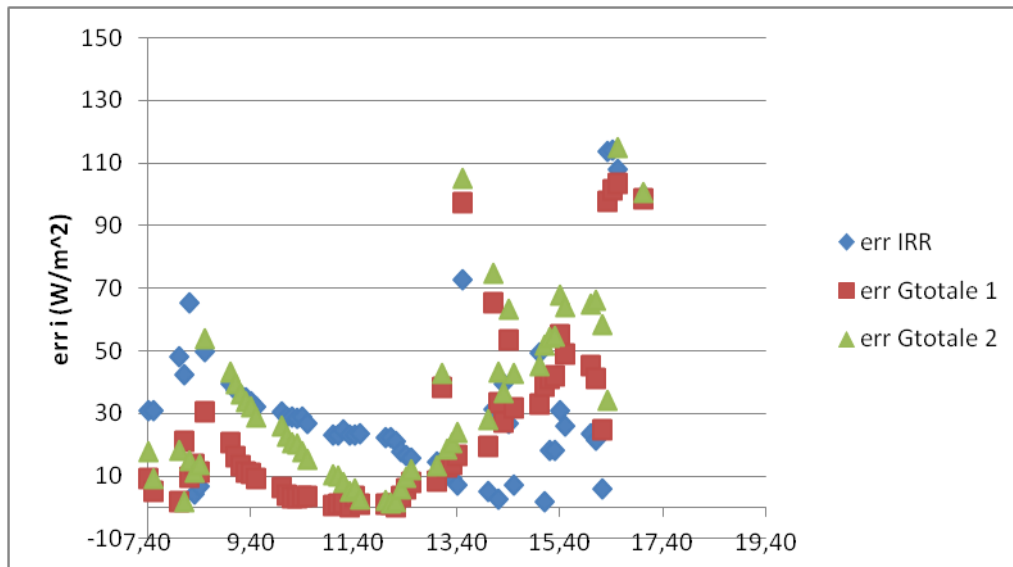


Figura 3. 11 Valutazione dell'errore assoluto complessivo per i tre pannelli nel caso del confronto tra potenza elettrica misurata e potenze elettriche misurate con i diversi valori di radiazione (12 novembre 2013)

### Analisi delle prestazioni (lato termico): procedura di calcolo e variabili di interesse.

#### Rendimento ottico.

A livello della valutazione delle prestazioni di un pannello, come quelli foto-termici presi in analisi, le proprietà ottiche della superficie assorbente o assorbitore giocano un ruolo fondamentale: si fa riferimento al valore di  $\eta_o$  (riportato nella scheda tecnica del costruttore e pari a 0,56) e al relativo concetto di superfici selettive e al valore del coefficiente K (IAM:incident angle modifier) quanto ad un'analisi ottica della superficie.

Per quanto concerne  $\eta_o$  esso è dato dal contributo di  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ ,  $\rho$ ,  $\tau$  (valori emisferici):

- Il primo coefficiente è definito relativamente alla parte di radiazione solare che viene ad essere catturata dalla superficie assorbente, si tratta di una proprietà della superficie, una volta che è noto lo spettro della radiazione solare incidente.

In particolare esso è il risultato di alcune assunzioni fatte a partire del concetto di assorbanza monocromatica direzionale  $\alpha\lambda(\mu,\phi)$ : si valuta la frazione della radiazione solare di lunghezza d'onda  $\lambda$  dalle direzioni  $\mu$  e  $\phi$

(ovvero il coseno dell'angolo polare e l'angolo azimutale) che è assorbita dalla superficie stessa. La frazione di tutta la radiazione solare (valida per qualsiasi lunghezza d'onda) dalle direzioni  $\mu$  e  $\phi$  che è assorbita dalla superficie è chiamata assorbanza direzionale  $\alpha(\mu, \phi)$ ; una volta note le caratteristiche dello spettro solare, come detto sopra, essa può essere definita come proprietà intrinseca della superficie;

- Il secondo coefficiente viene determinato quanto al valore della intensità solare emessa dalla superficie in una particolare direzione. Si parte dal concetto di emittanza monocromatica direzionale  $\epsilon\lambda(\mu, \phi)$  di una superficie, definita come una porzione della intensità monocromatica emessa dalla superficie in una particolare direzione, rapportandola con lo spettro che risulterebbe essere emesso da un corpo nero (è un oggetto (ideale) che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente e quindi né riflette né trasmette alcuna energia apparendo in prima approssimazione nero, secondo l'interpretazione classica del colore dei corpi ed entro i limiti della propria emissività termica) che si trovi alla stessa temperatura. Quanto al concetto di emissività direzionale  $\epsilon(\mu, \phi)$  si tratta anche in questo caso di una proprietà della superficie.

Queste due proprietà dipendono dalle caratteristiche della superficie presa in esame e quindi dalla sua temperatura, rugosità, pulizia.

I valori a cui ci si riferisce quanto a queste due grandezze risultano essere di tipo emisferico ( $\alpha\lambda$ ,  $\epsilon\lambda$ ) e quindi indipendenti dalla direzione di riferimento quanto alla radiazione solare, perché valutate quanto a tutto l'emisfero solare ed inoltre i valori di interesse risultano anche essere indipendenti dalla lunghezza d'onda della radiazione solare:  $\alpha$ ,  $\epsilon$ .

Quanto alla terza grandezza bisogna fare riferimento alla radiazione solare riflessa da una superficie; essa viene data dal contributo di due valori, uno risulta essere definito come un valore speculare, che risulta essere simile al comportamento che viene ad aversi con uno specchio, ove l'angolo polare incidente è pari all'angolo polare riflesso, l'altro come un valore diffuso, che distribuisce la radiazione solare riflessa uniformemente in tutte le direzioni. Ci si riferisce in particolare al valore di riflettanza emisferica angolare monocromatica  $\rho\lambda(\mu_i, \varphi_i)$ , dove  $\mu_i$  ed  $\varphi_i$  indicano il riferimento a un dato valore di radiazione incidente: essa è definita come la porzione della intensità monocromatica riflessa nelle direzioni  $\mu_i$  ed  $\varphi_i$ , rispetto alla energia riflessa in tutte le direzioni. Essa è dipendente dalla distribuzione angolare della intensità incidente e non risulta essere una proprietà della superficie. Quando poi un

corpo risulta essere irraggiato da tutte le direzioni e si misura la radiazione incidente si definisce la riflettanza monocromatica emisferica, che nel caso di una superficie diffusa risulta essere pari a tutta la componente riflessa ed indipendente dalla distribuzione spaziale della intensità incidente. Da ultimo valutando la indipendenza dallo spettro delle lunghezze d'onda solari si trova il valore  $\rho$ .

Quanto alla ultima grandezza ci si riferisce alla trasmittanza della radiazione solare in direzione parallela e perpendicolare alla superficie stessa.

Rilevante è quanto viene determinato dalla legge di Kirchhoff, secondo cui il contributo totale delle diverse porzioni di radiazione su una superficie è dato da  $\alpha + \rho + \tau = 1$ .

Quanto a queste grandezze nello studio dei pannelli foto-termici si fa riferimento a quelle che sono le superfici selettive, rilevanti per il caso in studio: si tratta cioè di superfici a struttura multistrato, caratterizzate dall'utilizzo di materiali selettivi, noti anche come TINOX (leghe o ossido di nitrito titanico); l'obiettivo è quello di ottimizzare il calore assorbito, impedendo le perdite come radiazione infrarossa. Si ottiene che circa il 90% della energia solare in ingresso può essere trasformata in calore. I substrati in genere sono in rame ed in alluminio. Lo scopo è quello di garantire una bassa emissione alle lunghe lunghezze d'onda (infrarosso), per garantire le minori dispersioni termiche possibili. La efficienza è legata alla capacità di trasformare la luce del sole in calore; il livello di assorbimento della radiazione solare è una condizione di base per il pannello, in cui la sfida è conservare la energia nel materiale. Un materiale altamente selettivo ha:

- alto assorbimento  $\alpha_s$  per le lunghezze d'onda dello spettro solare (ovvero la luce visibile);
- bassa emissione (alta riflessione) alle lunghezze d'onda dell'infrarosso nella gamma di irraggiamento del calore;
- bassa riflessione alle basse lunghezze d'onda che devono avere alto assorbimento.

La struttura generale per un sistema selettivo è rappresentata da una lastra in rame sottile rivestita in TINOX, saldati in modo ottimale con le particelle che trasportano acqua e glicole, in modo da minimizzare le perdite di calore utile; la



copertura è realizzata in vetro, robusto e tale da consentire il passaggio della radiazione, deve perciò essere trasparente a tutte le lunghezze d'onda utili ed essere opaco solo a quelle non necessarie. Si deve inoltre garantire isolamento sotto la piastra dell'assorbitore e a livello laterale, soprattutto per i periodi freddi, in cui è già difficile riscaldare il fluido termo vettore.

Da ultimo quanto al valore di IAM, pari a 0,98 e riportato nella scheda tecnica del sistema foto- termico, risulta pari all'incident angle modifier e rappresenta la quantità reale di radiazione che colpisce l'assorbitore solare; esso è pari ad uno quando la radiazione solare è perpendicolare al collettore e risulta invece minore di uno soprattutto al mattino e al pomeriggio, quando il sole non è al mezzogiorno sui pannelli. In particolare esso indica la riduzione della efficienza ottica dei collettori all'aumentare dell'angolo di incidenza per diversi motivi:

- la diminuzione della trasmissione del vetro e dell'assorbimento dell'assorbitore;
- la minore concentrazione della immagine solare sul ricevitore;
- gli spillamenti di radiazione solare da avvallamenti di lunghezza finita.

#### **Approssimazioni applicate nello schema di impianto quanto allo studio di prestazioni: caso pannello singolo - pannello doppio.**

In riferimento alle analisi che verranno condotte nel seguito, si può valutare il pannello doppio (rappresentato da due moduli foto-termici posti in serie: A 6.2, ovvero quello più a destra nello schema di impianto, più lontano dalla canalina e quindi il più freddo e l'A6.1 quello più caldo e vicino alla canalina, come da schema di impianto) come se si trattasse del pannello singolo: infatti, nonostante non sia nota la temperatura che si ha a cavallo dei due moduli foto termici, mancando una termocoppia necessaria alla sua misura, ci si può comunque riferire al salto termico totale tra i due moduli e alla portata di fluido termo vettore in essi circolante; la differenza rispetto al modulo singolo è che si viene ad avere una portata circolante sempre sensibilmente maggiore e un salto termico elaborato maggiore ed inoltre l'area che assorbe la radiazione solare viene ad essere doppia rispetto al caso del singolo modulo. Il salto termico aumenta per effetto del fatto che si ha un maggiore accumulo di calore nel fluido offerto da entrambi i moduli foto termici, che assorbono appunto una maggiore quantità di radiazione. La approssimazione consta nel fatto che è come se non si venisse a considerare la separazione centrale tra i due pannelli, per cui il fluido viene ad uscire dal primo pannello e solo dopo un tratto di condotta rientra nel secondo, ma ci si riferisce solo alle condizioni di ingresso e

di uscita dai due pannelli analizzati, simultaneamente, come se si trattasse di un blocco singolo.

**Rendimento: definizioni e variabili considerate.**

La valutazione delle prestazioni consta nell'analisi della performance a cui operano i pannelli presi in esame: in particolare (a livello termico ) si tratta di valutare la capacità di convertire la radiazione solare, incidente sul pannello, in riscaldamento del fluido di lavoro (che circola all'interno dei pannelli), rappresentato da una miscela di acqua e glicole.

Si considerano due diversi rendimenti:

- misurato: viene valutato a partire dalle indicazioni sui pannelli, date nella scheda tecnica del costruttore.

A questo livello rilevanti risultano i seguenti coefficienti:

$\eta_o = 0,56$  (rendimento ottico del pannello, dato dalla combinazione a livello della riflettanza, assorbanza e trasmittanza della superficie del pannello, non considero la copertura);

$K = 0,96$  (IAM o incident angle modifier, che tiene conto della variazione delle proprietà ottiche del pannello in base all'angolo di incidenza della radiazione solare sul pannello);

$a1=9,12$  (coefficiente termico legato ad un'analisi termica delle proprietà del pannello di tipo lineare).

Da qui il rendimento viene così valutato:

$$\eta_{costr} = \eta_o \cdot K - a1 \cdot \frac{\Delta T}{(G_{totale1})} \tag{3.14}$$

ove  $\Delta T=(T_p-T_a)$  (°C)

$T_a$ = temperatura ambiente o temperatura dell'aria esterna (media), valore misurato a livello della stazione meteo da un termo igrometro. I valori di tale temperatura vengono acquisiti ogni minuto e memorizzati ogni dieci minuti: da qui discende l'ipotesi per cui posso considerare la temperatura ambiente costante nell'arco di dieci minuti;

$$T_p = (T_{out} + T_{in})/2(°C) \tag{3.15}$$

### Capitolo 3

$T_{out}$  e  $T_{in}$ , risultano le temperature del fluido di lavoro all'ingresso e all'uscita della serpentina che circola nel pannello stesso: i valori sono misurati da delle termocoppie (termo resistenze, in particolare la 505 e la 504, come da allegato 1) poste sul condotto di circolazione del fluido di lavoro.

$T_p$  risulta la temperatura media tra ingresso ed uscita del pannello, a cui si ipotizza che il pannello uniformemente si porti, al di sotto della copertura: si ipotizza che sia la temperatura della piastra equidistribuita su tutto il pannello.

Il valore così calcolato risulta perciò essere un valore noto a priori, che segue le indicazioni di dati forniti dal costruttore.

- sperimentale: viene valutato a partire da bilanci termici/energetici sul pannello stesso (copertura esclusa).

Il rendimento, qui calcolato e non misurato come nel caso precedente, si ottiene dal seguente rapporto, ad esso ci si riferisce come  $\eta_{th}$  o  $\eta_{calcolato}$

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{Q_{ass}} \quad (3.16)$$

ove:

$Q_{th}$ : è il calore che viene assorbito dal fluido di lavoro, per cui si verifica un riscaldamento dell'acqua e glicole tra ingresso ed uscita del pannello:

$$Q_{th} = (\dot{m} \cdot c \cdot \Delta T) \text{ (W)} \quad (3.17)$$

In cui:

$\dot{m}$ : è la portata del fluido di lavoro circolante nel circuito singolo; viene misurata da un sensore di portata (OEM flow sensor type 210): esso ha come output un segnale in frequenza o corrente, è soggetto a misure non sensibili alla temperatura, ha un'eccellente resistenza del mezzo, presenta un ampio range di temperature a cui è sottoponibile, è soggetto a perdite di pressione scarsamente rilevanti;

$c$ : è il calore specifico del fluido di lavoro a pressione costante; per quanto concerne il fluido circolante si tratta di acqua e glicole monopropilenico in

percentuale pari a circa il 33% v/v rispetto all'acqua. Viene valutato tramite una formula sperimentale

$$c = (3680 + 2,675 \cdot T_{in}) \text{ (J/kgK)} \quad (3.18)$$

da cui esso risulta essere dipendente dalla temperatura ed in particolare è funzione della  $T_{in}$  del pannello. Il glicole monopropilenico risulta essere un liquido trasparente, miscibile con acqua che trova impiego come anticongelante in circuiti refrigeranti secondari e adattabile a svariate applicazioni, soprattutto per l'utilizzo dei pannelli foto-termici anche nei periodi freddi invernali. È formulato con prodotti di qualità e speciali inibitori di corrosione per la protezione dell'impianto; la presenza di tale componente nell'acqua riduce la sua capacità di scambio termico, venendo appunto a restituire un  $c$  dell'ordine dei 3,760 kJ/kgK, rispetto ad un valore per l'acqua mai inferiore a 4,18 kJ/kgk;

$$\Delta T = T_{out} - T_{in} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.19)$$

è la differenza di temperatura del fluido di lavoro tra ingresso ed uscita del pannello stesso, perciò misura l'entità del riscaldamento del fluido per effetto della radiazione solare.

$Q_{ass}$ : rappresenta la parte del calore che viene assorbito dal pannello foto termico disponibile al riscaldamento del fluido di lavoro , direttamente proveniente dalla radiazione solare; esso è pari a:

$$Q_{ass} = G_{totale1} \cdot A_c \text{ (W)} \quad (3.20)$$

ove  $A_c = 1,58 \text{ m}^2$  è l'area dell'assorbitore del pannello solare.

### Calcolo dei rendimenti.

I due valori dei rendimenti sopra indicati, uno valutato in modo diretto da formule che provengono dai dati del costruttore e uno ricavato in modo sperimentale, dovrebbero risultare coincidenti: si rileva in primo luogo un andamento lineare (sempre costante) per quanto concerne  $\eta_{misurato}$ , in quanto l'andamento rispetta la formula:

### Capitolo 3

$$\eta_{\text{costr}} = \eta_0 \cdot K - a1 \cdot \frac{\Delta T}{(G_{\text{totale1}})} \quad (3.14)$$

che presenta un'intercetta costante per tutte le rette rappresentanti i rendimenti misurati pari a

$$\eta_0 \cdot k = 0,5376 \quad (3.22)$$

e un coefficiente angolare anch'esso costante per tutte le medesime rette pari a

$$- a1 = - 9,12$$

Per quanto riguarda invece  $\eta_{\text{calcolato}}$ , a cui ci si riferisce anche come  $\eta_{\text{th}}$ , come dalla (3.16) si presuppone che anche questo rendimento presenti un andamento lineare ma non esattamente con la stessa pendenza e orientazione del precedente. Esisterà presumibilmente una differenza tra di essi, essendo uno valutato in modo sperimentale da un rapporto tra calori, ricavati da diversi bilanci termici, l'altro sempre in modo empirico, ma come risultato di una formula precedentemente elaborata e fornita da dati acquisiti dal costruttore, la (3.14), tale per cui sarà necessario, per verificare l'effettiva validità delle espressioni (sia quella sperimentale che quella misurata), applicare ai dati noti i relativi intervalli di incertezza di misura (argomento affrontato nella sezione successiva).

Laddove i campi dei rendimenti associati alle relative incertezze si sovrappongono ho dei valori corretti e plausibili per tali misure. Importante è da ultimo considerare che in genere l'andamento delle prestazioni di un pannello a livello termico viene sempre ad essere valutato in funzione di una particolare grandezza che si definisce temperatura ridotta, essa viene rappresentata dalla seguente espressione:

$$T_m^* = \frac{T_p - T_a}{G} (^\circ C) / \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (3.23)$$

Per definizione e utilità viene utilizzata come variabile indipendente rispetto a cui si valuta l'andamento delle prestazioni dei pannelli.

## **Analisi della metodologia applicata ai dati scelti ed estratti nel calcolo delle prestazioni:**

### **caso run-time e caso a posteriori (non istantaneo) da dati meteo.**

Quanto all'analisi dei dati sperimentali sia quelli salvati nel data-base da E-Log Data Logger sia quelli visualizzati istantaneamente dalle postazioni collegate alla stazione meteo e al sistema Labview per il foto termico, si valutano due differenti metodologie. La prima è la prova run-time ( eseguita solo il mese di marzo), per cui si vengono ad analizzare valori istantanei (minuto per minuto): sono letti dalle postazioni i valori radiazione solare (data dal contributo del termine diffusivo, globale e diretto), in base a cui si viene a calcolare istantaneamente il valore  $G_{totale1}$  come da formula (3.10), temperatura ambiente, temperatura di ingresso ed uscita dei pannelli, portata di fluido termo vettore. La seconda risulta quella seguita a novembre (per cui non si sono verificati valori istantanei) e ripetuta poi il mese di marzo per cui si vengono a valutare solo dati presi dai database delle due postazioni e quindi ci si riferisce alla frequenza temporale con cui tali dati vengono memorizzati (la cardinalità di tali valori risulta molto minore rispetto al primo caso): la radiazione solare e la temperatura ambiente vengono misurate istantaneamente, ma memorizzate nel sistema con cadenze di dieci minuti in dieci minuti; bisogna perciò per tali grandezze ipotizzare la loro costanza per intervalli di dieci minuti e ripeterli in tali intervalli, così da avere valori istantanei (minuto per minuto). La temperatura all'ingresso e all'uscita dei pannelli e la portata di fluido termo vettore vengono invece memorizzati minuto per minuto, per cui ci si riferisce direttamente ai dati disponibili nel data base.

## **Metodologia nella verifica della “esattezza” delle prestazioni dei collettori: incertezza nella misura.**

### **Calcolo dell'incertezza.**

#### **Calcolo dell'incertezza nel caso RUN-TIME.**

Se le cause della variabilità delle misure sono molteplici, singolarmente con piccoli effetti e reciprocamente indipendenti (una situazione che si verifica spesso, per esempio, a proposito delle grandezze di influenza), all'aumentare del numero di ripetizioni l'istogramma delle frequenze relative delle misure approssima sempre meglio una distribuzione di probabilità di tipo gaussiano:

errori di questo genere sono chiamati “errori casuali”. Accanto agli errori casuali, si possono presentare anche errori di altro genere, chiamati “errori sistematici” che distorcono la distribuzione delle misure in modo appunto sistematico, facendola traslare lungo l’asse dei valori del misurando. Il valor medio e la deviazione standard (cioè la radice quadrata della varianza) della gaussiana così ottenuta sono stimatori rispettivamente del valore vero del misurando e del suo errore: si applica questo concetto ai campioni di misure necessari a determinare il rendimento termico (o calcolato) e il rendimento dalle specifiche del costruttore.

Operativamente, la differenza tra errori casuali e errori sistematici si manifesta nel fatto che all’aumentare del numero di ripetizioni l’effetto degli errori casuali si riduce (e quindi il corrispondente stimatore si riduce, grazie al fatto che la gaussiana “si stringe”), mentre l’effetto degli errori sistematici rimane inalterato.

Nell’ambito del sistema in studio si deve fare riferimento ad ulteriori due concetti fondamentali, legati al concetto di misura:

- metodo di misurazione diretto: ove, il valore del misurando è ottenuto mediante l’applicazione di un sistema di misura (le grandezze necessarie al calcolo del rendimento);
- metodo di misurazione indiretto: il valore del misurando è ottenuto a partire dalla misurazione di altre grandezze legate funzionalmente al misurando e mediante il successivo calcolo di tale funzione (rendimento termico e rendimento da specifiche del costruttore).

Nel caso in cui si conosca a priori o si sia in grado di stimare mediante procedure diverse dalla misurazione in considerazione il valore del misurando, si potrebbe effettivamente descrivere la variabilità sperimentale delle letture in termini della “posizione media” dell’insieme delle letture rispetto al valore noto del misurando, un parametro che corrisponde all’accuratezza della misura (valutazione a priori). Una bassa accuratezza corrisponde alla presenza di errori. Non è detto che il valore del misurando sia noto a priori (nel caso in esame le misure di temperatura ambiente e di radiazione solare, di temperatura dei pannelli, di portata di fluido termo vettore vengono misurate istantaneamente per tutti i casi e, memorizzate, le prime due ogni dieci minuti e le altre ogni istante (o minuto)) ; in ogni caso è valutabile la dispersione dell’insieme delle letture, un parametro che corrisponde a una situazione di incertezza sul valore del misurando (quello che interessa calcolare nell’ambito in studio).

In questo caso le misure valutate per il calcolo del rendimento termico e rendimento dalle prove del costruttore sono tutte istantanee: i valori essendo tutti istantanei (al minuto) sono associati ad un valore istantaneo di incertezza di misura, costante per tutto il campione singolo di misure (ciò dipende dalla misura presa in considerazione), ma che si ripercuote in modo diverso ed istantaneo appunto sul valore dell'incertezza finale dei rendimenti.

L'incertezza viene ad essere valutata in modo diverso in base alla grandezza presa in considerazione e i valori vengono stabiliti in base al data-sheet relativi ai diversi strumenti di misura:

- temperatura di ingresso e di uscita del fluido termo vettore dai pannelli: il dato viene letto come tolleranza e quindi incertezza di misura dal RTD Assemblies with Terminal Head and Direct Mount ed il valore risulta essere pari a 0,1°C;
- temperatura ambiente: il dato viene letto sulla base delle caratteristiche tecniche dei termo igrometri che misurano tale grandezza. Sulla scheda tecnica viene riportato il valore di accuratezza: l'accuratezza è una grandezza che riguarda l'incertezza sistematica e dipende dalla taratura e dalla classe dello strumento; il suo valore è tanto maggiore quanto minore è lo scarto delle osservazioni fatte con lo strumento in esame rispetto a quelle dello strumento accettato come strumento di riferimento e sito in un laboratorio metrologico accreditato o centro SIT. Essa rappresenta il grado di concordanza tra il valor medio desunto attraverso una o più misure e il relativo valore vero cioè il valore assunto come riferimento (quello del centro metrologico preso in esame). In questo caso ci si riferisce in particolare alla accuratezza strumentale che presenta l'attitudine di uno strumento di misura a dare indicazioni prive d'errori sistematici, e tendenti al valore vero del misurando. Uno strumento deteriorato o alterato, usato per acquisire una serie di valori, potrebbe apparire preciso in quanto i valori ottenuti potrebbero essere vicini tra loro, ma essere scarsamente accurato se questi valori differiscono dal valore reale del misurando. Gli errori sistematici per loro natura possono



essere corretti, e pertanto l'errore d'accuratezza non dovrebbe influire sull'incertezza di misura.

Nella pratica però spesso la correzione degli errori d'accuratezza su strumenti di misura:

- non è facilmente realizzabile;
- pur teoricamente realizzabile, non è conveniente per l'uso che si fa dello strumento;
- risulta troppo lunga o macchinosa date le necessità applicative.

In questo modo l'utilizzatore finisce per considerare come "vero" il valore direttamente letto sullo strumento, corretto o meno. In tal caso, l'errore d'accuratezza finisce a tutti gli effetti per peggiorare la precisione di misura, o in termini metrologici: aumentare l'incertezza di misura strumentale.

In pratica, all'incertezza di misura dovuta agli altri errori non correggibili (risoluzione, ripetibilità, incertezza dei campioni, ecc.) si somma anche l'incertezza che deriva dalla mancata correzione degli errori sistematici. Pertanto, in linea di massima:

$$I_{str} = |E_{acc}| + \sum I_k \quad (3.23)$$

dove:

$I_{str}$  = incertezza di misura dello strumento

$E_{acc}$  = errore d'accuratezza

$I_k$  = altri contributi d'incertezza

In particolare nel caso preso in esame si ipotizzano trascurabili gli altri contributi di incertezza perché non si conosce da cosa possa essere dato il loro contributo e si valuta l'accuratezza fornita dalle schede tecniche, indicata come contributo della riproducibilità della misura e dell'isteresi (un fenomeno per cui il valore assunto da una grandezza dipendente da altre è determinato, oltre che dai valori istantanei di queste ultime anche dai valori che avevano assunto in precedenza; ovvero l'isteresi è la caratteristica di un sistema di reagire in ritardo alle sollecitazioni applicate e in dipendenza dello stato precedente).

Un metodo semplice, anche se forse troppo conservativo, è valutare il contributo d'incertezza pari al massimo errore d'accuratezza (rilevato da una serie di misure)diviso radice 3 (secondo la “Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of National Institute of Standard and Tecnology Measurement Results”); cioè:

$$I_{acc} = \frac{E_{acc}^{max}}{\sqrt{3}} \quad (3.24)$$

dove:

$E_{acc}^{max}$ = massimo errore d'accuratezza rilevato ( quello presente nel data-sheet)

$I_{acc}$ = contributo all'incertezza dell'errore d'accuratezza.

In particolare dal data-sheet si legge un valore di accuratezza (pari ad  $E_{acc}^{max}$  ) di 0,1 °C (misurata ad un riferimento di 0°C); l'incertezza ad esso correlata viene ricavata dalla formula sopra riportata e quindi si ricava un valore di 0,057°C;

- portata di fluido termo vettore: le specifiche legate al flow-sensor danno un valore di incertezza basato sui dati elettrici che rileva il sensore per fornire il dato in litri al minuto. Le specifiche dello strumento riferiscono dati precisi quanto al campo di misurazione da 0,9 a 150 l/min per tubi con cinque diversi tipi di diametro e un ampio range di temperature di riferimento. L' accuratezza viene fornita in riferimento al fondo scala (ovvero il valore massimo misurabile dallo strumento di misura) e risulta essere pari all' 1% del fondo scala stesso: il tubo a cui si fa riferimento è un DN8, il cui fondo scala è 15 l/min; applicando la definizione di accuratezza, si valuta come incertezza il valore sopra riportato diviso radice di tre (3.24), si trova un valore di 0,0014 l/min;
- radiazione solare: come indicato nella prima sezione del Capitolo 3 essa è data dal contributo della radiazione diffusa e della radiazione diretta. Ad ognuna delle due è associato un valore di incertezza nelle schede degli strumenti di riferimento: per la radiazione diffusa si legge dalle caratteristiche tecniche dei radiometri globali il valore di incertezza su

base di un giorno pari al 2% della misura stessa; per la radiazione diretta si legge il valore dall'eliofanometro che riporta un valore di accuratezza pari al 5% + 5 W/m<sup>2</sup>, per cui su base della formula (3.24) si dovrà dividere per radice di tre per ricavare il valore di incertezza esatto. Inoltre la radiazione solare è una grandezza combinata dai due valori indicati sopra, perciò l'incertezza totale di tale grandezza viene calcolata in base alle valutazioni legate a misure indirette o combinate.

L'espressione per il calcolo dell'incertezza combinata è la seguente:

$$u(x_i)^2 = \sum_{i=0}^n (df/dq_i)^2 * u(q_i)^2 \quad (3.25)$$

Nella formula della radiazione solare  $q_i$  sono le diverse grandezze non costanti presenti nell'espressione: quanto alla radiazione totale si deve calcolarne la derivata rispetto ad esse (radiazione diffusa e radiazione diretta) e moltiplicare per il relativo valore di incertezza che in questo caso si tratta di incertezza a livello strumentale; l'incertezza della radiazione diffusa viene moltiplicata per il quadrato del fattore di vista (la derivata della radiazione totale rispetto alla radiazione diffusa:  $(1 + \frac{\cos(\beta)}{2})^2$ ) e l'incertezza della radiazione diretta è moltiplicata per il quadrato del coseno dell'angolo di incidenza della radiazione solare sul pannello ( $\cos(\theta)^2$ ), questo si ricava dalla espressione (3.10).

L'incertezza finale della radiazione solare è data dalla radice quadrata del valore sopra trovato e questo lo si può verificare per ogni singolo valore di radiazione solare delle prove run-time.

Invece, nella formula del rendimento misurato o rendimento da costruttore (3.14)  $q_i$  sono le diverse grandezze non costanti presenti nell'espressione; quello a cui si fa riferimento è  $\Delta T = T_p - T_a$  quindi se ne deve valutare l'incertezza strumentale, per cui i calcoli vengono fatti su base istantanea e non quanto a una distribuzione statistica. Per quanto riguarda  $T_p = \frac{T_{out} + T_{in}}{2}$ , considero  $u(T_{out})^2$  e  $u(T_{in})^2$ , quanto a  $T_a$   $u(T_a)^2$ ; questa ultima si valuta come variabile istantaneamente, per cui si avrà massima variabilità per ciascuna delle misure che si vengono ad effettuare. Poiché compare anche  $G_{totale1}$  bisogna considerare  $u(G_{totale1})^2$ : anche in questo caso il valore della radiazione viene valutata dalla stazione meteo in modo istantaneo (minuto per minuto) perciò si ha massima variabilità su tutto

l'insieme di misure che vengo ad effettuare. Si devono calcolare le derivate parziali rispetto a ciascuna di queste grandezze del valore del rendimento misurato e applicare la formula sopra (3.25) riportata con  $x_i = \eta_{misurato}$ . Lo scarto tipo o incertezza combinata di  $\eta_{misurato}$  è rappresentata dalla radice quadrata di  $u(x_i)^2$ .

Per quanto concerne il rendimento calcolato (3.16), l'incertezza combinata è data dal contributo di varie grandezze (quelle non costanti nella formula):  $\dot{m}$ ,  $\Delta T$ ,  $G_{totale}$  (mentre  $A_c$  e il valore di  $c$  risultano essere costanti). L'incertezza di queste grandezze, viene valutata su base strumentale. L'espressione per il calcolo dell'incertezza combinata è la seguente, come sopra:

$$u(x_i)^2 = \sum_{i=0}^n (df/dq_i)^2 \cdot u(q_i)^2 \quad (3.25)$$

Nella formula del rendimento  $q_i$  sono le diverse grandezze non costanti presenti nell'espressione;

$\Delta T = T_{out} - T_{in}$ ,  $\dot{m}$  è la portata di fluido,  $c$  il calore specifico (esso viene calcolato tramite l'espressione (3.18), in funzione di  $T_{in}$ , ma ricavando una blanda variabilità del calore specifico in base alle diverse  $T_{in}$  utilizzate, non si considera tale grandezza come contributo di incertezza). Per cui si devono considerare:

$u(T_{out})^2$ ,  $u(T_{in})^2$ ,  $u(\dot{m})^2$ ,  $u(G_{totale})^2$ . Si devono anche qui calcolare le derivate parziali rispetto a ciascuna di queste grandezze del valore del rendimento calcolato e applicare la formula (3.25) con  $x_i = \eta_{calcolato}$ . Lo scarto tipo o incertezza combinata di  $\eta_{misurato}$  e  $\eta_{calcolato}$  o  $\eta_{th}$  è rappresentata dalla radice quadrata di  $u(x_i)^2$ .

### Calcolo dell'incertezza nel caso non istantaneo.

Si vengono ora a valutare le singole giornate con ripetibilità di misure per ognuna delle grandezze che, combinate tra loro, costituiscono la grandezza in esame da analizzare, ovvero il rendimento.

Nel caso di ripetibilità delle letture, l'incertezza sul valore del misurando è valutabile con metodi statistici ("metodi di valutazione di tipo A"), con risultati non così diversi da quelli della teoria degli errori di Gauss. In particolare, la distribuzione normale, o di Gauss (o gaussiana) è una distribuzione di probabilità continua che è spesso usata come prima approssimazione per descrivere variabili casuali a valori reali che tendono a concentrarsi attorno a un singolo valor medio. Il grafico della funzione di densità di probabilità associata

è simmetrico e ha una forma a campana, nota come Campana di Gauss (o anche come curva degli errori, curva a campana,ogiva). Più specificamente, assumendo certe condizioni, la somma di  $n$  variabili casuali con media e varianza finite tende a una distribuzione normale al tendere di  $n$  all'infinito.

La GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement) raccomanda che l'incertezza a cui si giunge con metodi di tipo A sia valutata come la deviazione standard della media dell'insieme sperimentale delle letture, dunque come un stimatore della distribuzione di probabilità da cui si ipotizza le letture siano estratte.

Venendo a valutare i diversi valori presi in considerazione nei calcoli del rendimento per il criterio non istantaneo: temperature dei pannelli di ingresso ed uscita quanto al fluido termo vettore, portata di fluido termo vettore, temperatura ambiente, radiazione solare, si tiene conto di ognuna di esse come di un misurando  $X$  che è stata valutato  $N$  volte (dunque con un metodo di tipo A) e come risultato di tali valutazioni sono state ottenute le letture  $x_1, \dots, x_N$ . Il fatto che le letture  $x_i$  siano diverse tra loro e che il valore  $x_i$  non sia precisamente prevedibile a partire dai valori  $x_1, \dots, x_{i-1}$  suggerisce di formalizzare il misurando come una variabile casuale, i cui parametri statistici non sono noti e devono essere stimati a partire dai valori  $x_1, \dots, x_N$ , che si considerano "estrazioni campionarie" di tale variabile casuale: per ogni giorno si valutano "estrazioni campionarie" a livello istantaneo di tutte le grandezze definite istantaneamente, in base a criteri definiti subito in seguito (temperature di ingresso ed uscita del fluido termo vettore dal pannello e portata di fluido termo vettore) e delle grandezze definite di dieci minuti in dieci minuti (radiazione solare e temperatura ambiente). In questo caso si sceglie, al posto di valutare la costanza di dieci minuti in dieci minuti della radiazione solare e della temperatura ambiente e la conseguente loro ripetibilità in tale intervallo (corretto a livello concettuale), che porterebbe a non combinare nel modo corretto le grandezze per il calcolo dell'incertezza del rendimento, si ipotizza di valutare confronti tra valori mediati di dieci minuti in dieci minuti ( quindi si mediano i valori istantanei di temperature dei pannelli e di portata di fluido).

Quanto a tutti i dati (medi sui dieci minuti) analizzati per ogni giornata il valor medio delle diverse variabili casuali, e dunque dei misurandi, vengono stimati mediante i loro valori medi campionari:

$$\mu_X = \frac{1}{N} * \sum_{j=1}^N X_j \quad (3.26)$$

tale media porta un'informazione di posizione sulla variabile casuale, e viene quindi usato come stimatore per il valore da attribuire al misurando, in ogni

intervallo temporale di riferimento. Gli stimatori delle grandezze sono i valori medi appunto calcolati di dieci minuti in dieci minuti: l'obiettivo è quello di trovare la giusta dimensione campionaria da valutare quanto ai dati non istantanei, perciò si valuta di dieci minuti in dieci minuti la media dei valori istantanei (misurati ogni secondo e memorizzati ogni minuto) di temperatura del fluido termo vettore all'ingresso e all'uscita dei pannelli e il valore della portata di fluido termo vettore stessa.

Insieme con i valori per il misurando, occorre indicare una stima per la sua incertezza, che è evidentemente dovuta alla dispersione dei valori della variabile casuale intorno al valor medio.

D'altra parte interessa valutare l'incertezza non direttamente della variabile casuale ma del suo valor medio: il valore medio rispetto a cui calcolo la varianza è la media sui valori medi di dieci minuti in dieci minuti giornalieri (che costituiscono il campione di misure accettabile da prendere in esame) dunque per ogni intervallo di dieci minuti si calcola come segue la varianza campionaria:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_j - \mu_j)^2 \quad (3.27),$$

mentre la varianza del suo valor medio è:

$$\sigma_{\mu x}^2 = \frac{1}{N} \sigma_x^2 \quad (3.28)$$

la cui radice quadrata:

$$\sqrt{\sigma_{\mu x}^2} = \delta_x = \sigma_{\mu x}$$

è una deviazione standard, dimensionalmente omogenea al misurando e che ne formalizza l'incertezza standard (chiamata anche "incertezza tipo").

L'incertezza viene ad essere valutata in modo diverso in base alla grandezza presa in considerazione e i valori vengono stabiliti ciascuno quanto all'intervallo di dieci minuti in cui si considerano i differenti valori:

- temperatura di ingresso e di uscita del fluido termo vettore dai pannelli: il dato viene fornito quanto alla definizione statistica di incertezza, quindi si tratta di una deviazione standard. Essa viene calcolata relativamente alle misure di ogni intervallo di dieci minuti preso in considerazione;

### Capitolo 3

- temperatura ambiente: in questo caso si ha un valore singolo per ognuno degli intervalli di dieci minuti considerati; i valori sono forniti dal data-sheet meteorologico apportato dalla stazione meteo presente dove si trova l'impianto. Avendo valori singoli per ogni intervallo non si può valutare un'incertezza a livello statistico e quindi ci si riferisce, come nel caso istantaneo, all'incertezza valutata su base strumentale. Il dato viene letto sulla base delle caratteristiche tecniche dei termo igrometri che misurano tale grandezza. Sulla scheda tecnica viene riportato il valore di accuratezza. Dalle definizioni date in precedenza (3.23-3.24) si ricava un valore di incertezza quanto alla temperatura ambiente per ognuno dei valori memorizzati dal sistema di dieci minuti in dieci minuti pari a:  $0,057 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- portata di fluido termo vettore: per questa grandezza l'incertezza può essere valutata su base statistica, quindi come deviazione standard per ognuno degli intervalli di dieci minuti presi in considerazione. Si calcola quindi la deviazione standard dei valori stabili di portata per intervalli di dieci minuti in dieci minuti e tale valore coincide con l'incertezza di tipo A della grandezza portata di fluido termo vettore per ognuna di queste singole fasce ;
- radiazione solare: come per il caso della temperatura ambiente, anche per questa grandezza compare un singolo valore per ognuna delle fasce di dieci minuti che si vengono a considerare; infatti i dati sono memorizzati dalla stazione meteo con tale frequenza. Tuttavia, a differenza della temperatura ambiente, il data-sheet meteo fornisce la deviazione standard sia per quanto riguarda la radiazione solare diffusa, sia per la radiazione solare diretta. Per ognuna delle fasce di dieci minuti stabili tenendo conto dei dati riportati sul file meteo, si calcola l'incertezza finale di tipo A con l'espressione necessaria per il calcolo dell'incertezza combinata, essendo la radiazione solare data dal contributo del valore diretto e del valore diffuso come riportato nell'espressione (3.10), come valutato nella (3.25):  $u(q_i)$  sono rispettivamente le deviazioni standard della radiazione solare diretta e della radiazione solare diffusa per ognuna delle fasce orarie di riferimento dati dai file meteorologici.





## Capitolo 4

### Risultati

#### **Analisi di stabilità e caratteristica del rendimento in funzione delle condizioni ambiente e della portata.**

Per valutare ed analizzare gli aspetti indicati precedentemente si hanno a disposizione una serie di fogli di calcolo ognuno dei quali riporta caratteristiche interessanti quanto all'oggetto in studio:

- data-sheet meteo, elaborati dalla stazione meteo, posta sul tetto, che riferiscono i valori di temperatura ambiente, radiazione solare (con le sue componenti: diretta, diffusa e globale): i dati vengono elaborati ogni minuto in modo istantaneo, ma vengono salvati dalla memoria di riferimento con intervalli che vanno di dieci minuti in dieci minuti;
- fogli di calcolo elaborati dal sistema Labview, che riportano a livello istantaneo (minuto per minuto) i valori della temperatura di ingresso e di uscita dal pannello singolo e dai pannelli doppi, la portata di fluido termovettore circolante;
- fogli di calcolo legati alle elaborazioni della parte elettrica del sistema foto-termico, che riportano i valori di potenza elettrica prodotta dai pannelli e la velocità a cui ruotano (a livello percentuale rispetto al valore nominale) la pompa di immissione e il ventilatore di espulsione del circuito foto-termico e il valore della radiazione solare IRR: si tratta anche in questo caso di valori riportati istante per istante.

Vista la grande quantità di valori numerici a disposizione per intere giornate si sceglie di effettuare una restrizione dei dati stessi per assicurare maggiore precisione a livello dei risultati ottenuti.

Si decide di attenersi a quelli che sono dei criteri di stabilità: scelti con i metodi che si vengono ad enunciare i dati stabili, ci si attiene alla sola analisi di tali valori quanto alle grandezze in esame da calcolare.

### Stazionarietà termica.

Per i giorni presi in esame, che presentano un valore significativo per quanto concerne la radiazione solare (su tutti i campioni disponibili si prendono in considerazione sei giorni), si punta a livello del campo termico a tenere in considerazione tra tutto il numero di dati disponibili solo i valori stabili e quindi validi delle misure. Le temperature analizzate sono misurate dalle strumentazioni (termocoppie) presenti sul circuito e memorizzate dalla postazione di elaborazione dati minuto per minuto; si intende, dato ciò, avere una successione temporale di temperature tale per cui il  $\Delta T$  tra un valore e il seguente non sia un numero troppo elevato. Quanto a “ non troppo elevato” il criterio di scelta si basa su delle valutazioni percentuali fatte a livello giornaliero (per i giorni presi come riferimento): data in generale una differenza di temperatura massima tra una misura e la successiva pari a circa  $0,7^{\circ}\text{C}$ , si cerca di stabilizzare il campo di valori in modo da mantenere solo quelli che variano gradualmente; si fa una verifica per tutti i salti termici compresi tra  $0,1^{\circ}\text{C}$  e  $0,6^{\circ}\text{C}$ . I dati a cui infatti ci si riferisce sono valori sperimentali e per questo motivo possono dare origine ad instabilità termica per il pannello ovvero squilibri termici dovuti a:

- “salti” per quanto riguarda la radiazione solare;
- errori delle termocoppie che effettuano le misure termiche;
- errori nel sistema di elaborazione o acquisizione dati.

Il criterio percentuale (come indicato sopra) a cui si è deciso di attenersi e che viene rappresentato nel grafico sotto riportato, tiene in considerazione un range che valuta dal 25 % al 45% delle misure totali termiche acquisite e che si presenteranno stabili (ovviamente a causa della loro graduale variazione); si è fatta questa scelta (corrispondente a un  $\Delta T$  di  $0,1^{\circ}\text{C}$ ) perché in caso contrario oltre ad essere discrepanti tra loro i valori esaminati di temperatura, la loro cardinalità viene ad essere superiore al 90% circa.

Inoltre laddove i dati che si considerano rispettano il criterio di stabilità scelto, a quel punto essi(misurati in funzione del tempo), possono essere espressi

come un campione di misure singole, eseguite in istanti diversi, ma per cui si viene ad elidere la dipendenza dal tempo.

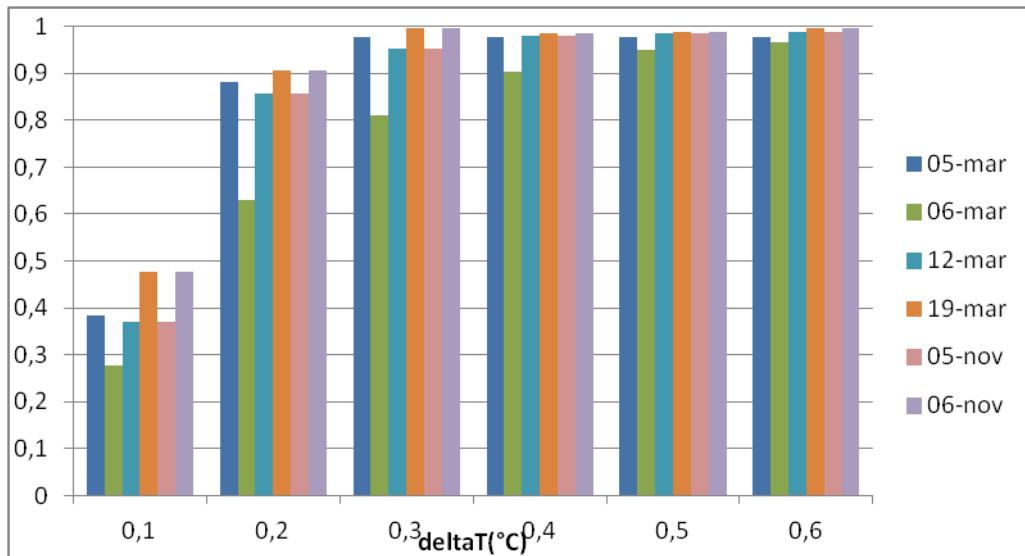


Figura 4. 1 Analisi percentuale fasce orarie stabili dal punto di vista termico.

## Stazionarietà della radiazione.

### Stazionarietà della radiazione quanto ai dati forniti dalla stazione meteo.

La stazione meteo fornisce diversi valori di radiazione solare (in particolare di ognuno di essi riporta il valore massimo, il valore minimo ed il valore medio) e di essi mostra i valori della radiazione solare diffusa, radiazione solare diretta e radiazione solare globale: durante il giorno si può ipotizzare che il valore della radiazione solare diffusa si mantenga all'incirca costante, in quanto influenzato dalle condizioni meteorologiche: in particolare dalla situazione del cielo, dalla presenza di nuvole e dalle particelle presenti nell'aria stessa. Si pone allora come obiettivo quello di valutare la stazionarietà a partire dai valori di radiazione solare diretta e la relativa deviazione standard fornita rispetto al valore medio; infatti delle varie componenti di radiazione quella soggetta a maggiore variabilità giornaliera è, appunto, la radiazione solare diretta. Un'analisi della stabilità vista come visualizzazione di bassi valori di deviazione standard della radiazione solare diretta a livello percentuale rispetto al valore medio della stessa, pone una scarsa restrizione a livello delle fasce orarie

caratterizzate da stabilità ripetuta durante l'intera giornata di radiazione; infatti per i giorni con maggiore irraggiamento si verifica che la fascia di interesse dalle 9.00 alle 16.00 presenta valori percentuali relativi di deviazione standard tutti all'incirca inferiori al 3%, valori molto bassi, che non consentono una selezione accurata e stabile dei dati. Si sceglie perciò di agire come segue per avere la certezza di avere dei campi di radiazione stazionari e poco variabili durante il giorno.

**Stazionarietà della radiazione( criterio esterno rispetto agli errori forniti dal sistema di acquisizione).**

In questo caso è necessario valutare come la stazione meteo e in particolare il relativo E-Log Data Logger elabori ed acquisisca valori della radiazione solare diffusa, radiazione solare diretta e radiazione solare globale ogni dieci minuti (dati sperimentali vengono memorizzati mediati sui dieci minuti): per l'analisi della radiazione estesa a tutto il giorno, si ipotizza che di dieci minuti in dieci minuti il valore della radiazione stessa si mantenga costante (per lo studio giornaliero estendo i valori di dieci minuti in dieci minuti). La verifica di stabilità si applica perciò legata alle misure memorizzate di dieci minuti in dieci minuti per ottenere il relativo numero di fasce orarie (costituite da blocchi di dieci minuti) in cui la radiazione solare si mantiene all'incirca costante: cioè per cui la differenza tra un valore e il seguente differisce meno del 5% (o del 10%, a seconda del criterio scelto) dal primo dato.

Trattandosi anche in questo caso di dati sperimentali essi possono essere affetti dai seguenti problemi:

- "salti" nella radiazione solare stessa, dovuti ad esempio ad un oscuramento imprevisto degli strumenti di misura per effetto di nuvole o dell'ombra di oggetti presenti nelle vicinanze degli strumenti di misura;
- errori dei radiometri che misurano le diverse componenti di radiazione:ci si riferisce per esempio al problema affrontato quanto al calcolo del valore corretto  $G_{totale1}$ ;
- errori nel sistema di elaborazione ed acquisizione dati.

Per i giorni particolarmente soleggiati presi in esame il valore di  $G_{totale1}$  risulta nel momento della giornata più irraggiato tra le 12 e le 13 pari a circa  $900 W/m^2$ .

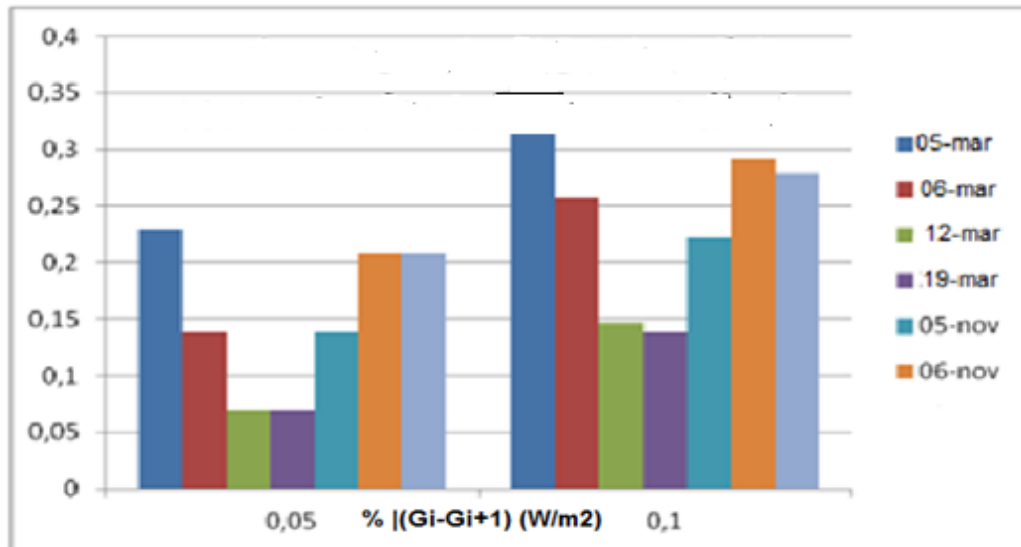


Figura 4. 2 Analisi fasce orarie stabili quanto alla radiazione solare (Gtotale 1 calcolata).

### Stazionarietà della temperatura ambiente.

In questo caso è necessario valutare come la stazione meteo e in particolare il relativo E-Log Data Logger elabori ed acquisisca valori della temperatura ambiente ogni dieci minuti (dati sperimentali vengono memorizzati mediati sui dieci minuti): per l'analisi della temperatura ambiente estesa a tutto il giorno, si ipotizza che di dieci minuti in dieci minuti il valore della temperatura stessa si mantenga costante (per lo studio giornaliero si estendono i valori di dieci minuti in dieci minuti). La verifica di stabilità si realizza perciò legata alle misure memorizzate di dieci minuti in dieci minuti per ottenere il relativo numero di fasce orarie (costituite da blocchi di dieci minuti) in cui la temperatura ambiente si mantiene all'incirca costante: cioè il  $\Delta T$  tra un valore misurato e il seguente non deve essere un numero troppo elevato.

Si tratta anche in questo caso di dati sperimentali; infatti la temperatura ambiente viene misurata da un termo igrometro presente a livello della stazione meteo: è rappresentativo di una linea di sonde precise ed affidabili, adatte per una misura continua in ambienti esterni severi, con presenza di forti escursioni termiche e igrometriche ed elevata radiazione solare. Una caratteristica importante di questa linea di sensori è la facile intercambiabilità del solo elemento sensibile termo igrometrico, che rende semplice ed

immediata la normale manutenzione programmata ed eliminando la necessità di calibrazione.

Queste misure, essendo sperimentali, possono essere affette dai medesimi problemi presentati al paragrafo precedente:

- errori del termo igrometro che misura il valore di temperatura ambiente (massimo, minimo e medio: ci si riferisce al valore medio);
- errori nel sistema di elaborazione ed acquisizione dati.

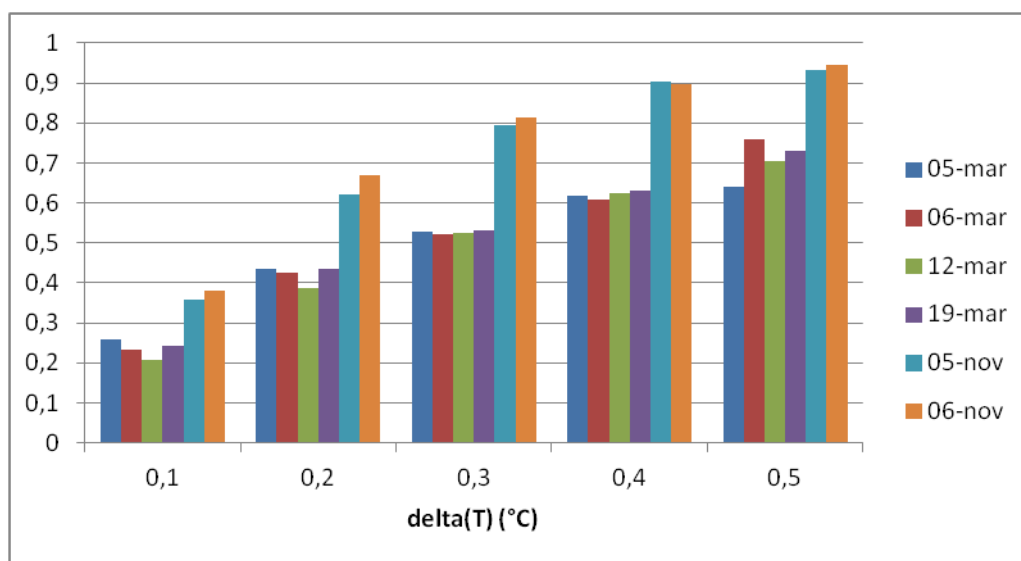


Figura 4. 3 Analisi percentuale fasce orarie stabili quanto a temperatura ambiente misurata dalla stazione meteo.

### Stazionarietà quanto a portata costante nel circuito di immissione (pompa di alimentazione).

Per i giorni presi in considerazione si valutano solo quelle fasce orarie (o giornate) in cui la velocità di rotazione della pompa di immissione del circuito dell' impianto si mantenga costante: ciò è fondamentale per assicurare un valore stabile di portata di fluido circolante nell'impianto stesso.

Per la struttura in esame si sceglie un circolatore come quello successivamente descritto.

I circolatori Grundfos, Serie 100, sono specificamente progettati per impianti di riscaldamento; le pompe sono adatte anche per la circolazione di acqua calda

sanitaria e per la circolazione del liquido di raffreddamento in impianti di condizionamento. Le pompe UPS SOLAR sono adatte per la circolazione dell'acqua negli impianti termici di riscaldamento solari residenziali.

Per impianti di riscaldamento e di distretto, si sceglie di utilizzare la pompa di tipo UPS.

Gli UPS possono funzionare a tre velocità diverse. Le pompe sono utilizzate principalmente per uno o due tubi per impianti di riscaldamento, ma sono, per esempio, anche adatte per miscelazione loop in sistemi complessi. Per i sistemi di riscaldamento a pavimento, si consiglia il tipo di pompa UP (S) N, siccome il liquido pompato può spesso diventare aerato, portando una pompa in ghisa ordinaria a corrodarsi. Riferendosi al motore della pompa di circolazione: esso è un 2 o 4 poli, asincrono, motore a gabbia di scoiattolo in conformità EMC direttiva.

Norme utilizzate: EN 61000-6-2 e EN 61000-6-3.

La morsettiera è facilmente accessibile e ha cavo funzionale ai morsetti di collegamento. L'entrata del cavo è stretto e incorpora il cavo stesso. La morsettiera e il gruppo motore-pompa sono stati testati all'umidità secondo la Direttiva Bassa Tensione.

Norme utilizzate: EN 60335-1 e EN 60335-2-51.

L'entrata del cavo di motori monofase può essere spinto dalle guide per facilitare il montaggio corretto del cavo.

Classe di isolamento: F / H.

Connessione via cavo: Pg 11 per 5,6-10 cavo mm.

Il motore incorpora sovraccarico termico o protezione di impedenza. Pertanto, non è richiesta nessuna protezione esterna al motore stesso. La pompa deve sempre essere installata con l'albero motore in orizzontale. All'avvio, la cassa del rotore viene scaricata, togliendo il tappo nella parte superiore del motore. In breve tempo, il rotore costringe l'aria residua fuori dal sistema attraverso l'albero.

### **Sovrapposizione tra fasce di stazionarietà.**

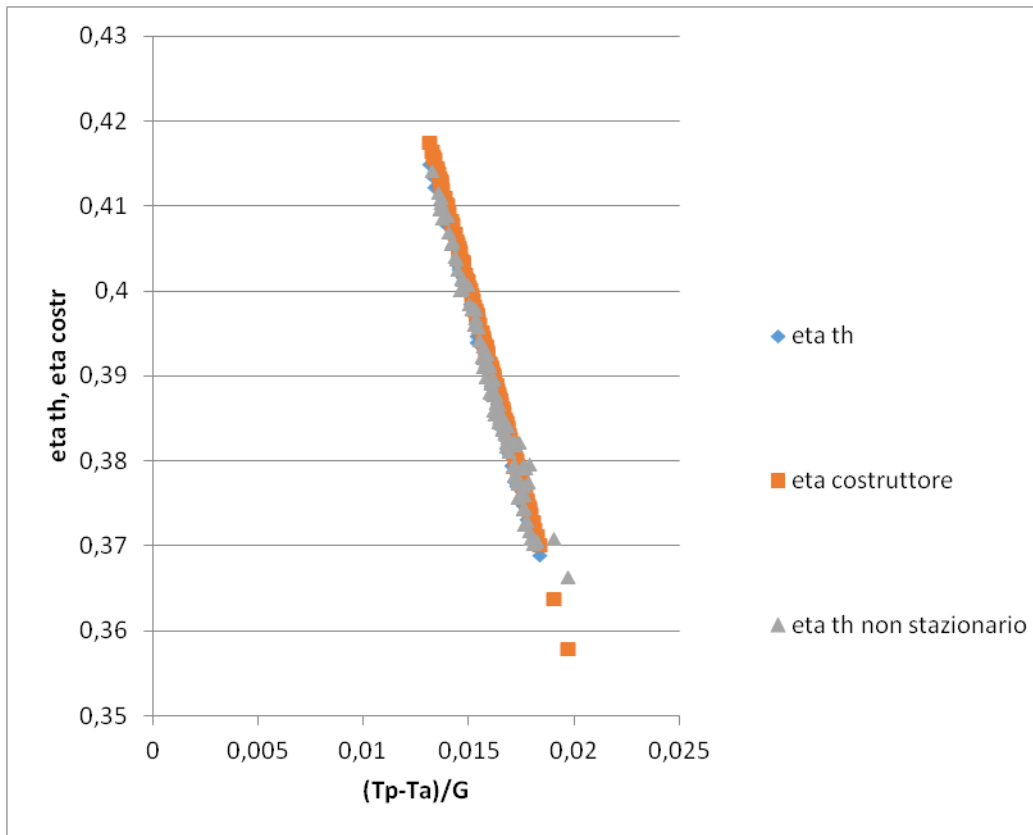
Mantenere come soli criteri di stabilità da applicare ai dati sperimentali quelli dati dalle condizioni di temperatura ambiente e radiazione solare e velocità di rotazione della pompa di immissione e riferire poi ad essi i dati termici dei pannelli solari mediati ogni dieci minuti, senza condizioni stabili, non fornisce stabilità quanto ai campi di rendimento misurato e rendimento calcolato (in questo modo essi presentano andamenti inversi).

Dalle indicazioni date quanto al concetto di stabilità, si pone come obiettivo quello di cercare di mantenere i criteri più selettivi per avere valori (anche successioni di dati singoli, che come precedentemente indicato, una volta che rispettano il criterio di stabilità, possono essere valutati come insiemi di dati indipendenti dalla variabile tempo e semplicemente rappresentativi di un insieme di campioni di misure prese in istanti diversi, il più stabili possibili):

- si scelgono giorni per i quali la velocità della pompa di immissione si mantiene costante, ovvero la percentuale del numero di giri della pompa rispetto al suo valore nominale resta invariato durante tutte le fasce orarie giornaliere;
- si scelgono fasce di dati (distribuite a livello temporale) in cui si abbia un  $\Delta$  tra valori di radiazione solare successive inferiore al 5% di una delle due radiazioni;
- si scelgono fasce di dati (distribuite a livello temporale) in cui il  $\Delta T$  tra valori successivi di temperatura, rispettivamente in entrata e in uscita dal pannello sia inferiore a 0,1 °C (si hanno fasce di molti valori singoli, ma si ha la certezza che in quei minuti si abbia stabilità del sistema: radiazione- pannello- condotto-fluido di lavoro- strumento di misura);
- si scelgono fasce di dati (distribuite a livello temporale) in cui si abbia un  $\Delta$  tra valori di temperature ambiente successive pari a 0,5 °C: non ci si pone in fasce analoghe quanto al criterio del caso precedente, se pur si tratti anche in questo caso di temperature, perché la temperatura ambiente è soggetta a variazioni significative quanto a  $\Delta T$  nelle fasce orarie di maggior crescita per la radiazione, quindi si verrebbe a restringere troppo il campo di dati e ad annullarne quasi totalmente la variabilità (solo nelle fasce orarie notturne la temperatura ambiente tende a rimanere circa costante, ma non si tratta comunque di una fascia oraria di interesse per quanto riguarda i campi termici stabili dell'acqua per il pannello e i campi stabili per la radiazione).

Inoltre bisogna fare in modo che ci sia coincidenza a livello temporale tra istanti (campioni) in cui si ha stabilità termica del pannello quanto all'acqua e della temperatura ambiente e della radiazione solare; si deve effettuare una sovrapposizione tra misure/campioni: per le analisi successive dei risultati si valuteranno solo dati che rispettano tale triplice criterio di stabilità.





**Figura 4. 4 Esempio (12 marzo 2014) di prestazioni valutate per pannello singolo con valori stabili e non stabili nel caso di una giornata tipo: evidenza di deviazione dal valore opportuno stimato esatto (caso stazionario) dei valori non stazionari.**

Come si vede dal grafico i valori delle curve di prestazione del rendimento termico sono differenti nel caso stazionario e in quello non stazionario, per quest'ultimo infatti si viene ad avere una deviazione non trascurabile rispetto ai valori di riferimento del costruttore:

$$\eta_{th} \text{ stazionario: } y = -9,0934x + 0,5351$$

$$\eta_{th} \text{ non stazionario: } y = -8,4069x + 0,5246$$

$$\eta_{costr} \text{ stazionario: } y = -9,12x + 0,5376$$

Da notare è che per il caso del rendimento del costruttore il fatto di esaminare dati stazionari o non stazionari non influenza l'andamento generale delle prestazioni relative, che risulta standardizzato dal costruttore appunto ed indipendente dai dati valutati.

## **Operazioni sperimentali effettuate sui pannelli influenzanti le prestazioni degli stessi.**

In data 5 marzo 2014, si è proceduto a pulire la superficie (a livello della copertura) degli assorbitori: l'obiettivo è stato quello di puntare ad un miglioramento delle prestazioni ottiche dei pannelli, date dal contributo dell'assorbanza, della riflettanza e della trasmittanza della radiazione solare sul pannello; le prestazioni ottiche, come si vede dalla formula sperimentale offerta dal costruttore (3.14) contribuiscono in modo notevole al rendimento termico del pannello e questo si osserva anche indirettamente a livello del valore del rendimento calcolato, in quanto al miglioramento delle prestazioni ottiche, verrà massimizzato il calore trasferito al fluido termo vettore, essendo a sua volta massimizzato il valore della radiazione solare che può essere assorbita.

Da analisi sperimentale si suppone infatti come nei mesi di settembre e novembre quando il sistema foto termico risultava essere ancora sporco che si abbia un valore ridotto rispetto al valore da costruttore quanto al rendimento ottico dei pannelli (rappresentato dalla intercetta del rendimento misurato); anche a marzo il valore del rendimento ottico misurato potrebbe risultare inferiore rispetto a quello del costruttore (fatto dovuto alla sperimentazione in ambiente soggetto comunque a sporco in ogni condizione), ma rispetto al caso a pannelli non puliti, si è certi che l'effetto della polvere depositata su di essi influenzi maggiormente le prestazioni ottiche rispetto al caso di marzo, per cui possono entrare in gioco la riflettanza, la assorbanza e la trasmittanza della radiazione solare stessa.

## **Analisi dei risultati.**

Quanto alla parte legata al calcolo delle prestazioni termiche in funzione dei dati legati all'ambiente, bisogna fare riferimento ai due criteri enunciati nella parte della metodologia: quello run-time e quello non istantaneo. Dall'analisi la prima delle due prove risulta essere piuttosto stabile quanto alla verifica dei due criteri di stabilità legati a tale metodo, la radiazione solare e la temperatura ambiente risultano stabili nel campo analizzato, mentre se si applica il riferimento al data-sheet meteo (quindi alla seconda metodologia) per il calcolo della radiazione solare e la rilevazione della temperatura ambiente,

che vengono appunto ad essere ripetute costanti di dieci minuti in dieci minuti, si vede come si venga ad avere una minore stabilità rispetto a queste due variabili da tenere in esame e perciò si abbia un maggior restringimento quanto alle fasce di radiazione solare e termiche stabili nei giorni di interesse (verifica applicata per i giorni a marzo in cui si è potuto eseguire direttamente il criterio run-time ed il criterio non istantaneo).

I risultati quanto alle curve di prestazione verificano che esse risultino sostanzialmente analoghe nei due metodi, se pur nel caso del criterio non istantaneo il rendimento ottico non da costruttore si riscontri essere leggermente superiore o inferiore ed in modo più marcato rispetto all'altro metodo a quello utilizzato dal costruttore stesso.

In particolare, la retta del costruttore a cui si fa fare riferimento è :

$$y = -9,12x + 0,5376 \quad (4.1)$$

i giorni in cui si sono calcolati i risultati delle prove sperimentali sono i seguenti:

**Tabella 4. 1 Analisi delle prestazioni giornaliere nel caso delle due diverse metodologie : RUN-TIME e NON ISTANTANEO (NN IST) per il pannello (pann.) singolo e il pannello(pann.) doppio**

	a1 RUN-TIME	$\eta_0^*k$ RUN-TIME	a1 NN IST	$\eta_0^*k$ NN IST
5 marzo Pann. singolo	-9,9513	0,5456	-9,6708	0,5422
5 marzo Pann. doppio	-9,12	0,5376	-9,344	0,533
6 marzo Pann.singolo	-8,1149	0,5215	-7,92264	0,5174
6 marzo Pann. doppio	-6,1412	0,4826	-7,2629	0,4986
12 marzo Pann. singolo	-9,0318	0,5341	-9,3661	0,5396
12 marzo Pann. doppio	-8,2468	0,5164	-9,2449	0,5332
19 marzo Pann.singolo	-8,8481	0,5285	-8,9104	0,5294
19 marzo Pann. doppio	-8,3094	0,514	-8,6966	0,5161
5 novembre Pann. singolo			-9,0643	0,5313
6 novembre Pann. singolo			-9,0024	0,5319

Osservazioni:

- 5 marzo pannello singolo: qui si osserva solo un lieve decremento delle prestazioni ottiche e della pendenza della retta interpolante nel caso NON ISTANTANEO rispetto a quello RUN-TIME;
- 5 marzo pannello doppio: qui si osserva un incremento non sensibile delle prestazioni ottiche nel caso NON ISTANTANEO, mentre tende a diminuire la pendenza della retta rispetto al caso RUN-TIME;
- 6 marzo pannello singolo: questo è il solo caso tra i vari analizzati in cui i DUE METODI DANNO RISULTATI NON PROPRIAMENTE CONCORDI e si ha uno scadimento sia della pendenza che del rendimento ottico in entrambi i metodi;
- 6 marzo pannello doppio: qui come nel caso precedente, è l'unico giorno in cui si vengono ad avere risultati diversi tra CRITERIO NON ISTANTANEO E RUN-TIME, si viene ad avere un scadimento delle prestazioni ottiche e della pendenza della retta interpolante;
- 12 marzo pannello singolo: qui si osserva un lieve incremento delle prestazioni ottiche e della pendenza della retta interpolante rispetto al caso RUN-TIME;
- 12 marzo pannello doppio: questo è un caso in cui il criterio NON ISTANTANEO tende ad avvicinarsi alle condizioni del costruttore rispetto al criterio RUN-TIME;
- 19 marzo pannello singolo: il criterio NON ISTANTANEO porta ad un lieve incremento delle prestazioni ottiche e della pendenza della retta, rispetto al caso RUN-TIME;
- 19 marzo pannello doppio: qui si osserva un lieve decremento delle prestazioni ottiche e della pendenza nel caso NON ISTANTANEO rispetto a quello RUN-TIME.

In generale si vede come CRITERIO RUN-TIME E CRITERIO NON ISTANTANEO, a meno della variabilità su giornate come il 6 marzo, diano all'incirca lo stesso risultato e la differenza dovrebbe essere data dalle fasce di incertezza legate ai rendimenti, di cui in seguito si vengono a presentare i risultati.

Inoltre quanto al confronto tra gli andamenti delle prestazioni da costruttore e quelli delle prestazioni calcolate, si nota come il costruttore si presuma abbia fatto le sue prove sperimentali (per ricavare la (3.14)) a pannelli puliti e in condizioni si suppone stazionarie.

Si verificano le prove sperimentali, in regime stazionario quanto ai criteri esposti precedentemente: le giornate si presentano particolarmente soleggiate per cui il valore della radiazione risulta pressoché stazionario in tutta la fascia oraria analizzata, mentre si realizza uno scostamento più leggero, se pur non significativo quanto alla temperatura ambiente, in quanto essa è soggetta a un maggior campo di variabilità durante il giorno dovuto anche alla intensità della radiazione solare. Per quanto concerne il campo di stabilità della temperatura sui pannelli esso risulta essere piuttosto restrittivo come criterio, perciò porta alla riduzione del campo di dati esaminati per effettuare sovrapposizione con gli altri due campi di stabilità (la temperatura risulta più stabile all'uscita che all'ingresso del pannello).

Da verifica sperimentale (a marzo) si vede come l'intercetta della retta (che descrive l'andamento del rendimento termico), che rappresenta il rendimento ottico sia leggermente inferiore rispetto al valore fornito dal costruttore pari a  $K \cdot \eta_o$ , mentre la pendenza risulta o leggermente maggiore o inferiore rispetto al valore  $a_1$  fornito dal costruttore e questa approssimazione risulta corretta.

Ci si ripropone di presentare a livello grafico il confronto nel caso di pannelli singoli in esame e nel caso di pannelli doppi in esame (si valutano separatamente) per due giornate particolarmente rilevanti quanto alla sovrapposizione dei dati forniti dal costruttore e quelli sperimentali, tali giornate risultano essere il 5 e il 12 marzo; ciò che emerge è la coincidenza quasi totale tra caso istantaneo e non istantaneo per le singole giornate, mentre le differenze tra i valori di rendimento calcolati e quelli da costruttore risultano essere presenti e ciò è dovuto ai campi di incertezza di misura di cui nel seguito si vengono a proporre i risultati.

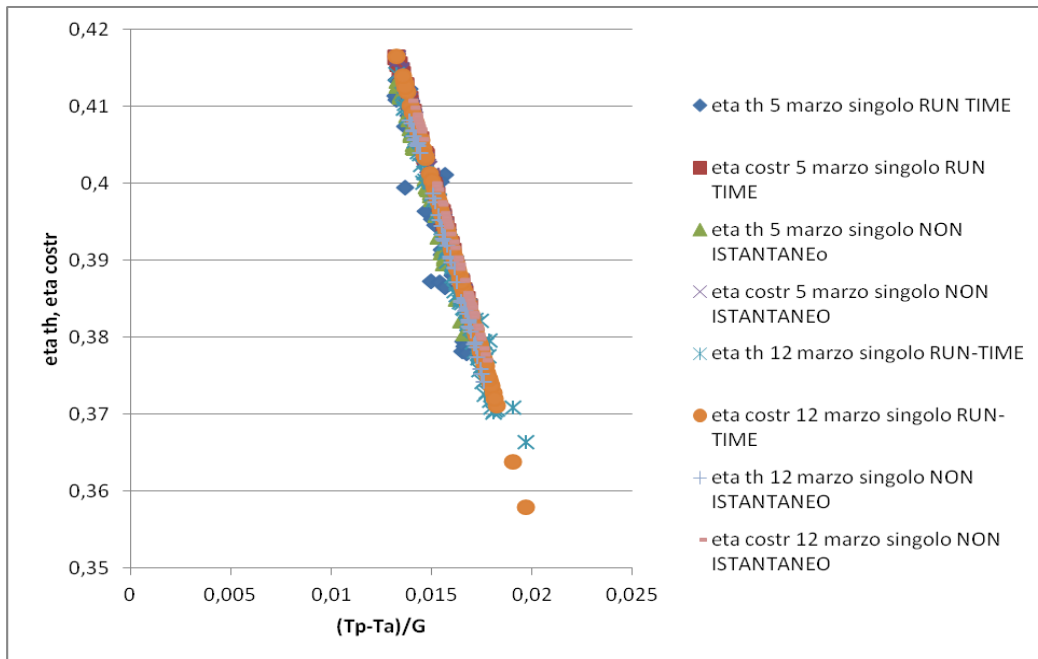


Figura 4. 5 Pannello singolo: 5 e 12 marzo analisi delle differenze tra caso RUN-TIME e NON INSTANTANEO quanto a rendimento termico e rendimento da costruttore.

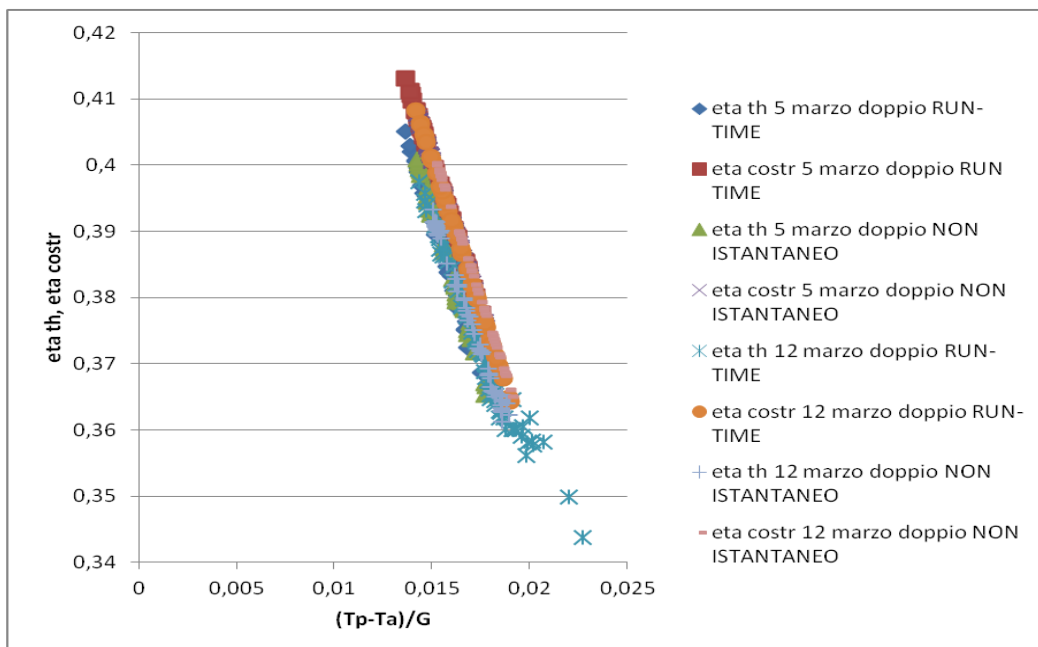


Figura 4. 6 Pannello doppio: 5 e 12 marzo analisi delle differenze tra caso RUN-TIME e NON INSTANTANEO quanto a rendimento termico e rendimento da costruttore.

E' necessario quindi corredare tutti i valori di rendimento calcolati da una fascia di incertezza per valutare la validità dei risultati nel campo opportuno. Per ognuna delle prove sperimentali si valuta l'incertezza dei rendimenti come media su tutti i valori presenti nella giornata di riferimento (i valori di incertezza si mantengono all'incirca costanti istante dopo istante) . Inoltre avendo un insieme n-esimo di dati istantanei per ciascuna giornata, ciascuno dei quali rispetta i criteri di stabilità riportati sopra, anche se non si riesce a valutare con esattezza il valore vero di rendimento, si può, su base statistica, approssimarlo alla media di tutti i valori istantanei presi in considerazione con ad esso riferita una media dei singoli valori di incertezza rilevati: questa approssimazione può risultare valida, perché ogni istante è come se misurassi un valore differente, per cui non si abbatte il concetto di distribuzione statistica dei valori misurati (che risulta essere pari ad una Gaussiana). I valori di incertezza calcolati per il caso RUN-TIME sono presentati nella tabella di seguito:

**Tabella 4. 2 Valori di incertezza istantanei del rendimento da costruttore e del rendimento termico per pannelli singolo e doppio**

	Inc $\eta$ termico Pannello singolo	%	Inc $\eta$ costruttore Pannello singolo	%	Inc $\eta$ termico Pannelli doppi	%	Inc $\eta$ costruttore Pannelli doppi
5 marzo pannello singolo	0,2744		0,4006		0,4905		0,4208
6 marzo pannello singolo	0,2671		0,4023		0,4863		0,4407
12 marzo pannello singolo	0,256		0,4169		0,4595		0,5091
19 marzo pannello singolo	0,2463		0,3781		0,4484		0,4027
Media	0,26095		0,399475		0,471175		0,443325

Dai dati sperimentali e confrontando i valori sul pannello singolo e sul pannello doppio si vede come gli ordini di grandezza di tutte le incertezze risultano essere costanti.

Da verifica sperimentale si ottiene che a livello percentuale il maggiore contributo quanto alla incertezza viene dato dal valore legato alla radiazione solare: sul valore di incertezza totale esso dà un contributo pari a circa il 90% (questo è dovuto principalmente al valore dell'incertezza che è dell'ordine di circa  $24 \text{ W/m}^2$ , più che al valore della derivata parziale calcolata rispetto alla radiazione solare): il maggior contributo dato dalla radiazione si riesce a valutare sia quanto al rendimento termico, che quanto al rendimento da costruttore.

Quanto al rendimento termico per il pannello singolo la sua incertezza risulta sempre essere all'incirca la metà di quella calcolata per il pannello doppio in particolare  $\frac{\eta_{\text{th singolo}}}{\eta_{\text{th doppio}}} = 0,55$ . Si effettua un controllo quanto al rapporto tra le derivate parziali della radiazione solare quanto al pannello singolo e al pannello doppio; si verifica che il rapporto trovato sopra è dovuto al fatto che per il pannello doppio ho due aree e quindi una doppia possibilità di offrire incertezza al sistema dovuta al doppio salto termico, che sulla percentuale totale del rendimento ha effetto di qualche punto percentuale (il valore della portata di fluido termo vettore è infatti poco rilevante ed il contributo del valore del  $c$  si elide, insieme anche al contributo dell'area e della radiazione solare stessa):

$$m \cdot \frac{c_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{G^2 \cdot A_c} \quad (4.1)$$

Venendo ad esaminare i singoli contributi delle derivate parziali inoltre si vede che tutti i contributi di incertezza tra pannello doppio e singolo risultano uguali tra loro, ma appare un fattore due di differenza tra i due (che per il pannello singolo risulta essere omissis) a denominatore:

quanto al contributo di incertezza legato alle derivate della temperatura di ingresso e di uscita del fluido dei pannelli, pari a

$$\frac{(m \cdot c \cdot 1)}{2 \cdot G \cdot a_c} \quad (4.2)$$

dove con 1 si indica il coefficiente della derivata rispetto alla temperatura; quanto alla portata di fluido termo vettore si trova che



## Capitolo 4

$$\left( \frac{c \cdot (T_{out} - T_{in})}{2 \cdot G \cdot A_c} \right) \quad (4.3)$$

e quanto alla radiazione solare

$$\left( - \frac{m \cdot c \cdot (T_{out} - T_{in})}{2 \cdot A_c \cdot G^2} \right) \quad (4.4)$$

esso fornisce un contributo a derivate parziali (contributo dell'incertezza al quadrato dalla formula (3.25)) sempre maggiore per il pannello singolo rispetto a quello doppio, ma ciò è bilanciato dal salto termico maggiore sul pannello doppio.

Quanto all'incertezza del rendimento da costruttore anche essa risulta essere maggiore per il pannello doppio rispetto al pannello singolo  $\frac{\eta_{costr\ singolo}}{\eta_{costr\ doppio}} = 0,88$ , ciò risulta dal rapporto tra i contributi alle derivate parziali della radiazione solare quanto al rendimento da costruttore:

$$\left( a_1 \cdot \left( \frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_a \right) \right) / (G^2) \quad (4.5)$$

e il contributo maggiore è dato dai rispettivi valori di temperatura che si hanno su pannello singolo e pannello doppio; infatti l'effetto della temperatura ambiente, della radiazione e di  $a_1$  è analogo per entrambi.

Quanto invece ai rapporti  $\frac{\eta_{th\ singolo}}{\eta_{costr\ doppio}} = 0,66$  e  $\frac{\eta_{th\ doppio}}{\eta_{costr\ doppio}} = 1,06$  la verifica matematica data dal contributo della derivata parziale della radiazione solare nelle espressioni del rendimento termico e del rendimento da costruttore si scontra con i valori sperimentali trovati e questo è dovuto alla variabilità dei dati presi in considerazione: si tratta infatti di associare per ogni giorno particolari salti termici sul pannello, valori di portata di fluido termovettore e valori di temperatura ambiente, che risultano puramente casuali e non spiegabili a livello matematico, a differenza invece di quanto trovato sopra. Si riesce quindi a trovare una spiegazione analitica dei rapporti esistenti tra rendimento termico e rendimento da costruttore quanto a confronto tra pannello singolo e pannello doppio, ma non si riesce a spiegare analiticamente il legame esistente tra rendimento termico e rendimento da costruttore nel caso sia di pannello singolo, sia di pannello doppio.

Come presentato al capitolo 3 si valuta l'incertezza dei rendimenti termico e da costruttore come incertezza combinata (3.25) delle grandezze che li costituiscono, anche per il caso non istantaneo. In particolare in questo caso il procedimento si fonda su tali considerazioni: per l'analisi dei dati qui rilevanti, bisogna porre come obiettivo quello di partire nelle valutazioni di questi ultimi con il fissare i criteri di stabilità presentati nelle sezioni iniziali del capitolo 4 e da lì venire ad analizzare nelle fasce in cui la radiazione solare è costante insieme alla temperatura ambiente (di dieci minuti in dieci minuti) il numero di dati per fascia oraria che si hanno a disposizione: in particolare si ragiona in modo inverso al caso istantaneo e si considerano valori medi per ognuna delle fasce orarie di interesse a radiazione solare stabile (per le temperature dei pannelli di ingresso ed uscita e per la portata di fluido si ragiona per ognuna delle fasce orarie stabili con valori medi stabili delle stesse): da qui si viene a valutare una distribuzione statistica delle misure in ciascuna delle giornate di riferimento, in base al numero di campioni che si hanno in gioco. Per  $N < 10$  si viene a valutare la distribuzione delle misure come una T.D Student, per  $N > 10$ , la distribuzione può essere approssimata con una normale o gaussiana e nel caso in cui un solo valore resti come accettabile a livello della giornata il criterio operativo viene a coincidere con quello istantaneo presentato per il caso istantaneo. In ogni caso l'incertezza viene ad essere valutata, per quelle grandezze che nell'intervallo di riferimento hanno un numero di dati superiore ad 1, come la deviazione standard delle stesse all'interno del relativo intervallo di riferimento, mentre come detto sopra, per le altre si considerano i valori di incertezza strumentale.

Si riportano in tabella per ogni singola giornata e ogni tipologia di pannelli l'incertezza media giornaliera, con la sola differenza che qui il valore medio è una media tra fasce orarie di dieci minuti e non una media di valori istantanei.

**Tabella 4. 3 Valori di incertezza non istantanei del rendimento da costruttore e del rendimento termico per pannelli singolo e doppio**

	<b>Inc <math>\eta</math>termico Pannello singolo</b>	<b>Inc <math>\eta</math>costruttore Pannello singolo</b>	<b>Inc <math>\eta</math>termico Pannelli doppi</b>	<b>Inc <math>\eta</math>costruttore Pannelli doppi</b>
<b>5 marzo pannello</b>	<b>0,153</b>	<b>0,26</b>	<b>0,3</b>	<b>0,31</b>
<b>6 marzo pannello</b>	<b>0,17</b>	<b>0,25</b>	<b>0,33</b>	<b>0,35</b>
<b>12 marzo pannello</b>	<b>0,165</b>	<b>0,29</b>	<b>0,305</b>	<b>0,32</b>
<b>19 marzo pannello</b>	<b>0,16</b>	<b>0,28</b>	<b>0,31</b>	<b>0,33</b>
<b>media</b>	<b>0,16125</b>	<b>0,27</b>	<b>0,31125</b>	<b>0,3275</b>

L'andamento dei valori di incertezza del sistema tende ad essere analogo a quello valutato per il criterio RUN-TIME: gli ordini di grandezza sono analoghi quanto ad incertezze del rendimento termico ed incertezze del rendimento da costruttore. Si nota però una differenza: il fatto che il valore di incertezza associato al rendimento termico sia circa la metà di quello valutato per il caso RUN-TIME ed anche il valore di incertezza quanto al rendimento da costruttore risulta essere inferiore. Come verificato sopra il maggiore contributo all'incertezza è dato dal valore della radiazione solare: in questo caso prendendo i dati memorizzati dal data-sheet, si riscontra un valore di incertezza minore quanto alla G totale, mentre gli ordini di grandezza delle derivate restano costanti: questo contribuisce a una riduzione del contributo di maggiore incertezza sia nel calcolo del rendimento termico che di quello da costruttore, che perciò risultano essere ridotte. Come sopra, inoltre quanto al rendimento termico per il pannello singolo la sua incertezza risulta sempre essere all'incirca la metà di quella calcolata per il pannello doppio in particolare 1,7 volte in meno rispetto a quella del pannello doppio; ciò è dovuto al fatto che per il pannello doppio ho due aree e quindi una doppia possibilità di offrire incertezza al mio sistema dovuta al doppio salto termico, che sulla percentuale totale del rendimento ha effetto di qualche punto percentuale. Le giustificazioni sono le stesse di quelle spiegate per il caso RUN-TIME.

Quanto all'incertezza del rendimento da costruttore anche essa risulta essere maggiore per il pannello doppio rispetto al pannello singolo, ma fino ad un fattore pari ad 1,4, questo visto che le incertezze hanno la stessa formulazione è dovuto al maggiore salto termico offerto dal pannello doppio rispetto al pannello singolo: ciò risulta dal contributo della derivata della radiazione per il pannello doppio circa pari a 1,4 volte quello del pannello singolo:

$$\left( a1 \cdot \frac{Tp-Ta}{G^2} \right) \quad (4.6)$$

non risulta invece dagli effetti delle derivate della temperatura che sono identiche nei due casi sia per il pannello doppio che per quello singolo

$$-\frac{a1 \cdot 1}{2 \cdot G^2} \quad (4.7)$$

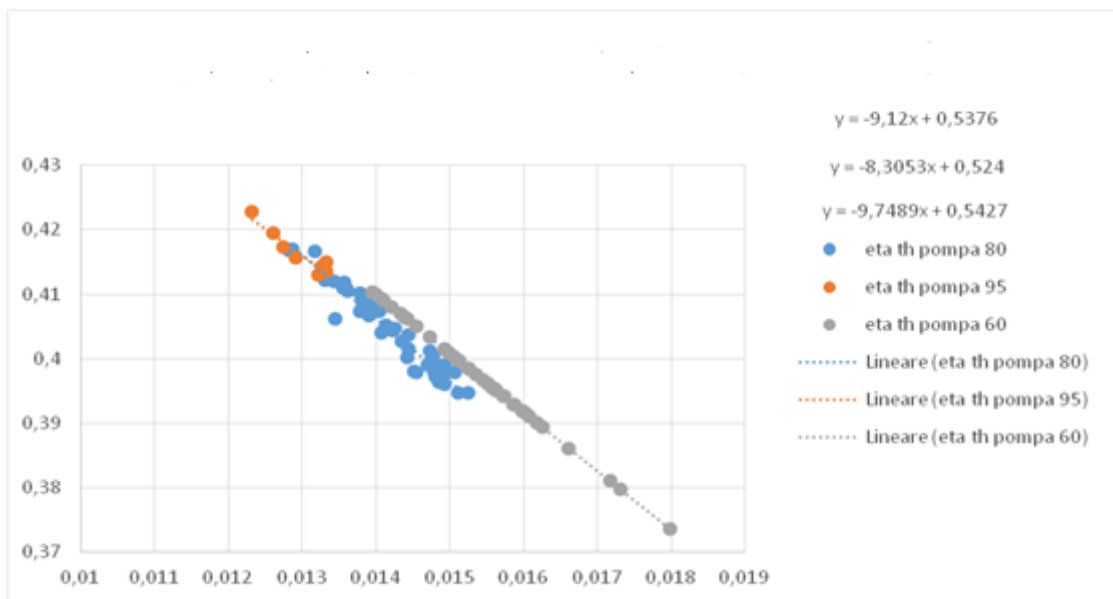
## Risultati ottenuti dall'analisi sperimentale.

### Analisi sperimentale di prestazione legata a stabilità (costanza) quanto a portata di fluido circolante nel sistema.

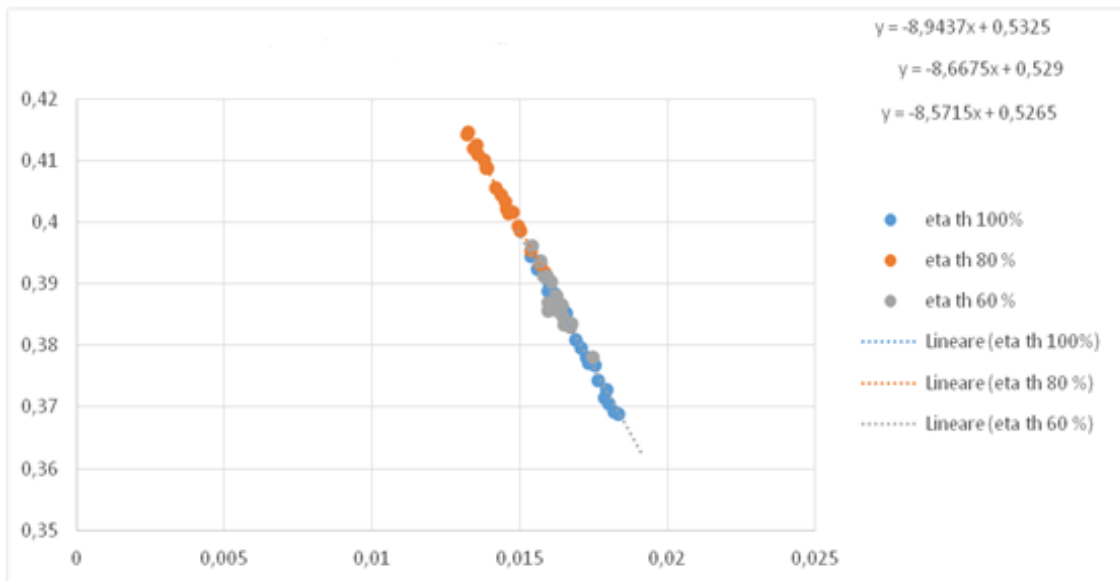
Dalla osservazione dei dati sperimentali, nelle giornate maggiormente soleggiate, si valuta un'analisi di prestazione legata alla portata di fluido termovettore circolante nel sistema, in modo da considerare solo quei giorni ( e quelle fasce orarie) in cui tale portata si mantiene costante: ovvero la percentuale del numero di giri a cui ruota la pompa di immissione (percentuale rispetto al valore nominale) si mantiene costante. In particolare si osserva come la stessa ruoti al 100% del suo valore nominale solo in giornate non molto soleggiate o in quelle fasce orarie (ad esempio quella esterna alla fascia che va dalle 9.00 alle 16.00 in cui si dovrebbe assistere a minor irraggiamento) in cui serve appunto fornire una maggiore portata di fluido per compensare lo scarso salto termico del fluido termovettore, così da avere comunque un valore di calore elaborato nel circuito abbastanza consistente.

Si sono poi analizzate quelle giornate in cui la velocità della pompa è appunto costante ( e quindi costante la portata) per vedere una relazione tra la portata del fluido e il valore del rendimento termico del sistema: si nota una indipendenza tra valore di velocità della pompa e pendenza della retta del rendimento misurato, infatti la indipendenza tra le prestazioni del pannello e il valore di velocità a cui circola la portata di fluido termovettore nel sistema è

rappresentata da una dipendenza inversa, rispetto a quella che ci si sarebbe potuti aspettare, che evidenza (questo è soprattutto riscontrabile il 12 marzo nel grafico presentato sotto) come le rette di prestazioni termiche risultano più inclinate per portate maggiori (maggiori giri della pompa, ove si presenta un coefficiente angolare delle rette di prestazioni termiche maggiore in modulo, rispetto al caso a portata minore, e minore a livello numerico, essendo la pendenza di tali rette negativa) e meno inclinate per portate minori (minori giri della pompa, ove si presenta un coefficiente angolare delle rette di prestazione minore in modulo, rispetto al caso a portata maggiore, e maggiore a livello numerico essendo la pendenza delle rette negativa); mentre il risultato atteso era quello di un andamento inverso: ovvero pendenze delle rette di prestazioni termiche basse in modulo ed alte a livello numerico (per pendenze negative) per alte portate di fluido (e quindi numero di giri della pompa di circolazione del fluido termo vettore) e pendenze delle rette di prestazioni termiche alte in modulo e basse a livello numerico (per pendenze negative) per basse portate di fluido (e quindi numero di giri della pompa di circolazione del fluido termo vettore). Inoltre dal primo grafico emerge una totale casualità di relazione tra la pendenza delle rette di prestazioni termiche e valore della portata di fluido circolante nel sistema.



**Figura 4. 7 Esempio della relazione tra la pendenza delle curve di prestazioni termiche dei pannelli foto termici e il valore della portata di fluido circolante nel sistema: 6 marzo 2014**

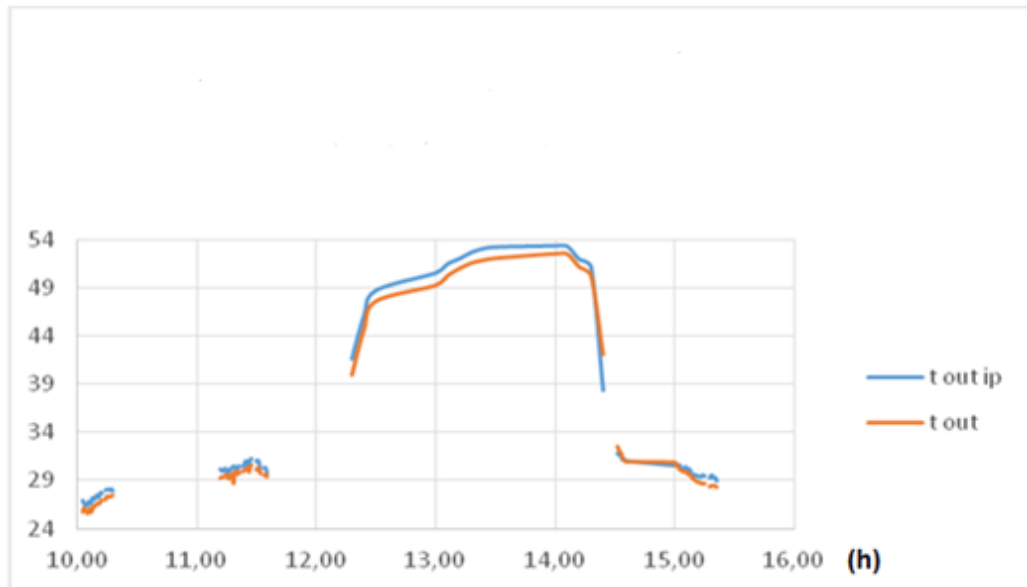


**Figura 4. 8 Esempio della relazione tra la pendenza delle curve di prestazioni termiche dei pannelli foto termici e il valore della portata di fluido circolante nel sistema: 12 marzo 2014**

### **Analisi sperimentale delle temperature all'uscita del pannello: confronto tra valori misurati e valori attesi dal costruttore.**

Da verifica fatta quanto a prove simultanee sul pannello si verifica come la temperatura all'uscita del pannello stesso fornita dalle termocoppie e il valore calcolato ipotizzando che il valore del rendimento termico (calcolato) e rendimento dato dai valori del costruttore siano uguali, risultano differire di alcuni decimi di grado. Questo significa che nelle fasce dove le temperature vengono leggermente a differire, il costruttore con la sua formula (3.14) ipotizza un pannello operante a temperature superiori (come si può vedere dal grafico sottostante, tout ip rappresentata dalla curva blu): potrebbe essere che non abbia utilizzato per le sue prove una miscela di acqua e glicole monopropilenico, come nel caso in esame, ma acqua, oppure che abbia operato in condizioni diverse da quelle in cui opera il sistema in studio. Ciò nonostante a prestazioni ottiche ottimizzate (come nell'esempio riportato per il 6 marzo a pannelli puliti) i rendimenti calcolato e il rendimento dai dati del costruttore risultano all'incirca coincidenti, perciò come in una fascia (quella dalle 14:30 alle 15:00) si vede

sovrapposizione tra valori ipotizzati e valori calcolati di temperatura all'uscita del pannello.



**Figura 4. 9** Analisi delle differenze di temperatura all'uscita del pannello singolo il 6 marzo 2014 nel caso in cui si ipotizzi il rendimento termico pari a quello del costruttore ( $t_{out\ ip}$ ) e nel caso reale, ove rendimento del costruttore e rendimento termico differiscono.

### Analisi sperimentale del transitorio di stagnazione.

Per temperatura di stagnazione a livello degli impianti solari si intende: la temperatura a cui può portarsi in condizioni standard un pannello solare termico quando non vi sia circolazione del fluido vettore. Tale temperatura varia da circa 120°C per pannelli solari piani fino ad oltre 200°C per i pannelli a tubi sottovuoto. Elevate temperature di stagnazione possono provocare problemi all'impianto solare.

A livello operativo la stagnazione si realizza spegnendo il ventilatore di espulsione del fluido termo vettore dal sistema, facendolo ruotare allo 0% della sua velocità nominale, così che si cerchi di far arrivare la temperatura sul pannello al valore massimo raggiungibile: se non si smaltisce il fluido di lavoro all'uscita del pannello, esso vi stagna all'interno e ciò consente che il  $\Delta T$  tra pannello e fluido di lavoro risulti praticamente nullo, ovvero il pannello e il fluido si porteranno all'incirca alla stessa temperatura e la temperatura del fluido termo vettore tra ingresso ed

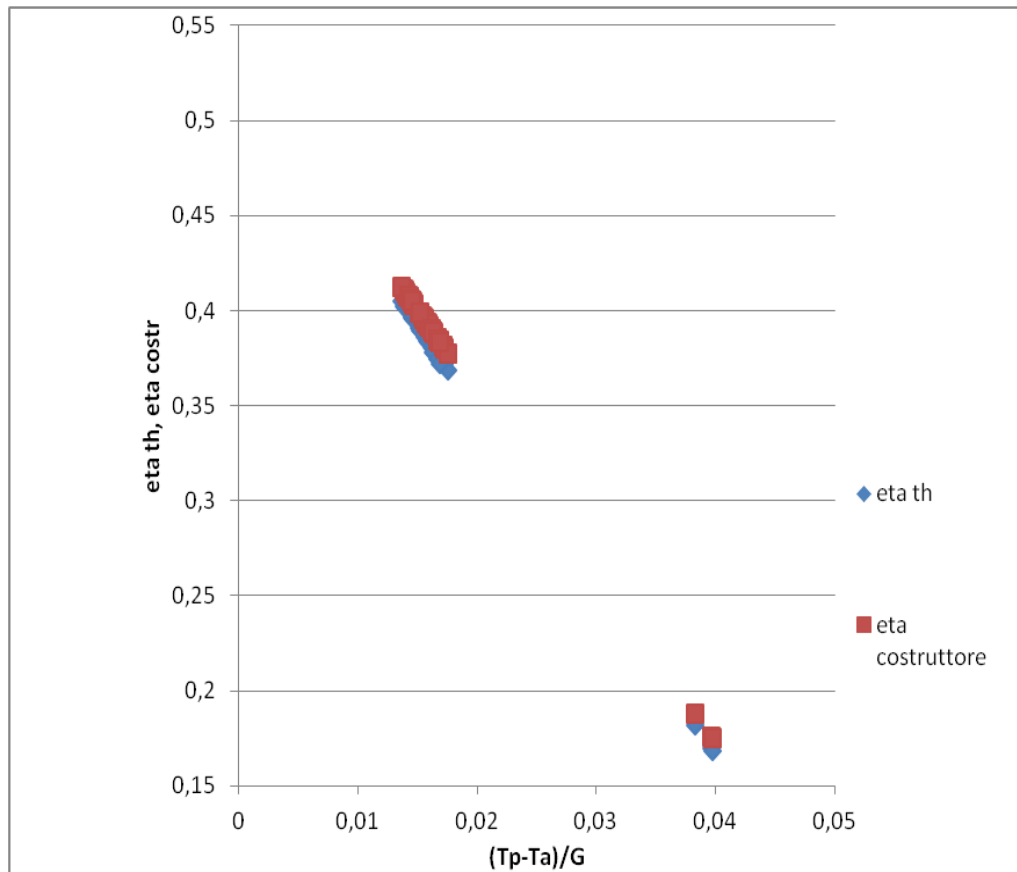
uscita risulta praticamente invariata. Il pannello assorbe tutto il calore disponibile dalla radiazione solare incidente sul pannello e non lo disperde ma lo accumula al suo interno. In queste particolari condizioni essendo il salto termico tra ingresso ed uscita del pannello nullo si viene ad avere un calore assorbito dal fluido come dalla (3.17) nullo per cui il rendimento termico del pannello come dalla (3.16) risulta anche esso essere nullo. In più la temperatura ridotta (3.23) risulta essere molto più alta del caso in cui la pompa opera alla stessa velocità ( ad esempio il 100%, come nei casi presi in esame), ma il ventilatore risulta acceso.

La verifica della stagnazione viene realizzata in due particolari giornate il 5 e il 12 marzo e viene valutata la curva di prestazione quanto ai pannelli doppi; l'idea è trovare dei punti della curva di prestazione a rendimento molto minore dei casi standard, senza stagnazione, ove la retta si tende a spingere verso valori della variabile  $x$ , cioè la temperatura ridotta, maggiori, come indicato sopra. A livello sperimentale ciò che si viene ad effettuare è un'analisi di un transitorio termico di stagnazione, ovvero per una certa fascia oraria, in particolare per i casi presi in esame, indicativamente dalle 12.50 alle 14.30 ove si sceglie di spegnere il ventilatore di espulsione del sistema, facendolo ruotare allo 0% della sua velocità nominale, così che la temperatura sul pannello risulti essere la massima raggiungibile, come sopra presentato.

L'analisi dei grafici delle prestazioni presentati di seguito mostra in realtà come la stagnazione non si verifichi nel pieno delle sue condizioni in tutto il transitorio presentato dalla fascia oraria in studio, ma sia legata appunto al concetto della necessità del sistema di scaldarsi fino a raggiungere le temperature necessarie al verificarsi della stagnazione stessa: il transitorio che infatti si dovrebbe venire a valutare per avere temperatura ridotta costante e pari al suo valore massimo e temperatura in uscita del fluido dal pannello pari alla temperatura di ingresso del fluido nel pannello e uguali entrambi indicativamente al valore massimo raggiungibile necessiterebbe di tempi di studio troppo lunghi, per cui bisognerebbe lasciare il sistema per molte ore a ventilatore spento così che si vengano a stabilizzare le temperature di ingresso e di uscita dal pannello e si possa verificare stazionarietà a livello del transitorio di stagnazione stesso. I grafici presentati mostrano come il 5 marzo non si verifichi stagnazione perché il rendimento tende ad abbassarsi ma la retta di prestazione non viene ad intersecare l'asse delle  $x$  con valori di rendimento termico nullo, come invece ci si aspetta. Il 12 marzo invece presenta una forte instabilità a livello del transitorio termico in studio perché il rendimento viene addirittura a scendere a valori negativi, come se il sistema venisse a cedere calore al posto che assorbirlo dalla radiazione solare: questo fatto praticamente impossibile e assolutamente non auspicabile per un sistema come quello in studio, che è atto ad assorbire la



radiazione solare e quindi ad acquisire e non cedere calore all'esterno, si verifica a causa della instazionarietà del transitorio per cui i risultati vengono a non essere accettabili.



**Figura 4. 10** Analisi del transitorio di stagnazione a livello della curva di prestazioni termiche del pannello doppio il 5 marzo 2014

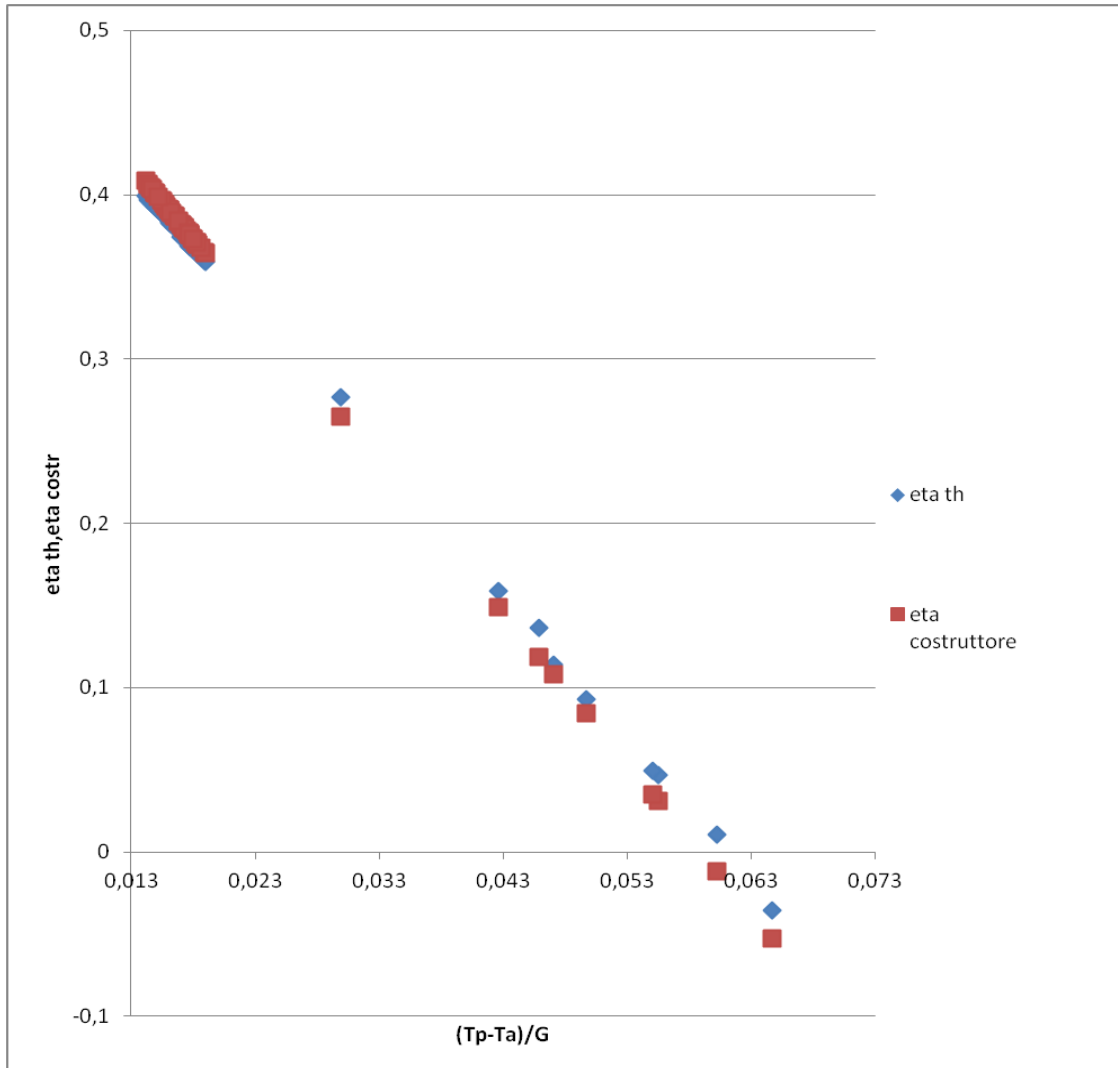


Figura 4. 11 Analisi del transitorio di stagnazione a livello della curva di prestazioni termiche del pannello doppio il 12 marzo 2014.

## Capitolo 5

### Inferenza statistica

#### Inferenza statistica nel caso RUN-TIME.

Si definisce come inferenza statistica l'insieme di quei metodi utilizzati per assumere decisioni per trarre conclusioni su di una popolazione e che per tale scopo si basano sull'informazione contenuta in un campione di tale popolazione. L'asserzione viene chiamata ipotesi (asserzione relativa ai parametri di una o più popolazioni), mentre il processo decisionale su di essa prende il nome di verifica di ipotesi. In tale processo decisionale l'ipotesi da verificare viene detta ipotesi nulla, mentre l'opposta risulta essere l'ipotesi alternativa. Una procedura che porta a una decisione inerente a una particolare ipotesi viene chiamata test di ipotesi. Questo tipo di procedure si basa sull'uso di informazioni contenute in un campione casuale estratto dalla popolazione di interesse. Se tali informazioni sono coerenti con l'ipotesi allora si conclude che quest'ultima è vera, in caso contrario si conclude che essa è falsa. La verità o la falsità di una particolare ipotesi non può mai essere nota con certezza a meno che si verifichi l'intera popolazione (cosa in genere non praticabile). L'ipotesi nulla è quella da sottoporre a verifica e il suo rifiuto porta all'elaborazione di una ipotesi alternativa. La verifica di ipotesi comporta la selezione di un campione casuale, il calcolo di una statistica test a partire dai dati campionari e l'utilizzo di tale statistica per assumere una decisione sull'ipotesi nulla.

Esiste inoltre una regione critica per la verifica, essa definisce un campo di valori rispetto ai quali si accetta o rifiuta l'ipotesi nulla. Gli estremi della regione critica sono detti valori critici. Si rifiuta l'ipotesi nulla a favore dell'ipotesi alternativa nel caso in cui la statistica test cada nella regione critica, la si accetta in caso contrario. In caso in cui si rifiuti l'ipotesi nulla in favore di quella alternativa, ma in realtà è la prima a risultare vera, questo tipo di conclusione errata viene detta errore del primo tipo. Visto che nell'analisi ci si affida a delle variabili aleatorie, la decisione legata a tali variabili può portare a degli errori, che si possono a loro volta associare a delle probabilità. La

probabilità di commettere un errore del primo tipo viene definita  $\alpha$  e la probabilità di un errore del primo tipo viene detta livello o ampiezza di significatività del test. Nel caso in cui invece si venga a realizzare il mancato rifiuto dell'ipotesi nulla quando essa è falsa viene detto errore del secondo tipo; la probabilità annessa al commettere un errore di secondo tipo viene definita  $\beta$ . La dimensione della regione critica e conseguentemente la probabilità  $\alpha$  di un errore del primo tipo, può essere ridotta tramite una opportuna scelta dei valori critici. Gli errori del primo e del secondo tipo sono correlati tra loro e una diminuzione della probabilità di commettere uno dei due errori è associata sempre a un aumento della probabilità dell'errore dell'altro tipo, basta che la dimensione campionaria non vari; un aumento della dimensione campionaria fa ridurre la probabilità di commettere entrambi gli errori purchè i valori critici siano mantenuti costanti. Visto che è possibile verificare direttamente la probabilità di rifiutare erroneamente l'ipotesi nulla, si considera sempre il rifiuto di tale ipotesi come una decisione forte.

Nel caso del criterio RUN-TIME l'obiettivo è quello di fare inferenza sulla media di una popolazione con varianza nota. Le assunzioni da tenere presenti sono:

- il campione di dati analizzati deve essere un campione casuale della popolazione di misure;
- la popolazione di misure è normale o, se non lo è, si applicano le condizioni del teorema del limite centrale (afferma che per una popolazione il cui numero di campioni tende ad infinito, la distribuzione di tale popolazione è valutabile come una distribuzione normale).

La media campionaria ( $x_m$ ) è uno stimatore puntuale non distorto ( se il valore atteso è pari al valore vero ( $\mu$ )).

A questo punto, nota la varianza della popolazione di misure si può affermare che

$$z = (x_m - \mu)/(\sigma/\sqrt{n}) \quad (5.1)$$

ha una distribuzione normale standard.

Il campione N di dati istantanei che si viene ad avere per ogni giornata quanto ai rendimenti termici e rendimenti da costruttore è piuttosto numeroso: nel rispetto dei criteri di stabilità si viene ad avere un campione piuttosto

numeroso di valori (maggiore o uguale a 20 in genere); quindi le assunzioni precedentemente indicate risultano essere valide.

I dati istantanei sono tutti noti: quindi se ne può ricavare il valore medio, la varianza e la deviazione standard. A questo punto quello che dovrebbe essere utile sarebbe cercare di capire come e se si possa fare inferenza su tale campione di misure: a priori, noti i dati, è possibile calcolare tutte le caratteristiche della distribuzione e volendo per ogni giornata trovare come riferimento un rendimento termico medio e un rendimento medio da costruttore e riferirgli la relativa incertezza media. Il fatto sta nel capire se tali valori calcolati risultano essere accettabili come valori veri delle misure.

Nel caso in studio fare inferenza significa verificare che il valore del rendimento misurato dal costruttore possa essere confrontabile con il rendimento termico calcolato e viceversa: infatti valore calcolato e valore misurato dovrebbero coincidere (a meno di una differenza attribuibile alla incertezza di misura nella loro valutazione) e questo è l'obiettivo della verifica.

Fare inferenza significa verificare che il valore medio calcolato per la distribuzione coincida con il valore vero per la distribuzione stessa (e in questo caso lo si può fare: la media dei rendimenti è calcolabile a priori noti i dati e l'interesse sta nel capire se tale valore sia plausibile come valore vero).

In particolare si esegue una doppia inferenza: i valori che si devono porre a confronto sono il rendimento termico e il rendimento da costruttore. Ci si propone di valutare per i diversi valori istantanei, una volta che se ne è ricavata l'incertezza e stimata la media, di verificare che:

- il valore medio dei valori istantanei di rendimento termico possa essere considerato come valore medio dei rendimenti istantanei da costruttore;
- Il valore medio dei valori istantanei di rendimento da costruttore possa essere considerato come valore medio dei rendimenti termici istantanei.

Nel caso preso in esame si ipotizza ciò: in particolare, tenendo presente che la precisione e quindi la relativa incertezza di misura è una grandezza che riguarda la ripetibilità delle osservazioni, dipende da incertezze casuali ed è rappresentata dalla deviazione standard (o scarto tipo) valutata sulla base di un insieme sufficientemente ampio di osservazioni (ovvero tutti i campioni istantanei che si hanno a disposizione giornalmente). L'incertezza di misura a livello statistico in generale è quindi pari alla deviazione standard dei dati che si prendono in considerazione; quindi si viene a valutare l'incertezza calcolata istantaneamente come deviazione standard dei valori di rendimento istantanei a livello dell'analisi statistica che si effettua nel processo di inferenza.

Per ognuno dei giorni presi in esame si deve verificare l'ipotesi vera sia per il rendimento termico che per il rendimento da costruttore: si deve avere che l'ipotesi vera cada all'esterno della regione critica e che quindi la statistica

$$z_o = (x_m - \mu) / (\sigma / \sqrt{n}) \quad (5.2)$$

cada nell'intervallo  $-z_{\alpha/2}$  e  $z_{\alpha/2}$ : dove  $z_{\alpha/2}$  è il 100  $\alpha/2$ -esimo punto percentuale della distribuzione normale standard. Nella situazione presa in esame non si conoscono i valori limite della regione critica in base a cui calcolare il livello o ampiezza di significatività dei test; si ipotizza perciò tale valore e si pone  $\alpha=0,00318$ , così che si possa ragionare e fare il raffronto sui punti percentili di una distribuzione normale standard, avendo un ampio valore della regione che verifica la ipotesi nulla e lasciando molto piccoli i valori delle code della distribuzione normale (all'aumentare di  $\alpha$  si amplia la dimensione della regione critica e quindi la probabilità di commettere un errore del primo tipo, cosa che si vuole escludere nell'analisi in corso). Si sceglie un  $\alpha$  molto piccolo perché si vogliono verificare le ipotesi nulle con alta probabilità: si vuole trovare con alta probabilità di cadere all'interno della regione critica e quindi avere probabilità di commettere un errore del primo tipo  $\alpha$  molto bassa (si auspica di evitare di rifiutare l'ipotesi nulla quando essa è vera).

Per  $\alpha=0,00318$  (ci si riferisce alla tabella della distribuzione normale standard cumulativa, presente tra gli allegati) e si trova che  $-3,6 < z_o < +3,6$ . In particolare in questo caso si ragiona a livello di confidenza noto, pari a 0,9985, quindi un valore molto alto, tale da avere ampiezza della regione critica minima per poter avere probabilità molto alta di verificare la ipotesi nulla rispetto a non verificarla.

Valutando un confronto tra un valore di rendimento calcolato con un bilancio termico (3.16) e un valore misurato quanto a una formula che viene fornita dal costruttore (3.14), si ipotizza di verificare che il rendimento misurato possa essere una buona approssimazione per il rendimento calcolato (rendimento termico) e viceversa che il rendimento calcolato possa essere una buona approssimazione per il rendimento misurato.

### Analisi sperimentale (valori medi giornalieri per il caso RUN-TIME)

Nella tabella sotto riportata si indicano in giorni in studio, il fatto che ci si riferisca a un'analisi legata al pannello singolo o ai pannelli doppi e con la dicitura  $th$  (riportata nella prima colonna), si vuole indicare la verifica della ipotesi nulla per cui  $x_m = \eta_{th}$  approssimi in modo soddisfacente (in base ai criteri di inferenza citati)  $\mu = \eta_{costr}$ ; viceversa ove la dicitura nella tabella indica  $costr$  (nella prima colonna) la ipotesi nulla consta nella verifica che  $x_m = \eta_{costr}$  approssimi in modo soddisfacente  $\mu = \eta_{th}$ .

In particolare essendo le  $\sigma$  del rendimento da costruttore e del rendimento termico uguali a livello di ordine di grandezza, nel processo di verifica dei percentili  $z_0$  rispetto alla distribuzione normale standard si ottiene che i percentili che soddisfano la probabilità di ricadere nella regione non critica non sono influenzati dal tipo di ipotesi ovvero legati all'ipotizzare che il rendimento da costruttore possa approssimare il rendimento termico o viceversa: infatti in entrambi i casi i valori di  $\sigma$  sono talmente piccoli da fornire dei corrispettivi percentili che sono molto esterni rispetto alla regione non critica (vedi allegato quanto alla distribuzione normale standard). Il valore che può influenzare il valore del punto percentile è rappresentato dal numero di misure stabili, in relazione a cui per ogni giorno si può verificare se le ipotesi nulle sono attendibili o meno, in base a questa grandezza variabile (è la sola che varia in modo sensibile, essendo i valori di  $\sigma$  molto piccoli come ordine di grandezza); la sola altra variazione da cui può dipendere la validità o meno dell'ipotesi nulla è data dalla differenza tra valore ipotizzato e valore vero. I soli casi indicati sono quelli che soddisfano quanto si vuole dimostrare; i risultati dimostrano come tanto minore è la differenza tra valore calcolato e valore misurato, più facile sarà la probabilità di soddisfare l'ipotesi nulla.

**Tabella 5. 1** Analisi di inferenza statistica per valori medi giornalieri di rendimento termico e rendimento da costruttore per il caso RUN-TIME.

	N	$\sigma$	$x_m$	$\mu$	$z_o$	Ipotesi nulla ( $x_m = \mu$ ) verificata?
5-03 sing.th	33	0,00274	0,399	0,395	9,63	NO
5-03 sing.costr	33	0,00401	0,395	0,399	-6,59	NO
5-03 dopp. th	44	0,00491	0,396	0,387	11,22	NO
5-03 dopp.costr	44	0,00421	0,387	0,396	-13,08	NO
6 -03 sing. th	25	0,00267	0, 406	0,408	3,5567	SI
6 -03 sing. costr	25	0,00402	0,408	0, 406	2,3614	SI
6-03 dopp. th	19	0,00486	0,385	0,391	-5,64	NO
6-03 dopp.costr	19	0,00441	0,391	0,385	6,23	NO
12 -03 sing. th	63	0,00256	0,393	0,391	6,51	NO
12-03 sing. costr	63	0,00417	0,391	0,393	-3,99	NO
12-03 dopp. th	50	0,00459	0,385	0,378	10,15	NO
12-03 dopp.costr	50	0,00509	0,378	0,385	-9,16	NO
19 -03 sing. th	20	0,00261	0,411	0,406	8,39	NO
19-03 sing. costr	20	0,00399	0,406	0,411	-5,48	NO
19 -03 dopp. th	20	0,00471	0,40	0,398	1,89	SI
19-03 dopp.costr	20	0,00443	0,398	0,40	-2,01	SI



## Analisi sperimentale 2 (valori istantanei giornalieri per il caso RUN-TIME).

In questo caso si tratta di valutare se possa approssimare il rendimento termico ( $\mu$ ) con il rendimento da costruttore ( $x_m$ ) istante per istante; il campione di misure a questo punto risulta essere rappresentato da un campione alla volta (un singolo istante  $n=1$ ). Ciò che si procede ad analizzare è comunque un tipo di inferenza sulla media (i valori dei rendimenti) a varianza nota (le incertezze di misura dei rendimenti stessi), perciò si utilizza come riferimento per l'analisi statistica la distribuzione normale standard anche se il campione di misure è poco numeroso: in questa circostanza bisogna tenere presente che il valore del livello di confidenza non sarà così certo e definito per la verifica di ipotesi che si va a realizzare; si dovrà perciò verificare per quale livello di confidenza si può trovare la verifica della ipotesi nulla (fino a che livello posso spingere l'ampiezza della regione critica) e per quale invece la ipotesi nulla non risulti essere verificata. In questo particolare caso si valuta come sola ipotesi nulla quella che verifica se il costruttore abbia indicato valori attendibili quanto alla sua curva di prestazioni rispetto al caso reale. Da ciò segue che  $x_m = \eta_{costr}$ , mentre  $\mu = \eta_{th}$ .

In particolare si verifica che per pannelli singoli il livello di confidenza a cui ci si può spingere lasciando comunque verificata la ipotesi nulla è pari all'85% e al 90 % per il pannello doppio.

## Inferenza statistica nel caso non istantaneo.

### Analisi sperimentale (valori medi giornalieri):

Nel caso di inferenza statistica per il caso non istantaneo la metodologia resta quella utilizzata per il caso istantaneo, con la differenza che il campione di misure risulta essere molto più ristretto (si viene in genere ad avere al massimo poco più di una decina di valori accettabili, cioè stabili ogni giorno) e l'incertezza di misura risulta essere minore di qualche punto percentuale, quanto al minor contributo di incertezza dato dalla radiazione solare ed esplicito nel capitolo 4. Quanto al valore di  $\alpha=0,00318$ , come nel caso precedente si vuole verificare un'ampiezza della regione critica molto ristretto (ci si riferisce alla tabella della distribuzione normale standard cumulativa) e si trova che  $-3,6 < z_0 < +3,6$ .

**Tabella 5. 2** Analisi di inferenza statistica per valori medi giornalieri di rendimento termico e rendimento da costruttore per il caso non istantaneo.

	n	$\sigma$	$x_m$	$\mu$	$z_o$	Ipotesi nulla ( $x_m = \mu$ ) verificata?
5-03 sing.th	9	0,0015	0,4002	0,397	7,58	NO
5-03 sing.costr	9	0,0026	0,397	0,4002	-4,26	NO
5-03 dopp.th	13	0,0029	0,394	0,386	9,75	NO
5-03 dopp.costr	13	0,0031	0,386	0,394	-8,76	NO
6-03 sing.th	12	0,0017	0,402	0,399	5,34	NO
6-03 sing.costr	12	0,0025	0,399	0,402	-3,31	SI
6-03 dopp.th	10	0,0033	0,397	0,387	9,64	NO
6-03 dopp.costr	10	0,0037	0,387	0,397	-8,60	NO
12-03 sing.th	15	0,0017	0,393	0,391	4,21	NO
12-03 sing.costr	15	0,0029	0,391	0,393	-2,39	SI
12-03 dopp.th	16	0,0031	0,382	0,376	8,26	NO
12-03 dopp.costr	16	0,0032	0,376	0,382	-7,87	NO
19-03 sing.th	10	0,0016	0,409	0,405	10,54	NO
19-03 sing.costr	10	0,0028	0,405	0,409	-5,83	NO
19-03 dopp.th	10	0,0028	0,401	0,389	13,52	NO
19-03 dopp.costr	10	0,0033	0,389	0,401	-11,43	NO

Il procedimento utilizzato per indicare le verifiche di ipotesi nulla nella tabella sopra riportata è pari a quello indicato per il caso RUN-TIME.

Anche in questo caso particolare essendo le  $\sigma$  del rendimento da costruttore e del rendimento termico uguali a livello di ordine di grandezza, nel processo di verifica dei percentili  $z_o$  rispetto alla distribuzione normale standard si ottiene che i percentili che soddisfano la probabilità di ricadere nella regione non critica non sono influenzati dal tipo di ipotesi ovvero legati all'ipotizzare che il rendimento da costruttore possa approssimare il rendimento termico o viceversa: infatti in entrambi i casi i valori di  $\sigma$  sono talmente piccoli da fornire dei corrispettivi percentili che sono molto esterni rispetto alla regione non critica (vedi allegato quanto alla distribuzione normale standard). Il valore che può influenzare il valore del punto percentile è rappresentato dal numero di misure stabili, che inoltre in questo caso non istantaneo risulta molto inferiore rispetto al caso RUN-TIME, quindi per ogni giorno si può verificare se le ipotesi nulle sono attendibili o meno in base a questa grandezza variabile (è la sola che varia in modo sensibile, essendo i valori di  $\sigma$  molto piccoli come ordine di grandezza); la sola altra variazione da cui può dipendere la validità o meno dell'ipotesi nulla è data dalla differenza tra valore ipotizzato e valore vero. I soli casi indicati sono quelli che soddisfano quanto si vuole dimostrare; i risultati dimostrano come tanto minore è la differenza tra valore calcolato e valore misurato, più facile sarà la probabilità di soddisfare l'ipotesi nulla. Si dimostra inoltre facendo riferimento al caso RUN-TIME come la riduzione della incertezza incida di più della riduzione del numero di misure stabili quanto al valore del percentile della distribuzione normale in esame: infatti nonostante il numero di misure sia molto inferiore entrano in gioco sia la incertezza e quindi la  $\sigma$  molto ridotta, sia la differenza tra rendimento calcolato e misurato, che, restando comunque sensibile, fa spesso cadere la validità della ipotesi nulla e fa ricadere i risultati all'interno della regione critica.



## Capitolo 6

# Confronto prestazioni elettriche pannelli fotovoltaici standard e pannelli a recupero termico

Si tratta di valutare le differenze tra i moduli a recupero termico e i moduli fotovoltaici quanto alle potenze elettriche generate. In particolare si viene ad analizzare la energia elettrica che viene immessa direttamente in rete (o alternativamente che viene direttamente sfruttata in loco) e quindi il valore della stessa che si viene ad avere dopo l'inverter; viene quindi ad essere considerato anche il rendimento dell'inverter, che porta ad un abbassamento dell'entità della potenza utile, anche se non consistente essendo le prestazioni di questo dispositivo molto elevate, e che trasforma la corrente continua (DC) in ingresso in una corrente alternata (AC) in uscita (che è quella che si viene a utilizzare).

Per quanto concerne la scelta dei pannelli sui quali effettuare il confronto bisogna tenere in considerazione le seguenti condizioni:

a livello del lato a recupero termico si viene ad analizzare solo ed esclusivamente la potenza/energia erogata dai pannelli in serie del circuito, il pannello singolo infatti non è connesso alla rete; in particolare, di questi ultimi, si valutano i dati relativi al solo pannello A 6.2, ovvero quello più a destra nello schema di impianto, più lontano dalla canalina e quindi il più freddo. Infatti l'altro pannello, quello più caldo e vicino alla canalina, A 6.1 presenta dei problemi di ombreggiamento per cui non si ha una misurazione uniforme dei valori di potenza/energia elettrica necessari, ma essi presentano una discontinuità in presenza dell'ombreggiamento;

a livello del lato fotovoltaico tradizionale il riferimento è dato dal pannello A4.2, che da schema di impianto è l'Aleo della fila davanti e posto davanti ad A 6.2.

Dalla analisi dei dati emerge quanto si evince dai grafici presentati in seguito di due giorni tenuti come base in due differenti momenti dell'anno (tra quelli

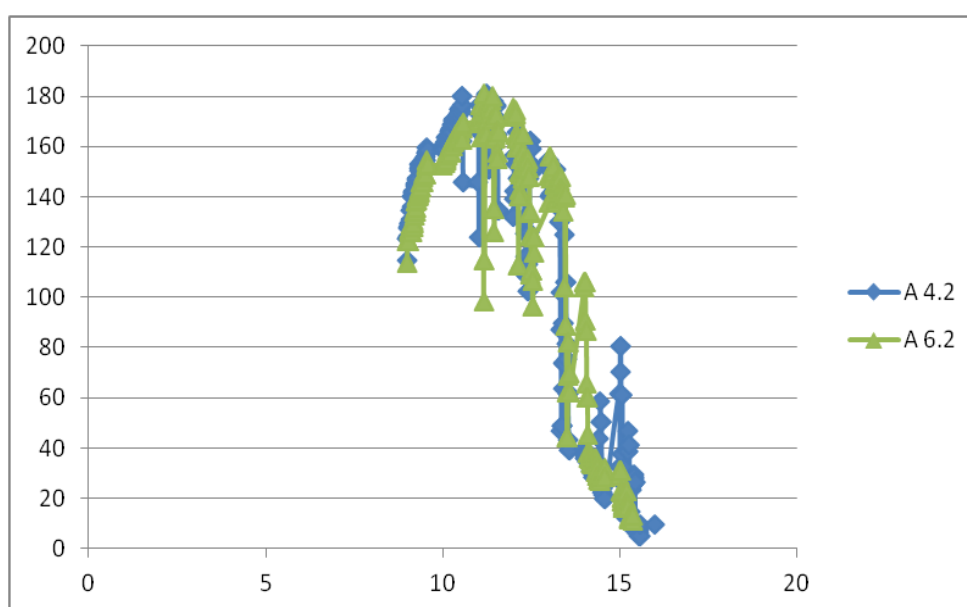
esaminati presentano i valori di potenza/energia maggiori: 5 marzo e 5 novembre), ove l'andamento della potenza/energia nella fascia oraria rilevante (dalle 9 alle 16), risulta avere analogo andamento a campana nel caso foto-termico e nel caso tradizionale. A livello generale, come da grafici, non si riscontra una differenza netta quanto alla entità della potenza generata dai pannelli presi in esame; si presenta la potenza giornaliera, che viene comunque ad essere elevata perché ci si riferisce a condizioni di giornate particolarmente soleggiate, ove la temperatura media ambiente è all'incirca pari 20 °C.

A questo punto si preferisce effettuare un confronto a livello numerico ( e non solo grafico), quanto a dati complessivi giornalieri per quattro giornate di interesse studiate (2 per i mesi invernali: 5 e 6 novembre 2013 e 2 per i mesi primaverili: 5 e 6 marzo 2014); i dati che si vengono ad analizzare sono valori complessivi di energia giornaliera prodotta dal pannello fotovoltaico tradizionale (A4.2) e dal pannello foto-termico non ombreggiato (A6.2), quanto alla energia termica essa si viene invece a misurare a livello di entrambi i pannelli foto-termici. Le misurazioni vengono valutate in wattora (Wh). Dal confronto tra i risultati emerge la auspicabilità nella scelta di un impianto foto-termico rispetto ad un impianto fotovoltaico tradizionale durante tutto l'anno (si stanno infatti facendo riscontri a livello di periodi dell'anno molto diversi tra loro): infatti la energia elettrica complessiva prodotta a livello del pannello A6.2 risulta sempre sensibilmente maggiore rispetto a quella prodotta dal pannello tradizionale ed inoltre vista la maggiore radiazione solare i pannelli nel periodo primaverile producono di più del periodo invernale. Ancora, i pannelli foto-termici sono dotati dell'effetto del recupero termico, che ne consente la produzione di ulteriore energia, oltre a quella elettrica già prodotta in surplus rispetto al sistema tradizionale: anche se il surplus dal lato elettrico non risulta così marcato, l'aggiunta quanto all'energia complessiva prodotta durante il giorno, anche del contributo termico, fa in modo che i pannelli foto termici producano all'incirca il 5% di energia in più rispetto al fotovoltaico tradizionale a livello complessivo giornaliero. E' necessario però tenere in considerazione il basso livello termico a cui tale energia viene prodotta, per cui, nonostante il suo valore risulti molto inferiore rispetto ai contributi elettrici, essa rappresenta comunque una aggiunta in più a livello dello scopo finale produttivo del sistema (inoltre il rendimento si aggira intorno al 40% che è un valore non trascurabile), anche se potrà comunque solo essere sfruttata o per studi teorici (come nel caso in esame) oppure in ambito civile e domestico. Come si evince dalla tabella i valori prodotti nei mesi invernali risultano essere inferiori rispetto a quelli primaverili a causa del minore contributo della radiazione solare.

I dati vengono riportati in tabella:

**Tabella 6. 1 Analisi delle energie complessive giornaliere generate(Wh): solo elettrica per il pannello A 4.2 ed elettrica e termica per il pannello A 6.1- A6.2**

	Eout A 4.2 (Wh)	Eout A 6.2 (Wh)	Eth A 6.1-6.2 (Wh)
5 novembre	152171376	152569005	558,71
6 novembre	167645256	177068546	500,30
5 marzo	188021484	195760503	657,69
6 marzo	163451109	196750873	801,44



**Figura 6. 1 Analisi andamento della potenza elettrica nel periodo invernale (5 novembre 2013).**

Confronto prestazioni elettriche pannelli fotovoltaici standard e pannelli a recupero termico

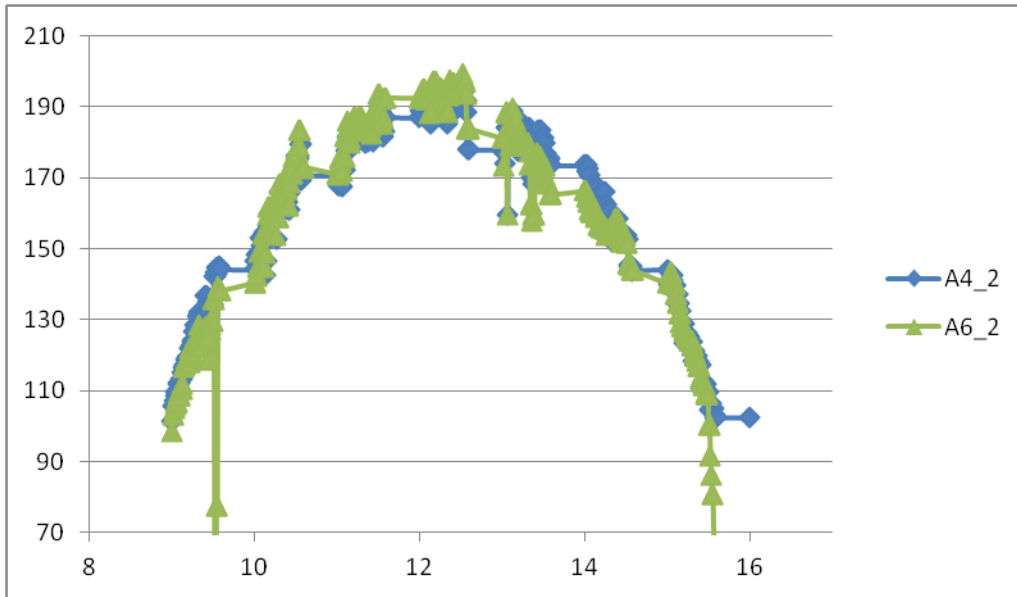


Figura 6. 2 Analisi andamento della potenza elettrica nel periodo primaverile (5 marzo 2014).



## Capitolo 7

### Conclusioni

L'elaborato ha messo in evidenza una approfondita caratterizzazione delle prestazioni sia termiche sia elettriche di un impianto fotovoltaico a recupero di calore commerciale. Questa peculiarità ha fatto in modo di imporre l'analisi da vari punti di vista: da un lato si sono considerate le condizioni offerte dal costruttore, sulla base di dinamiche sperimentali in determinate situazioni di riferimento da esso stesso studiate e note in parte attraverso la scheda tecnica dell'impianto. Dall'altro si è valutata l'analisi diretta dell'ambito operativo effettivo dei pannelli foto-termici nella realtà di Milano, associata alle sue particolari caratteristiche ambientali, usufruendo sia di dati memorizzati dal data-base della postazione in oggetto, sia di dati osservati istantaneamente da un operatore. Importante è stata la possibilità di interfacciarsi con il sistema in studio a livello di periodi dell'anno molto diversi: in prima battuta durante l'autunno-inverno, notoriamente associato a temperature piuttosto rigide, per cui le fasce orarie in studio sono state identificate solo da periodi "termicamente favorevoli" (al mattino è stato necessario attendere che il fluido termo vettore si scaldasse a degli adeguati livelli) e secondariamente il periodo primaverile, più mite e legato a maggiore continuità e maggiore entità dei valori oggetto di studio (temperature, radiazione solare). In tutte le valutazioni effettuate sono emersi dal riscontro analoghi risultati; essi sono riferiti al fatto che l'andamento giornaliero di prestazioni termiche offerto dal costruttore rispecchia all'incirca i valori presentati dalle condizioni reali in cui lavorano i pannelli; dal fatto che il rendimento termico, se pur offrendo calore a bassa temperatura (non ci si spinge mai oltre i 45 °C circa) risulta in gran parte auspicabile, aggirandosi intorno a dei valori medi giornalieri del 38%-40%, come riportato nei casi studio di inferenza statistica sui rendimenti al capitolo 5. Si è potuto inoltre verificare grazie al particolare circuito in studio (esso offre due pannelli foto-termici in serie e connessi alla rete elettrica e due pannelli singoli per utilizzo limitato ad attività di laboratorio ed esclusivamente termico) che, a differenza delle aspettative, il rendimento prodotto dai pannelli doppi è inferiore a quello singolo. Il motivo va ricercato nella connessione dei primi alla rete elettrica, per cui questi risultano più prettamente fotovoltaici, che termici (anche se il rendimento scade solo di un paio di punti percentuali),

mentre il singolo, producendo solo a livello termico-pratico presenta una potenza termica recuperata superiore di circa il 12-13% rispetto ai pannelli doppi. Si riscontra anche che, per quanto riguarda le superfici sfruttate dal sistema ibrido rispetto ai casi fotovoltaico tradizionale e termico tradizionale, ci si pone in una situazione intermedia per produrre all'incirca analoghi valori di potenza (per esempio a livello del tetto di una abitazione): dai 20/25 pannelli aventi una superficie di  $2\text{m}^2$  installati a livello di un impianto fotovoltaico, ai 2 pannelli termici da  $4,7\text{ m}^2$  di superficie ciascuno ed installati in genere in un impianto termico, si hanno (come nel caso in studio), 4 pannelli da  $1,58\text{ m}^2$  l'uno, che risultano comunque in una superficie totale inferiore, ma in una quantità "intermedia" tra le due anche se più vicina al termico.

Una delle ragioni per cui i campi dei rendimenti termici si sovrappongono solo in parte a quelli forniti dal costruttore, va ricercata nei limiti del sistema, che influenzano però anche il caso studio pratico. Essi sono rappresentati in modo particolare dalla strumentazione: sotto un primo punto di vista a livello della radiazione solare si è notato che in base alla scelta dello strumento di misura, ovvero un rilevatore posto parallelamente rispetto ai pannelli che rileva IRR (un valore di radiazione solare) , un eliofanometro che valuta RadDiretta da inserire nel calcolo della  $G_{totale1}$  (3.10) (un altro valore di radiazione ancora) e un radiometro globale, utile nel rilevare RadGlobale da usare per calcolare  $G_{totale2}$  come nella (3.11); si ottengono dei valori di radiazione diversi, se pur le espressioni adoperate per calcolarli risultano analoghe e perciò dovrebbero fornire risultati identici. Da un'analisi elettrica (confronto tra potenza elettrica rilevata agli inverter e potenza elettrica misurata attraverso i diversi valori di radiazione solare) emerge che il solo valore dato dalla (3.10) risulta essere quello corretto; ciò è limitante perché se non si conosce a priori questa non coincidenza di valori che dovrebbero essere apparentemente intercambiabili, si sarebbe portati a riferirsi indistintamente ad uno qualsiasi degli strumenti di misurazione e a una qualsiasi relativa radiazione solare ad esso riferita. Inoltre gli strumenti di misura stessi, per il rilevamento di tutte le grandezze in studio, sono soggetti ad incertezza strumentale, che, costituendo appunto un errore di misura, influenza il valore dei rendimenti termici e rendimenti da costruttore esaminati, che non possono essere reputati esatti. In più i pannelli sono soggetti durante la fase sperimentale a sporcamento della superficie esposta alla radiazione solare, ciò ne inficia le prestazioni ottiche e porta perciò ad uno scadimento delle prestazioni termiche generali nel caso in cui il pannello non sia ben pulito, infatti una maggior parte della radiazione solare utile al riscaldamento del fluido termo vettore e per l'alimentazione del processo foto elettrico viene deviata e allontanata dalla superficie e non assorbita

direttamente da essa. Questo si vede a livello dell'analisi delle prestazioni nei casi dei rendimenti termici calcolati ove la intercetta delle rette che presentano l'andamento delle prestazioni diminuisce in caso di pannelli sporchi rispetto al caso indicato dal costruttore ove il riferimento è sempre lo stesso rendimento ottico  $\eta_o \cdot K$ .

Il sistema inoltre opera, come i tradizionali sistemi fotovoltaici, a portata di fluido termo vettore costante, situazione che presenta maggiori fluttuazioni dal punto di vista delle temperature del fluido sia in ingresso che in uscita dal pannello. Una soluzione o una prospettiva per esaminare meglio il salto termico a livello dei pannelli potrebbe essere quello di operare sempre a portata costante (o al massimo variabile in intervalli costanti), lasciando però fissa in alternativa o la temperatura di ingresso o quella di uscita del fluido dal pannello, così da esaminare meglio il salto termico offerto dalla radiazione solare e poterlo caratterizzare con un grado di libertà in meno.

E' stato anche detto che, per quanto concerne i pannelli fotovoltaici a recupero termico, essi producono calore ma ad un basso livello termico; un possibile utilizzo potrebbe perciò essere quello domestico, sia per sfruttamento della potenza elettrica prodotta, sia per sfruttare il calore generato o a livello di una pompa di calore, o per pannelli radianti per riscaldamento a pavimento o per il riscaldamento estivo dell'acqua per piscine. Tali utilizzi non valutano però scopi finali oltre a quelli domestici quanto a questi impianti.

Bisogna da ultimo tenere presente, come enunciato al capitolo 6, che la peculiarità di questi sistemi ibridi li rende preferibili, a livello di potenze prodotte globali, ad un impianto fotovoltaico tradizionale sia nei periodi freddi che in quelli più miti.



## **Allegati: parte impiantistica**

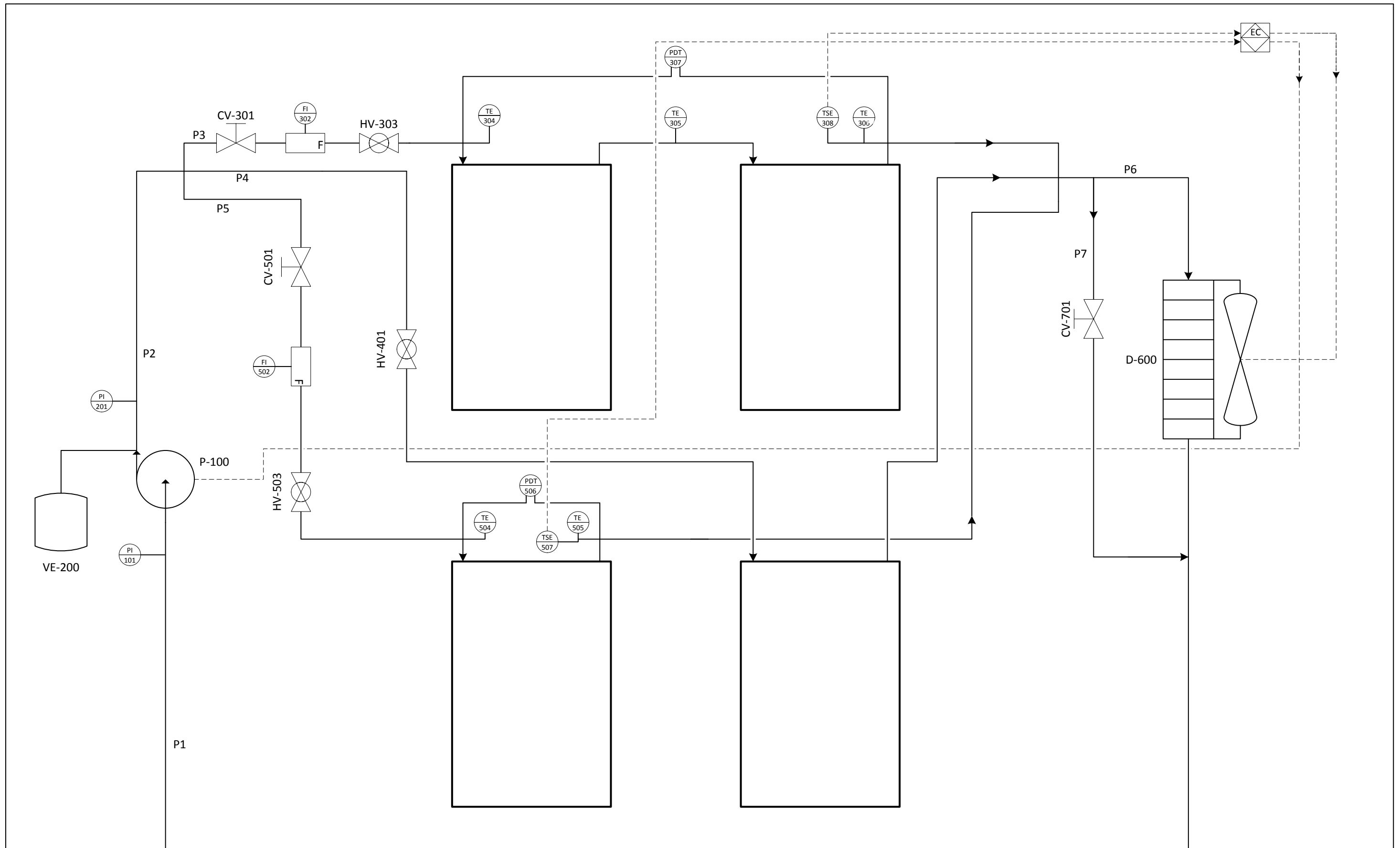
**Allegato 1: Schema di impianto foto termico da Labview**


**Allegato 2: Vista complessiva superficie del tetto ricoperta da pannelli fotovoltaici, foto termici, termici.**

**Allegato 3: aleo\_s19 sol (pannelli fotovoltaici)**

**Allegato 4: Data sheet pannelli foto termici Fototherm Series Cs.**



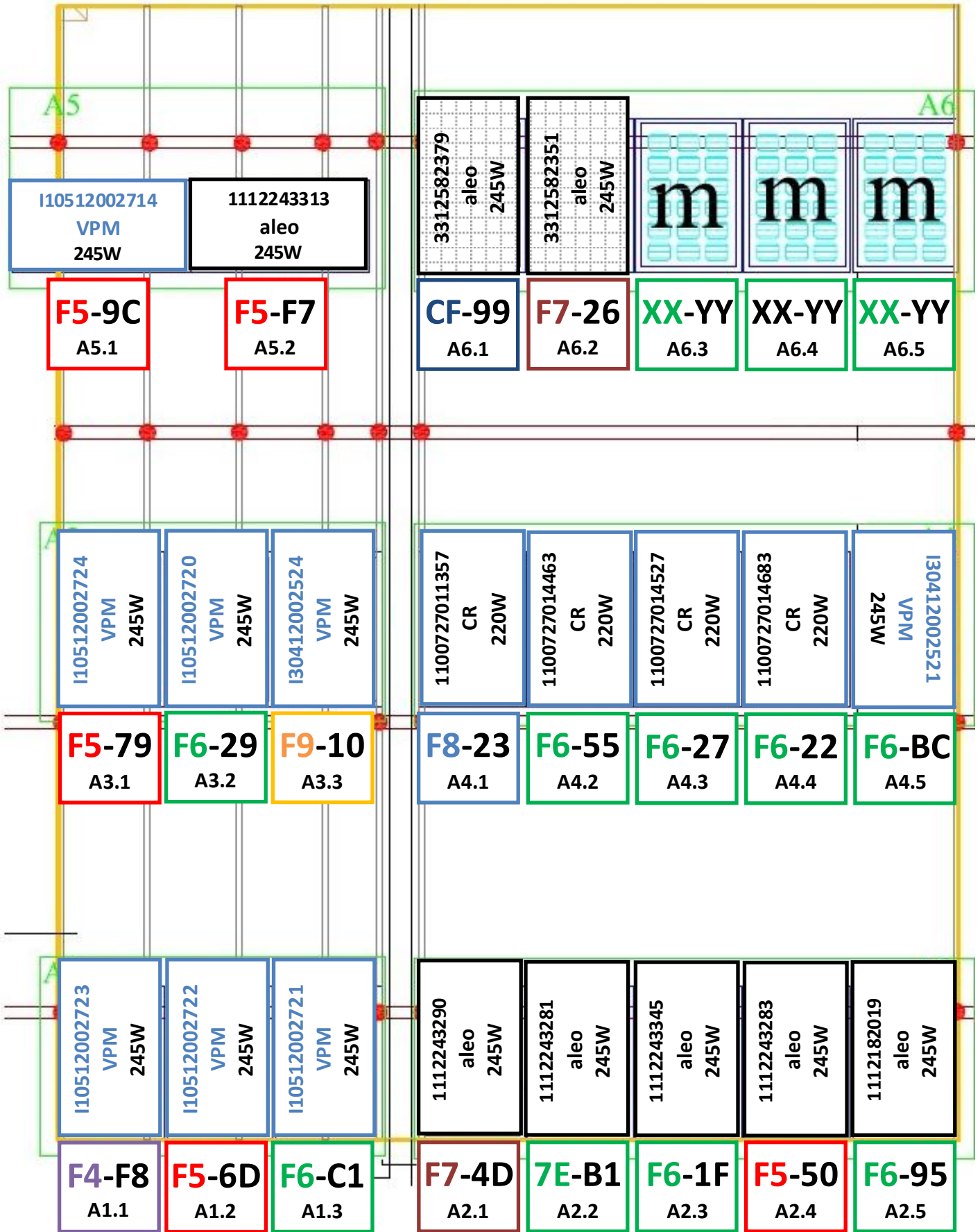


Originale		Solar Tech Lab Impianto moduli fototermici	
Nome	GDM		
Data	27/02/13	P&ID	Rev. 0
Revisione			
Nome			
Data			

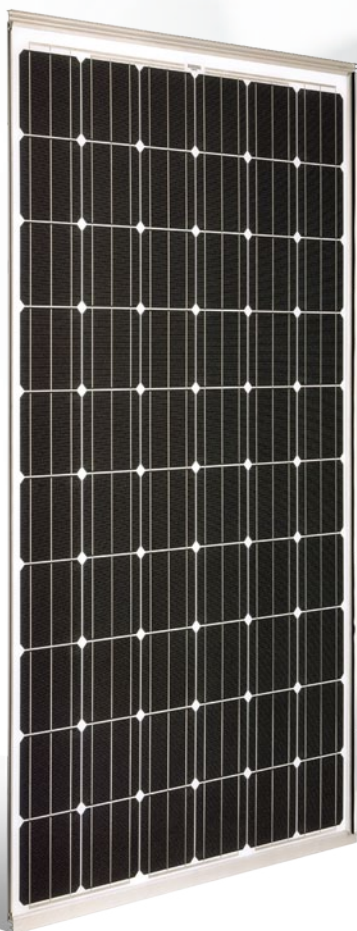




SOLAR TECH LAB – SITUAZIONE AL 01/08/2013







More power due to  
**High Efficiency**

## Prestazioni elevate

Il modulo aleo S\_19 sol, sviluppato per soluzioni fotovoltaiche integrate nel tetto, convince per la lavorazione di alta qualità. Grazie alla combinazione unica di componenti, i moduli ad alta efficienza di aleo solar sono particolarmente potenti. Con l'alta efficienza, aleo S\_19 sol offre performance elevatissime a parità di superficie. Questo significa anche: maggior semplicità e minor materiale per l'installazione. L'aumento di efficienza e i rendimenti alti a lungo termine di aleo S\_19 sol garantiscono il funzionamento efficiente del vostro impianto fotovoltaico. La qualità dei moduli aleo viene costantemente verificata e confermata da enti indipendenti. I moduli aleo hanno una classificazione positiva in potenza. aleo fornisce una garanzia di 25 anni sulle prestazioni e di 10 anni sul prodotto.



### High Efficiency

Uso efficiente della luce solare attraverso una combinazione unica di componenti del modulo



### BIPV

Perfettamente inserito nel tetto; ideale per l'integrazione negli edifici



### Tutto da un unico fornitore

Consulenza, assistenza tecnica, consegna, finanziamento, formazione, smaltimento (PV CYCLE)



### Gestione della qualità completa

Produzione conforme alle norme internazionali relative a qualità e ambiente, come, ad esempio, ISO 9001, ISO 14001 e OHSAS 18001 nonché soggetta a severi controlli interni



### Rinomato e certificato a livello mondiale

VDE (IEC 61215 Ed. 2, IEC 61730-1 Ed. 1 e IEC 61730-2 Ed. 1)

I nostri moduli - Qualità garantita



# Modulo fotovoltaico aleo S\_19 sol

Dati elettrici (STC)			S19J250T	S19J255T	S19J260T	S19J265T	S19J270T
Potenza nominale	$P_{MPP}$	[W]	250	255	260	265	270
Tensione nominale	$U_{MPP}$	[V]	31,2	31,3	31,3	31,4	31,5
Corrente nominale	$I_{MPP}$	[A]	8,02	8,16	8,30	8,44	8,57
Tensione a vuoto	$U_{OC}$	[V]	38,0	38,1	38,2	38,3	38,3
Corrente di cortocircuito	$I_{SC}$	[A]	8,46	8,61	8,76	8,91	9,05
Efficienza	$\eta$	[%]	14,4	14,7	15,0	15,3	15,6

Valori elettrici in condizioni di prova standard (STC): 1000 W/m<sup>2</sup>; 25°C; AM 1,5

Dati elettrici (NOCT)			S19J250T	S19J255T	S19J260T	S19J265T	S19J270T
Potenza	$P_{MPP}$	[W]	182	185	189	193	196
Tensione	$U_{MPP}$	[V]	28,3	28,3	28,4	28,5	28,5
Corrente	$I_{MPP}$	[A]	6,43	6,54	6,65	6,76	6,88
Tensione a vuoto	$U_{OC}$	[V]	35,0	35,0	35,1	35,2	35,3
Corrente di cortocircuito	$I_{SC}$	[A]	6,81	6,93	7,05	7,17	7,29
Efficienza	$\eta$	[%]	13,1	13,4	13,6	13,9	14,2

Valori elettrici in condizioni nominali di esercizio delle celle: 800 W/m<sup>2</sup>; 20°C; AM 1,5; vento 1 m/s

NOCT: 48°C (temperatura nominale di esercizio delle celle)

Altri dati elettrici		
Riduzione dell'efficienza STC da 1000 W/m <sup>2</sup> a 200 W/m <sup>2</sup>	[%] rel.	< 4
Range di potenza (classificazione positiva)	[W]	0/+4,99

Carichi		
Carico di pressione max.	[Pa]	5400
Carico da risucchio max.	[Pa]	2400
Tensione massima di sistema	[V <sub>DC</sub> ]	1000
Intensità massima di corrente inversa	$I_R$ [A]	15

Carico meccanico ai sensi di IEC/EN 61215

Coefficienti di temperatura			
Coefficiente di temperatura $I_{SC}$	$\alpha (I_{SC})$	[%/K]	+0,04
Coefficiente di temperatura $U_{OC}$	$\beta (U_{OC})$	[%/K]	-0,31
Coefficiente di temperatura $P_{MPP}$	$\gamma (P_{MPP})$	[%/K]	-0,44

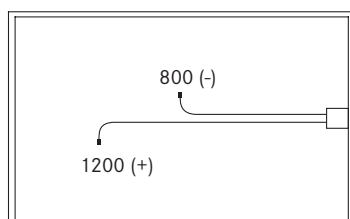
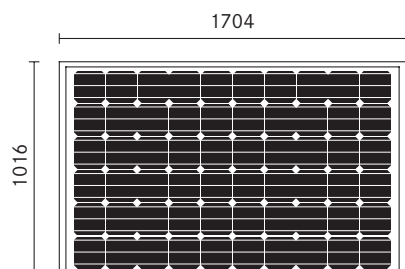
Precisione di misura  $P_{MPP}$  a STC -3/+3% | Tolleranza sugli altri valori elettrici -10/+10% | Efficienza riferita all'intera superficie del modulo

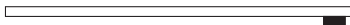
Dati di base modulo		
Lungh. x largh. x alt.	[mm <sup>3</sup> ]	1016 x 1704 x 36
Peso	[kg]	19
Numero di celle		60
Dimensioni cella	[mm <sup>2</sup> ]	156 x 156
Materiale cella		Si-mono
Copertura frontale		Vetro solare (VST)
Copertura a tergo		Pellicola polimerica
Materiale cornice		Lega di Al

Dati junction box		
Lungh. x largh. x alt.	[mm <sup>3</sup> ]	148 x 123 x 27
Classe IP		IP65
Lunghezza dei cavi	[mm]	1200 (+), 800 (-)
Connettori		PV-JM601
Diodi di bypass		3

## Dimensioni [mm]

Il vostro rivenditore autorizzato aleo



17 I  I 36



# FOTOTHERM®

## Serie AL 240/245/250/255/260

### CARATTERISTICHE

FOTOTHERM® è orgogliosa di presentare il nuovo modulo ibrido "all black" caratterizzato da un elegante design.

Una perfetta simbiosi tra prestazioni elettriche e termiche che consente un risparmio sia nei tempi d'installazione che di spazio occupato.

Il modulo termo-fotovoltaico della serie AL è conforme alle norme IEC / EN 61215 (ed. II), IEC / EN 61730, Solar Keymark e MCS.

Tolleranza positiva +5 Wp.

10 anni di garanzia sul prodotto

25 anni sulla potenza erogata  $\geq 80\%$

### SPECIFICATIONS

*FOTOTHERM® proudly introduces the PVT Hybrid module in an elegant black design. A perfect symbiosis of electrical and thermal performance that saves you space on the roof and installation time.*

*You can expect both an increased PV gain and better performance of the thermal system.*

*The module is certified by IEC / EN 61215 (2nd ed.), IEC / EN 61730 certification, Solar Keymark and MCS.*

*Positive power classification +5 Wp.*

*10 years product warranty*

*25 years module power output warranty  $\geq 80\%$*

### APPLICAZIONI

- Edifici residenziali
- Edifici commerciali, industriali e agricoli
- Centrali fotovoltaiche
- Altre applicazioni

L'energia termica generata da un impianto termo-fotovoltaico con moduli FOTOTHERM® può essere utilizzata per soddisfare molteplici esigenze, quali un'integrazione parziale o totale del riscaldamento di:

- Piscine
- Impianti radianti a bassa temperatura
- Uso in abbinato con pompa di calore (modulo come sonda geotermica)
- Acqua calda sanitaria
- Impianti industriali di processo

### APPLICATIONS

*Facilities with an electricity requirement and increased need for warm water as their base load, such as*

- Residential roof-tops
- Commercial, industrial and agricultural rooftops
- Solar power stations
- Other on-grid applications

*Additional applications are for customers, who do not compromise on aesthetics and look for complete renewable energy sources of electricity and heat for their home; in combination with heat storage and pump it is a perfect solution. A partial or complete integration of the heating system is possible for:*

- Swimming pools
- Underfloor heating
- Other agricultural, industrial or residential systems

### CERTIFICAZIONI - CERTIFICATIONS



IEC / EN 61215:2005  
IEC / EN 61730:2004



Solar Keymark



UNI EN 12975-2:2006



MCS



Member of BSW-Solar

# Serie AL

## CARATTERISTICHE ELETTRICHE - ELECTRICAL DATA

		FT240AL	FT245AL	FT250AL	FT255AL	FT260AL
Potenza nominale - <i>Rated power</i>	( $P_{mpp}$ )	240 Wp	245 Wp	250 Wp	255 Wp	260 Wp
Tensione a circuito aperto - <i>Open circuit voltage</i>	( $V_{oc}$ )	36,8 V	37,2 V	37,6 V	38,1 V	38,2 V
Tensione alla massima potenza - <i>Rated voltage</i>	( $V_{mpp}$ )	29,8 V	30,2 V	30,7 V	31,3 V	31,3 V
Corrente di corto circuito - <i>Short circuit current</i>	( $I_{sc}$ )	8,56 A	8,6 A	8,64 A	8,61 A	8,76 A
Corrente alla massima potenza - <i>Rated current</i>	( $I_{mpp}$ )	8,05 A	8,1 A	8,15 A	8,16 A	8,3 A
Efficienza modulo - <i>Electrical efficiency</i>	( $\eta$ )	14,6 %	14,9 %	15,2 %	15,5 %	15,8 %
Tensione massima sistema - <i>Maximum system voltage (IEC)</i>	(V)	1000V DC			1000V DC	
Massima corrente inversa ( $I_r$ ) - <i>Reverse current load (<math>I_r</math>)</i>	(A)	15			15	
Coefficiente di temperatura ( $P_{mpp}$ ) - <i>Temperature coefficient (<math>P_{mpp}</math>)</i>	( $\gamma$ )	-0,48 %/°C			-0,44 %/°C	
Coefficiente di temperatura ( $V_{oc}$ ) - <i>Temperature coefficient (<math>V_{oc}</math>)</i>	( $\beta$ )	-0,34 %/°C			-0,31 %/°C	
Coefficiente di temperatura ( $I_{sc}$ ) - <i>Temperature coefficient (<math>I_{sc}</math>)</i>	( $\alpha$ )	0,03 %/°C			0,04 %/°C	

Condizioni STC: irraggiamento = 1000W/m<sup>2</sup>, temperatura della cella = 25°C

Under STC conditions: irradiance = 1000W/m<sup>2</sup>, cell temperature = 25°C

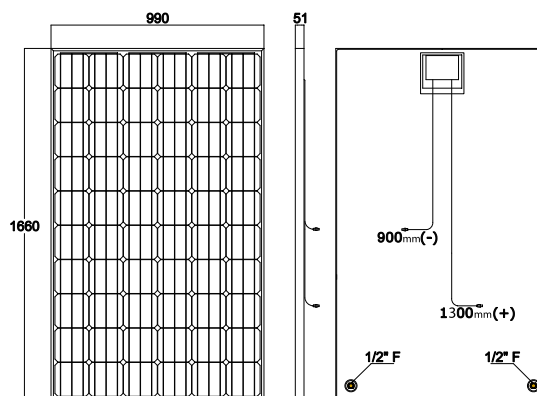
## CARATTERISTICHE TERMICHE - THERMAL DATA

Area apertura - <i>Aperture area</i>	1,58 m <sup>2</sup>
Rendimento termico $\eta_0$ - <i>Thermal efficiency <math>\eta_0</math></i> *	58 %
Potenza termica nominale - <i>Nominal thermal power</i> *	916 W
Portata - <i>Volume flow rate</i>	1,5 - 2,5 l/min
Perdita di carico - <i>Flow losses</i>	536 - 887 mmH <sub>2</sub> O
Volume fluido vettore - <i>Fluid volume</i>	0,96 l
Coefficiente $\alpha_1$ - <i>Coefficient <math>\alpha_1</math></i> *	6,31
Coefficiente $\alpha_2$ - <i>Coefficient <math>\alpha_2</math></i> *	0,08
Capacità termica effettiva - <i>Effective thermal capacity</i>	13,3 kJ K <sup>-1</sup>
IAM K0 a 50°C - <i>IAM K0 at 50°C</i>	95,0 %

\* Riferito all'area apertura - *Based on aperture area*

## SPECIFICHE - SPECIFICATION

Celle - <i>Cells</i>	60 Silicio monocristallino 156 mm - <i>60 Monocrystalline silicon 156 mm</i>
Connettori elettrici - <i>Electrical connectors</i>	MC4
Connettore idraulico - <i>Hydraulic connector</i>	1/2" femmina - <i>female</i>
Massimo carico meccanico - <i>Maximum mechanical load</i>	5400 Pa
Dimensioni - <i>Dimensions</i>	1660x990x51 mm
Peso - <i>Weight</i>	32 Kg



## **Allegati parte inferenza statistica**

**Allegato 1: Tabella di riferimento dei quantili di una distribuzione normale standard**









# Nomenclatura

$h_{sol}$  : ora solare

$T_{sun}$  : tempo solare

$h_{sol\ var}$  : ora locale variabile

$\varphi$  : latitudine

$\beta$  : angolo di inclinazione dei pannelli rispetto alla piano orizzontale

$\theta$  : angolo di incidenza della radiazione solare rispetto ai pannelli inclinati

$\theta_s$  : zenith solare

$\gamma_s$  : azimut solare

IRR: radiazione solare rilevata da un sistema posso parallelamente ai pannelli

RadGLOBale: radiazione globale

RGlobBANDA: radiazione diffusa

DNI: radiazione diretta

Gtotale 1: radiazione solare misurata dagli strumenti di misura della stazione meteo

Gtotale 2: radiazione solare valutata a partire dai valori calcolati e non misurati

P el in: potenza elettrica prodotta prima dell'inverter

Ppan, i: potenza elettrica calcolata in base ai diversi valori di radiazione solare (IRR, Gtotale1, Gtotale 2)

NOCT: Normal operating cell temperature

$T_{rif,NOCT}$ : temperatura di riferimento rispetto alla NOCT

Gnom1: potenza nominale di riferimento 1 per modulo fotovoltaico

Gnom2: potenza nominale di riferimento 2 per modulo fotovoltaico

$\gamma$ : coefficiente termico percentuale

$\eta_o$ : rendimento ottico da definizioni del costruttore

K: IAM incident angle modifier

$\alpha$  : assorbanza emisferica

$\varepsilon$ : emittanza emisferica

$\rho$ : riflettanza emisferica

$\tau$ : trasmittanza emisferica

$\lambda$ : lunghezza d'onda

$\mu$  : coseno dell'angolo polare

$\phi$ : l'angolo azimutale

$\alpha_s$ : assorbanza solare

$a_1$ : coefficiente termico legato ad un'analisi termica delle proprietà del pannello di tipo lineare

$T_a$ : temperatura ambiente o dell'aria esterna media

$T_p$ : :: temperatura media del pannello tra ingresso ed uscita

$\eta_{th}$ : rendimento termico calcolato sul pannello

$\eta_{costr}$  rendimento termico misurato in base ai dati del costruttore

$Q_{th}$ : calore assorbito dal fluido di lavoro

$Q_{ass}$ : calore assorbito dal pannello foto-termico in ingresso a livello della sua superficie disponibile per scaldare il fluido di lavoro

$\dot{m}$ : portata di fluido termo vettore

$c$ : calore specifico del fluido di lavoro

$T_{out}$ : temperatura del fluido di lavoro in uscita dal pannello

$T_{in}$ : temperatura del fluido di lavoro in ingresso al pannello

$A_c$ : area dell'assorbitore

$\eta_o * k$ : rendimento ottico per IAM, intercetta del coefficiente angolare  
 $T_m^*$ : temperatura ridotta  
 $I_{str}$ : incertezza strumentale  
 $E_{acc}$ : errore di accuratezza  
 $I_k$ :altri contributi di incertezza  
 $I_{acc}$ : contributo dell'incertezza dall'errore di accuratezza  
 $u(x_i)$ : valore di incertezza combinata  
 $\mu_x$ : valore medio campionario della variabile presa in esame  
 $\sigma_x^2$  : varianza campionaria  
 $\sigma_{\mu_x}^2$ : varianza del valore medio  
 $\delta X$  o  $\sigma_{\mu_x}$ : deviazione standard o incertezza  
 $t$  out ip: temperatura all'uscita del pannello ricavata ipotizzando  $\eta_{th}=\eta_{costr}$   
 $\alpha$ : probabilità di commettere errore del primo tipo (inferenza statistica)  
 $\beta$ : probabilità di commettere un errore del secondo tipo (inferenza statistica)  
 $x_m$ : media campionaria di una popolazione di dati  
 $\mu$ : valore vero  
 $\sigma^2$ : varianza della popolazione di misure  
 $\sigma$  : deviazione standard della popolazione di misure o incertezza di quella particolare popolazione  
 $n$ : dimensione campionaria della popolazione di misure  
 $z_o$ :statistica test, punto percentuale della distribuzione in esame da analizzare quanto alla distribuzione normale standard.



## Bibliografia.

Napoleon Enteria, Aliakbar Akbarzadeh, *Solar Energy Sciences and Engineering Applications*

Chow, T.T (2003) Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 75.,143-152

Chow, T.T., He, W. And Ji, J. (2006) Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. *Solar Energy* 80, 298-306

Chow, T.T., Hand, J.W. and Strachan, P.A. (2003) Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building, *Applied Thermal Engineering*, 23, 2035-2049

Chow, T.T., Chan,A.L.S.,Fong,K.F.,Lin,Z.,He,W. And Ji,J. (2009) Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector and without glass cover. *Applied Energy*,86,310-316

Erdil,E.,Ilkan,M. and Egelioglu,F.(2008) An experimental study on energy generation with a photovoltaic (PV)-solar thermal hybrid system. *Energy*, 33,1241-1245

Lee, W.M.,Infield, D.G. and Gottschalg,R. (2001) Thermal modeling of building integrated PV systems. In: *Proceedings of the 17th PV Solar Energy Conference*,22-26 October, Munich. pp. 2754-2757

Yang,H.X., Marshall, G.H. and Brinkworth, B.J. (1994) An experimental study of the thermal regulation of a PV-clad building roof. In: *Proceedings of 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, April 11-15, Amsterdam, The Netherlands. Pp. 1115-1118

Zondag, H.,Bakker,M.,van Helden,W.G.J.,Affolter, P., Eisenmann, W.and Fechner, H. (2005) PVT roadmap: A European guide for development and

market introduction of PVT technology. In: *Proceedings of (CD) 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, June 6-10,2004. Barcelona,Spain.*

Zondag, H.A.,de Vries, D.W.,Van Helden,W.G.J.,Van Zolengen,R.J.C and Steenhoven, A.A(2002) The thermal and electrical yield of a PV thermal collector. *Solar Energy*, 72,113-128

Zondag, H.A.,de Vries, D.W.,Van Helden,W.G.J.,Van Zolengen,R.J.C and Steenhoven, A.A (2003) The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 74,253-269.

F. Kreith, D. Goswami (CRC, 2007) *WW Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*

<http://www.ftvitalia.it/php/fototermico.php>

John A.Duffie, William A.Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Second Edition

<http://www.marconi-galletti.it/>

INTERNATIONAL STANDARD ISO 9060 Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation

Guida all'espressione dell'incertezza di misura UNI CEI ENV 13005 Luglio 2000

Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results

<http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/index.html>

Montgomery, Runger, Hubele, *Statistica per l'ingegneria*, Edizione italiana a cura di Alberto Barchielli, Maurizio Verri