

# CAPITOLO 5

## PROVE SPERIMENTALI

---

### 5.1 INTRODUZIONE

Questo capitolo è dedicato alla descrizione del circuito di prova dei collettori solari utilizzato per i test, ed alla descrizione dei risultati sperimentali ottenuti con i diversi metodi descritti nel capitolo 3. Le prove sperimentali sono state condotte secondo lo standard ISO 9806-1, il metodo QDT, il metodo di Rogers, il metodo di Saunier, il filter method, il metodo di Perers, il metodo di Wijeyesundera ed il metodo Quick Dynamic Testing. Non è stato possibile sperimentare il metodo di Exell ed il metodo NDM in quanto il circuito di prova mancava di alcuni elementi indispensabili per l'applicabilità di tali metodi (un generatore artificiale di vento ed un sistema mobile di schermatura).

### 5.2 DESCRIZIONE DEL CIRCUITO DI PROVA

Le prove sperimentali sono state eseguite presso il Laboratorio di Energetica dell'Edificio del Dipartimento di Meccanica dell'Università della Calabria, impiegando il circuito di prova dei collettori solari mostrato nella figura 5.1.



*Fig. 5.1 – Foto dell'Impianto solare del Laboratorio di Energetica dell'Università della Calabria.*

Il campo solare è costituito da tre collettori tipo Therminox che possono essere collegati sia in serie che in parallelo. Questo collettore è costituito da una piastra piana in acciaio inox austenitico con rivestimento selettivo agli ossidi di cromo, il cui coefficiente di assorbimento è maggiore di 0,92 e quello di emissione è inferiore a 0,4. I canali, di tipo a scacchiera, sono ottenuti dall'unione di due piastre prestampate (vedi figg. 5.2a e 5.2b); questa tipologia di canali assicura la perfetta irrigazione dell'assorbitore e quindi un eccellente coefficiente di scambio termico con il fluido. E' fornito di una sola copertura di vetro temperato low-iron da 4 mm. La coibentazione posteriore è costituita da 5 cm di lana di vetro con foglio d'alluminio e 5 cm di poliuretano con densità di  $35 \text{ kg/m}^3$ , mentre, quella laterale, si compone di 2 cm di poliuretano con foglio d'alluminio.

Il collettore, lungo 240 cm per 90 cm di larghezza, è caratterizzato da un'area lorda di  $2,16 \text{ m}^2$ ; l'area dell'assorbitore è di  $2,04 \text{ m}^2$  mentre quella di apertura di  $2 \text{ m}^2$ . La massa a vuoto del collettore è di 58,5 kg e può contenere 5,1 litri d'acqua. Il fluido termovettore è costituito da una miscela di acqua e glicole.

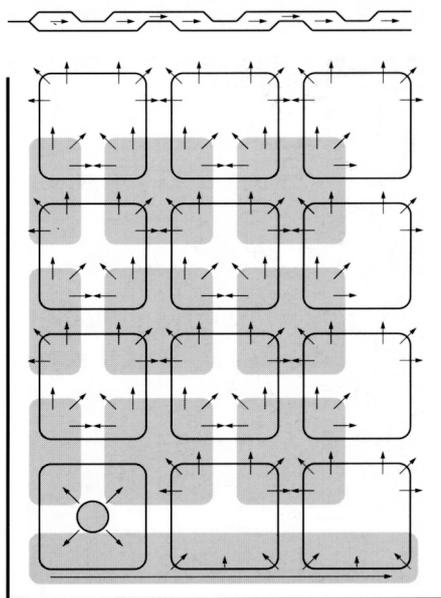


Fig. 5.2a- Piastra con canali a scacchiera

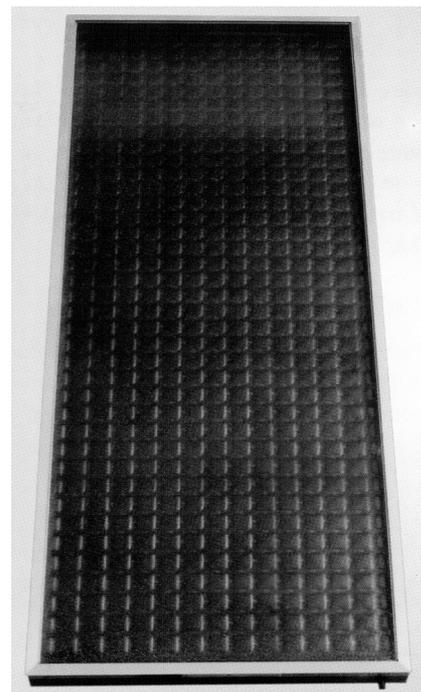


Fig. 5.2b - Collettore assemblato

Presso il Laboratorio di Energetica dell'edificio, per quanto riguarda la misura della radiazione solare, sono disponibili vari piranometri, un piranometro con anello di guardia, un piroeliometro montato su inseguitore solare, un albedometro ed un pirgeometro. Con

l'ausilio di tale strumentazione viene misurata la radiazione solare globale sul piano orizzontale, sul piano dei collettori e sui quattro piani verticali coordinati, nonché la radiazione diretta, la radiazione diffusa sul piano orizzontale, l'albedo e la radiazione infrarossa nello spettro 4-50  $\mu\text{m}$  (infrarosso atmosferico). Nella fig. 5.3 è riportata la foto del piranometro per la misura della radiazione solare globale sul piano dei collettori, mentre nella fig. 5.4 è riportata la foto dell'albedometro per la misura della radiazione riflessa dal terreno.



*Fig. 5.3 – Piranometro*



*Fig. 5.4 – Albedometro*

La velocità del vento viene misurata sia sul piano orizzontale che sul piano dei collettori con degli anemometri a pale semisferiche (vedi fig. 5.5). Le temperature di ingresso e di uscita del fluido nei collettori sono misurate mediante termoresistenze Pt 100 di classe 1/3B (fig. 5.6). La caduta di pressione del fluido nei collettori è misurata tramite un pressostato differenziale (fig. 5.7), mentre la portata volumetrica mediante un misuratore di portata di tipo ad induzione magnetica (fig. 5.8).



*Fig. 5.5 – Anemometro a coppelle per la misura della velocità del vento sul piano dei collettori*



Fig. 5.6- Sonda di temperatura Pt 100



Fig. 5.7 – Pressostato differenziale



Fig. 5.8 – Misuratore di portata

Il moto del fluido all'interno del collettore e del circuito è assicurato dall'azione di un circolatore monofase (fig. 5.9); la potenza massima assorbita è di 88 W (velocità III), cui corrisponde una portata volumetrica di circa 800 l/h alla temperatura di 25°C.

Per la regolazione fine della portata, la pompa dispone di altri due settaggi, uno intermedio ed uno minimo, ed è corredata di un circuito di by-pass sul quale è montato un regolatore manuale (figg. 5.10 e 5.11); tale sistema permette la stabilizzazione della portata in presenza di variazioni termiche.

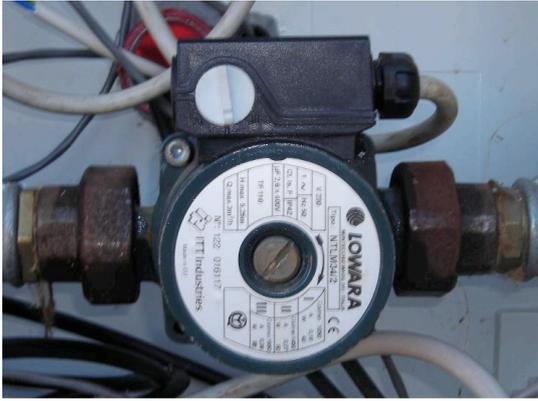


Fig. 5.9 – Circolatore monofase



Fig. 5.10 – Regolatore manuale di portata



Fig 5.11 - Gruppo pompa

Il controllo della temperatura del fluido in ingresso ai collettori avviene attraverso l'azione sinergica di uno scambiatore di calore a piastre Zilmet della potenza di 20 kW (fig. 5.12) e di dieci riscaldatori elettrici a fascia (fig. 5.13) della potenza di 200 W ciascuno.

La portata di fluido nello scambiatore è regolata mediante una valvola a tre vie azionata da un servocomando alimentato in corrente continua (4-20 mA) del tipo MVT56A (figg. 5.14, 5.15 e 5.16), mentre i riscaldatori sono azionati da un comune relè.

Il controllo è affidato a due regolatori di tipo PID: il regolatore SA 200 (fig. 5.17), il quale interviene sul relè che aziona i riscaldatori, ed il regolatore CB 100 (fig. 5.18) che agisce sul servomotore della valvola.

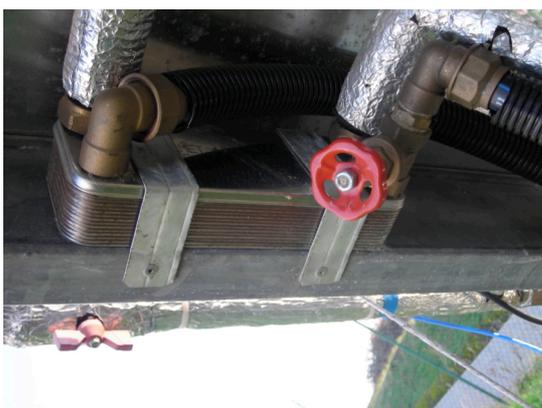


Fig. 5.12 – Scambiatore di calore a piastre



Fig. 5.13 – Riscaldatori elettrici a fascia



Fig. 5.14 – Valvola a tre vie



Fig. 5.15 – Servocomando



Fig. 5.16 – Valvola assemblata



Fig. 5.17 – Regolatore SA 200



Fig. 5.18 – Regolatore CB 100

Tutte le grandezze misurate sono mediate ed acquisite ogni minuto effettuando 7 campionamenti al secondo, per un totale di 420 campioni al minuto. Questo è possibile grazie all’ausilio di un sistema di acquisizione dati basato su moduli “Field Point“ di tipo AI 110 (Fig. 5.19) ed al software Labview per l’interfaccia col PC.

L’impianto è provvisto di due serbatoi per l’accumulo dell’acqua calda: uno di preriscaldamento, collocato all’esterno, di circa 750 l (Fig. 5.20) e l’altro, di utilizzo, collocato all’interno, di circa 100 l (Fig. 5.21). E’ possibile integrare energeticamente il secondo serbatoio mediante una caldaia a metano da 12 kW. Il trasferimento di energia tra i collettori ed il serbatoio di preriscaldamento e tra i due serbatoi, è gestito da due centraline solari provviste di termostato differenziale di tipo PS 5510 S (Fig. 5.22). Le centraline consentono anche il funzionamento in “modalità manuale” e ciò permette di far funzionare il circolatore anche 24 h su 24, oltre che poter variare percentualmente la portata del fluido.

La figura 5.23 riporta uno schema del circuito di prova dei collettori solari.



Fig. 5.19 - Moduli AI 110



Fig. 5.20 - Serbatoio di accumulo (primario)



Fig. 5.21 - Serbatoio di accumulo (secondario)



Fig. 5.22 - Centralina solare PS 5510S

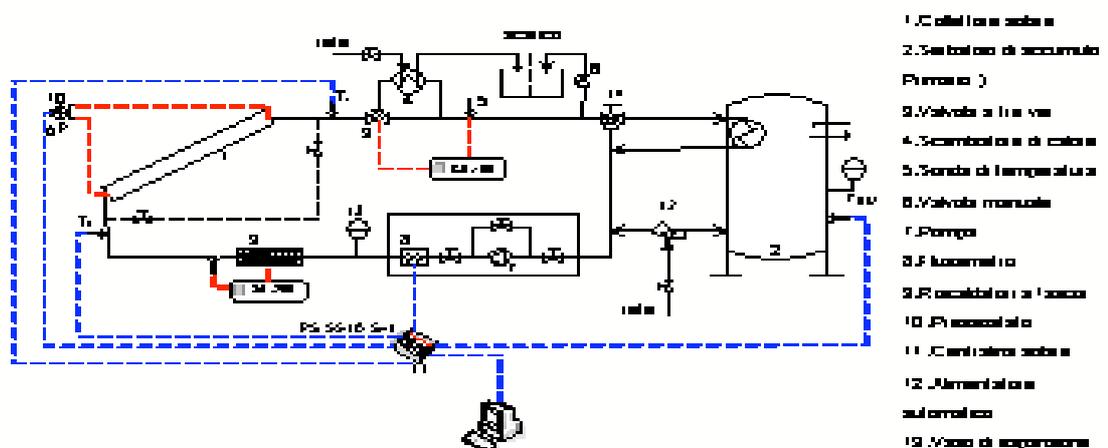


Fig 5.23 – Schema del circuito di prova dei collettori solari

### 5.3 PROVE SPERIMENTALI PRELIMINARI

Le prove sperimentali preliminari hanno riguardato la determinazione della costante di tempo del collettore ed il calcolo della costante  $b_0$  per la stima dell'*Incidence Angle Modifier*.

#### 5.3.1 LA COSTANTE DI TEMPO DEL COLLETTORE

Il primo test eseguito ha riguardato la determinazione della costante di tempo del collettore. Essa, come già detto nel capitolo 1, è definita come l'intervallo di tempo necessario affinché la differenza di temperatura del fluido tra le sezioni di uscita e di ingresso raggiunga il 36,8% (pari a  $(1/e) \times 100$ ) della variazione massima conseguente ad una improvvisa riduzione della radiazione solare (ottenuta orientando il collettore verso nord o schermandolo).

La prova è stata condotta secondo lo standard ASHRAE 93-2003 esponendo il collettore ai raggi solari con intensità superiore a  $790 \text{ W/m}^2$  e con una temperatura d'ingresso del fluido prossima a quella dell'aria esterna  $T_i \approx T_a \approx 26^\circ\text{C}$ . Dopo circa 30 minuti, raggiunte delle condizioni semistazionarie, il collettore è stato improvvisamente schermato dai raggi solari, ed è stata registrata la temperatura di uscita del fluido dal collettore. Nella fig. 5.24 sono stati riportati i valori di  $T_i$  e  $T_u$  rilevati sperimentalmente durante la prova.

Applicando l'eq. (1.54) si è ottenuta una *costante di tempo del primo ordine* pari a **3,76** minuti. La costante di tempo del secondo ordine è risultata invece pari a 2 minuti circa.

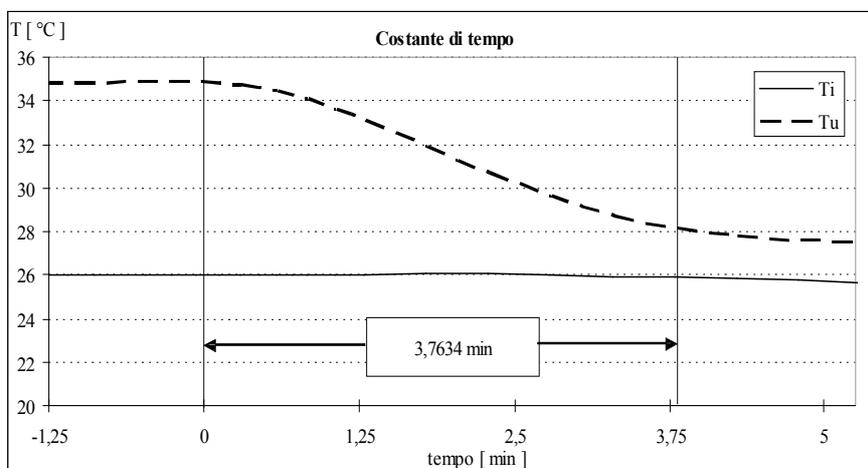


Fig. 5.24 – Costante di tempo

### 5.3.2 DETERMINAZIONE DELL'INCIDENCE ANGLE MODIFIER

L'ASHRAE standard 93-2003 prevede una prova per la stima della dipendenza del rendimento del collettore dall'angolo d'incidenza della radiazione diretta.

A questo test sono stati dedicati due giorni, esponendo il collettore alle reali condizioni atmosferiche con intensità della radiazione solare  $G_c > 790 \text{ W/m}^2$  e temperatura d'ingresso del fluido molto prossima a quella ambiente.

L'efficienza del collettore è stata determinata in corrispondenza di alcuni valori selezionati dell'angolo di incidenza  $\theta$ , pari a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ ; tali valori sono stati riportati nella fig. 5.25 i valori in funzione di  $(1/\cos \theta)$ .

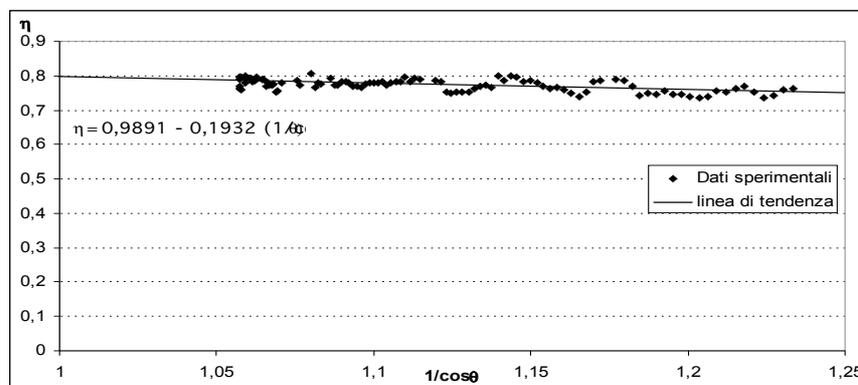


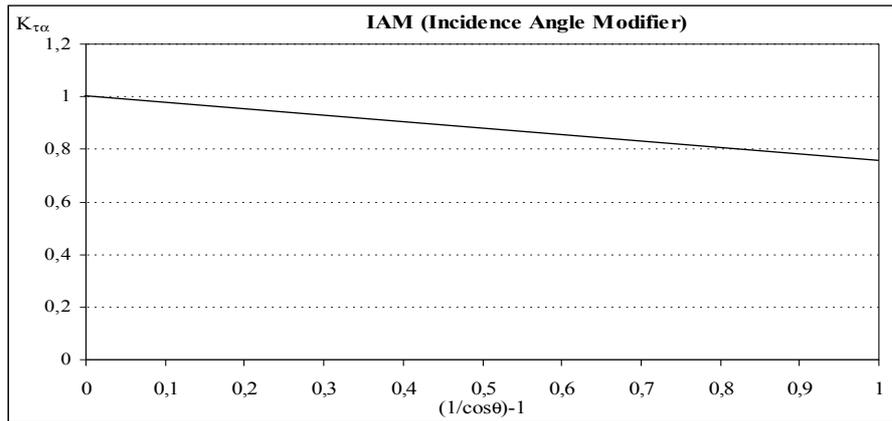
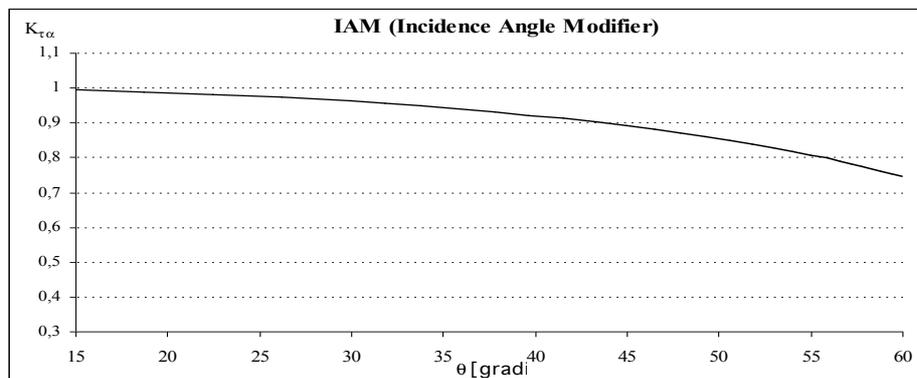
Fig. 5.25 – Rendimento del collettore in funzione di  $(1/\cos \theta)$

Utilizzando i coefficienti della linea di tendenza  $\eta = 0,9891 - 0,1932(1/\cos \theta)$ , dell'eq. (1.45), si ricava:

$$b_0 = \frac{0,1932}{0,9891 - 0,1932} = 0,2427$$

Utilizzando infine l'eq. (1.38), si ottengono i valori di  $K_{\tau\alpha}$ .

Nelle figg. 5.26 e 5.27 è riportato l'andamento di  $K_{\tau\alpha}$  rispettivamente in funzione di  $[(1/\cos \theta) - 1]$  ed in funzione di  $\theta$ .

Fig. 5.26 – IAM in funzione di  $[(1/\cos\theta)-1]$ Fig. 5.27 – IAM in funzione di  $\theta$ 

#### 5.4 PROVE SPERIMENTALI IN CONDIZIONI STAZIONARIE

Il collettore è stato inizialmente testato in condizioni stazionarie per ottenerne la caratteristica in accordo con lo standard ISO 9806-1, da utilizzare come riferimento e confronto per i successivi metodi transitori. Per ricavare i sedici punti sperimentali di rendimento richiesti dalla norma sono stati necessari diversi giorni di test. Sono stati determinati quattro valori sperimentali di efficienza per quattro diversi valori della temperatura di ingresso del fluido. Tutte le prove sono state condotte in prossimità del

mezzogiorno solare ed in modo simmetrico rispetto ad esso. Tutti i test sono stati eseguiti escludendo dal circuito di prova il serbatoio di accumulo.

Nella fig. 5.28 è riportata la caratteristica del collettore del primo ordine in funzione della temperatura media ridotta  $T_m^*$ , mentre nella fig. 5.29 è invece riportata la caratteristica del secondo ordine.

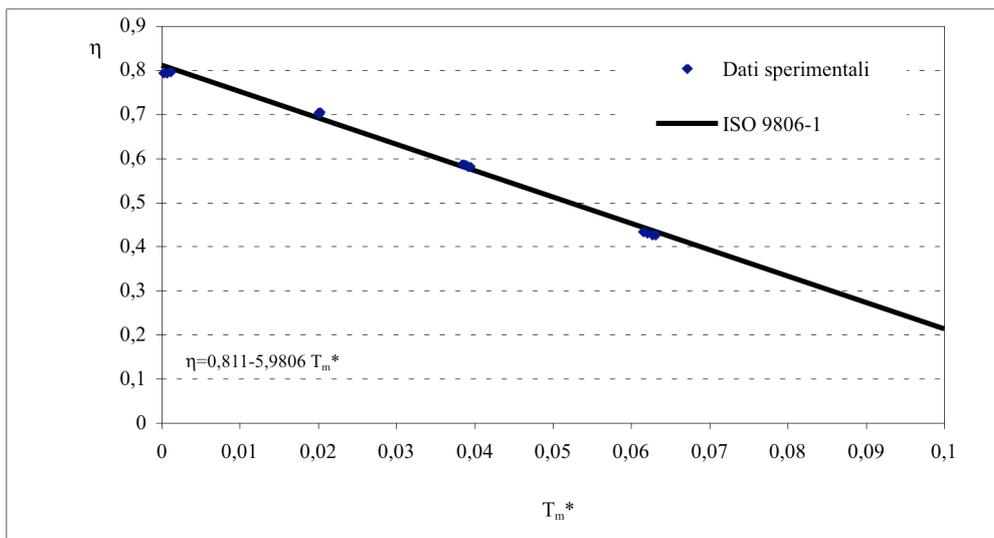


Fig. 5.28 – Caratteristica del collettore del I ordine

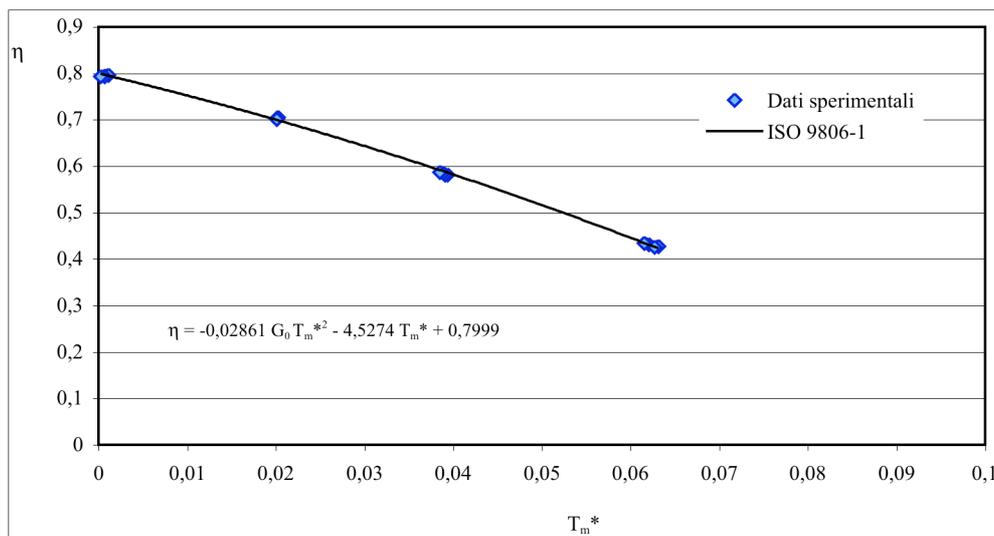


Fig. 5.29 – Caratteristica del collettore del II ordine

## 5.5 PROVE SPERIMENTALI IN CONDIZIONI TRANSITORIE

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati sperimentali ottenuti con i metodi transitori di Rogers, Saunier, il filter method, il metodo di Perers, il metodo di Wijesundera ed il metodo Quick Dynamic Testing. Viene inoltre determinata la caratteristica del collettore in condizioni stazionarie in accordo con lo standard EN 12975-2, estrapolando dal metodo QDT alcuni dati sperimentali (di radiazione solare, temperatura ambiente e temperatura del fluido) molto stabili.

### 5.5.1 IL METODO DI ROGERS

Il metodo di Rogers ha richiesto un solo giorno di test, eseguito il 15 maggio 2007. Il collettore è stato esposto alla radiazione solare dalle ore 9:30 e alle 16:00 circa (ora solare), in condizioni di cielo sereno per la prima parte della giornata e con qualche nuvola frammentata nelle ore pomeridiane.

È stata imposta una portata massica di  $0,02 \text{ Kg/sm}^2$ , corrispondente ad una portata volumetrica di circa  $432 \text{ l/h}$ .

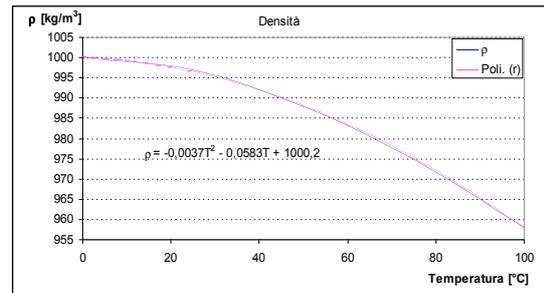
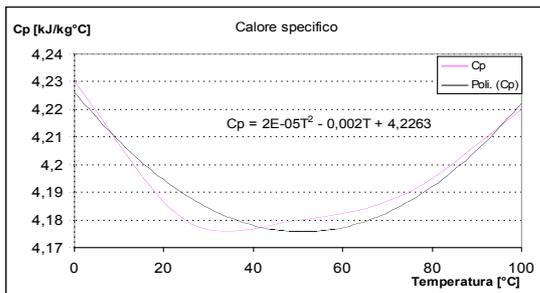
La prova è stata eseguita su una superficie di apertura complessiva di  $6 \text{ m}^2$ , utilizzando l'intero campo solare.

Come stabilisce il metodo, sono state scelte quattro diverse temperature d'ingresso del fluido:  $33^\circ\text{C}$ ,  $47^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  e  $73^\circ\text{C}$ , che sono state tenute stabili entro  $\pm 1^\circ\text{C}$  tramite l'azione dei due regolatori PID agenti sui riscaldatori e sullo scambiatore di calore.

In corrispondenza delle quattro temperature sono state costruite quattro sequenze di dati sperimentali, ognuna costituita da 60 punti, ottenuti come valori medi su intervalli di 60 secondi.

Sono stati rilevati sperimentalmente: la radiazione solare globale sul piano dei collettori, la temperatura di ingresso e di uscita del fluido, la temperatura ambiente, la portata volumetrica e la potenza utile. Nei calcoli effettuati si è anche tenuto conto dell'influenza della temperatura sulle proprietà termofisiche del fluido.

Nelle figure successive è mostrato l'andamento della densità e del calore specifico del fluido termovettore al variare della temperatura.



La temperatura ambiente rilevata è risultata di  $26 \pm 1^\circ\text{C}$  durante il primo test, di  $27 \pm 1^\circ\text{C}$  durante il secondo test, di  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  durante il terzo test e di  $24 \pm 1^\circ\text{C}$  durante l'ultimo test. Nella figura 5.30 è riportato l'andamento (nel tempo) del flusso solare sul piano dei collettori, della potenza utile, della temperatura dell'aria ambiente, della temperatura di ingresso del fluido e del salto termico subito dal fluido nel collettore:

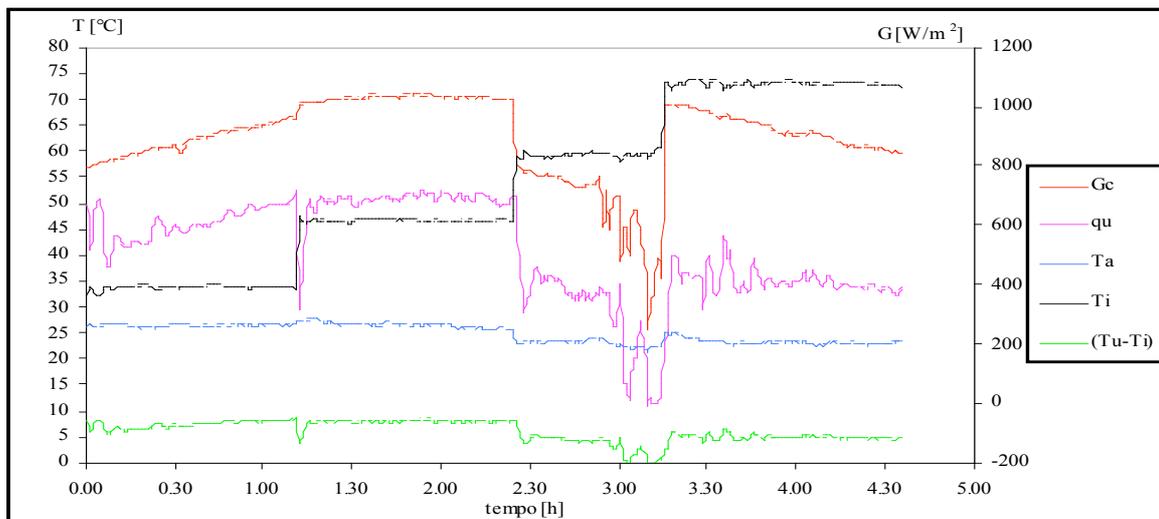


Figura 5.30 – Variazioni di  $G_c$ ,  $q_w$ ,  $T_a$ ,  $T_i$ ,  $\Delta T$

Come richiedeva il metodo, è stato verificato che il flusso solare fosse maggiore di  $300 \text{ W/m}^2$  per almeno l'80% dei dati sperimentali e che l'angolo di incidenza fosse minore di  $60^\circ$ .

Assunto per la funzione di trasferimento un numero di coefficienti  $N=5$ , mediante una regressione lineare multipla basata sull'eq. (3.8), tenendo anche conto delle eqq. (3.9) e (3.10), sono stati determinati i coefficienti che definiscono la funzione di risposta e gli altri parametri del collettore:

$$K_1=0,31162, \quad K_2=0,297043, \quad K_3=0,234796, \quad K_4=0,156541, \quad K_5=0.$$

$$F''=0,967 \qquad \eta_0 = F'(\tau\alpha) = 0,7890 \qquad U=F'U_c=5,888$$

La retta di efficienza del collettore, in funzione della differenza di temperatura media ridotta, risulta pertanto definita dalla relazione:

$$\eta = 0,7890 - 5,888 T_m^*$$

Nella figura 3.21 sono riportati i dati sperimentali ottenuti e la retta di efficienza.

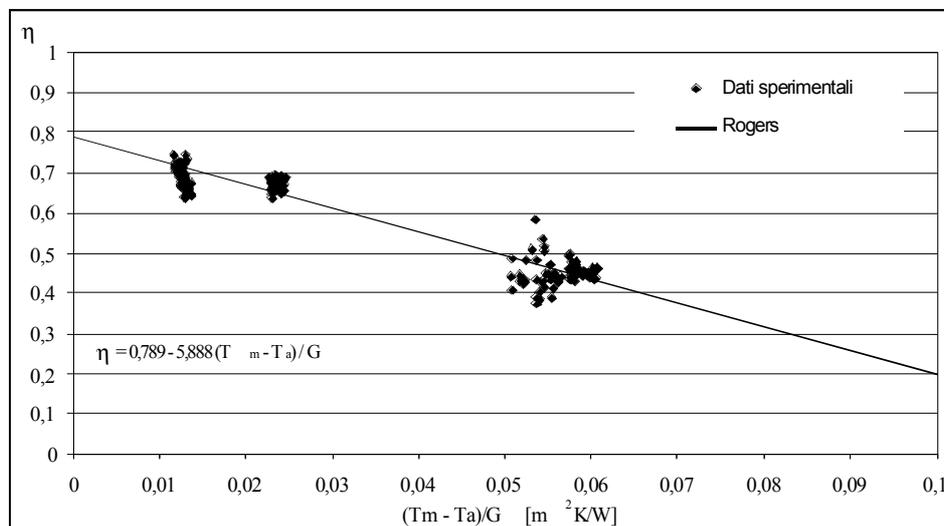


Figura 5.31 – Retta di efficienza di Rogers e dati sperimentali

La dispersione dei dati è caratterizzata da uno scarto medio dello 0,45% e da uno scarto quadratico medio (RMS%) del 6,32%. Per il 60% del campione, l'errore risulta inferiore all'1%, per 30,5% del campione, compreso tra l'1% ed il 10% e solo per il 9,5% del campione, superiore al 10%.

### 5.5.2 IL METODO DI SAUNIER

Il metodo di Saunier ha richiesto tre giorni ed una notte; il test è stato effettuato seguendo nell'ordine le tre procedure: test sull'unità ausiliaria, test notturno e test diurno.

#### *Test sull'unità ausiliaria*

L'unità ausiliaria, in due giorni di test, ha subito sei cicli di riscaldamento e raffreddamento della durata di un'ora ciascuno; sono state impiegate potenze elettriche comprese tra 800 e 2000 W; il raffreddamento è stato eseguito in modo naturale spegnendo i riscaldatori (vedi Fig. 32).

La prova è stata condotta con una portata volumetrica di  $145 \text{ l/h}$  [ $G' = 0,02 \text{ Kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ] con la pompa funzionante al 20% della potenza massima, ovvero ad una potenza di 40W.

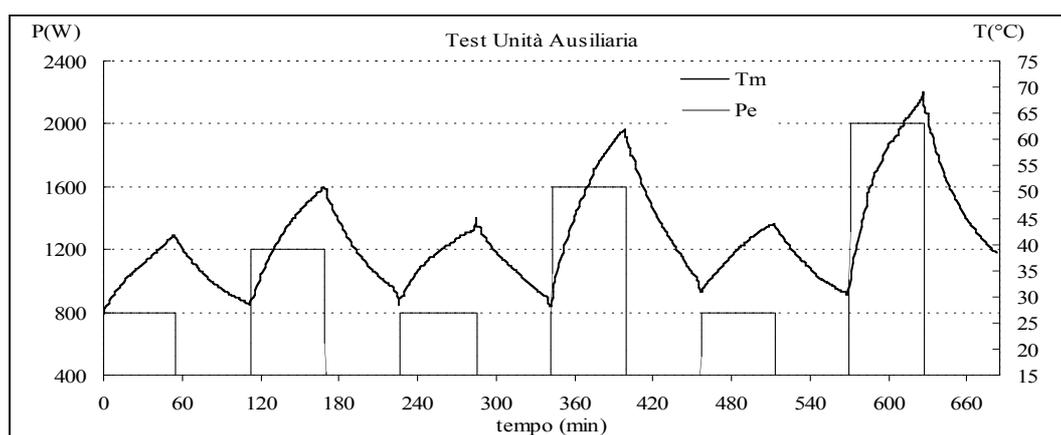


Figura 5.32 – Cicli di riscaldamento e raffreddamento nel test dell'unità ausiliaria

La temperatura media del fluido riportata in fig. 5.32 è ottenuta come media di due valori rilevati in due diversi punti del circuito; ai fini del calcolo delle perdite termiche è stata ovviamente rilevata anche la temperatura esterna che, durante tutta la prova, si è mantenuta molto prossima ai  $18^\circ\text{C}$ .

I parametri  $M_a$  ed  $U_a$  relativi all'unità ausiliaria sono stati ricavati mediante regressione lineare dei dati sperimentali utilizzando l'equazione (3.14).

Il coefficiente di perdita è risultato  $U_a=2 \text{ W/K}$  ( $0,333 \text{ W/K}$  per metro quadrato di collettore); la capacità termica  $C_a$  è risultata invece pari a  $66,25 \text{ kJ/K}$ , equivalente ad una massa d'acqua  $M_a=15 \text{ Kg}$ .

### Test notturno

La prova notturna è stata eseguita in un'unica notte con quattro cicli di riscaldamento, con potenze elettriche comprese tra  $1000$  e  $2000 \text{ W}$ , seguiti da altrettanti cicli di raffreddamento naturale tutti della durata di un'ora e mezza ciascuno.

Il fluido è stato fatto circolare attraverso il sistema sempre con la stessa portata massica [ $G'=0,02 \text{ kg/(s/m}^2)$ ]; la temperatura dell'aria esterna durante la notte è variata tra  $16$  e  $20^\circ\text{C}$ .

La prova ha interessato un solo collettore con una superficie di apertura di  $2 \text{ m}^2$ . Sono state misurate le temperature del fluido in ingresso ed in uscita dal collettore.

Nella fig. 5.33 è riportata la temperatura media del fluido nel collettore e la potenza elettrica erogata dai riscaldatori.

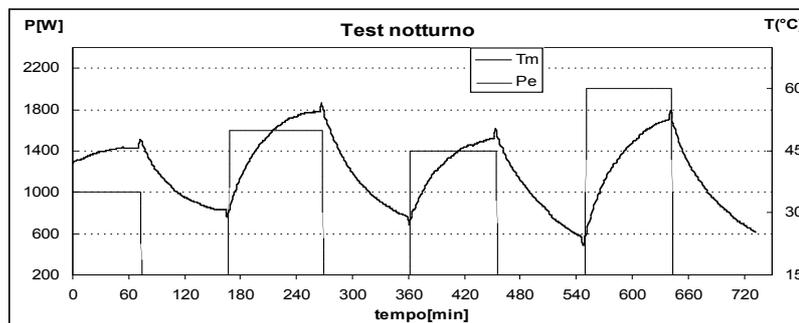


Fig 5.33 – Cicli di riscaldamento e raffreddamento nel test notturno

Dall'analisi di regressione dei dati sperimentali, utilizzando l'equazione (3.14), tenendo conto dei dati ricavati nel test sull'unità ausiliaria, sono stati determinati i parametri di perdita del collettore  $U_1$  ed  $U_2$ , rispettivamente del primo e del secondo ordine e la sua capacità termica  $C_c$ . I risultati ottenuti sono:  $U_1=4,35 \text{ W/m}^2\text{K}$  ed  $U_2=0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $C_c=16,875 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ . La capacità termica del collettore ricavata teoricamente in accordo con lo standard EN 12975-2 è risultata invece pari a  $16,36 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ .

### Test diurno

L'ultimo test effettuato, con il collettore esposto alle reali condizioni esterne, è stato eseguito in una sola giornata, in condizioni di cielo sereno e parzialmente nuvoloso, con una temperatura dell'aria esterna di circa 20°C.

Nella figura 5.34 sono illustrati gli andamenti dell'irraggiamento solare, della temperatura ambiente e della temperatura media in funzione del tempo.

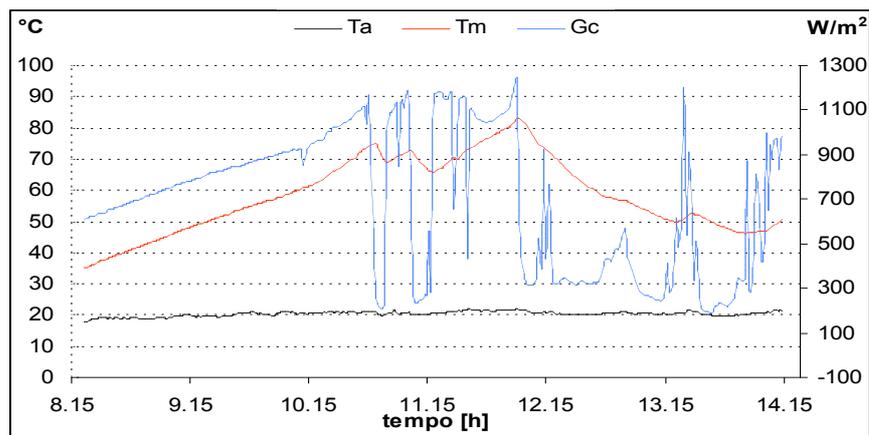


Fig 5.34 – Dati sperimentali rilevati durante il test diurno

La prova è stata condotta con una portata volumetrica di 758 l/h, la massima disponibile per la pompa di circolazione utilizzata, che ha assorbito una potenza elettrica di 88 W. È stato verificato, durante tutta la prova, che con tale valore di portata il salto termico subito dal fluido nel collettore è risultato inferiore ad 1°C, così come richiesto dal metodo che presuppone di operare in condizioni di potenza utile estratta trascurabile.

Utilizzando i dati sperimentali derivanti da tale test, ed i dati determinati nei due test precedenti, mediante l'eq. (3.14) è stato determinato il rendimento ottico del collettore  $\eta_0 = F(\tau\alpha)_n = 0,799$ .

L'equazione caratteristica del collettore è risultata dunque:

$$\eta = 0,799 - 4,35 (T_m - T_a) / G_c - 0,06 G_0 \left[ (T_m - T_a) / G_c \right]^2$$

Per poter effettuare il confronto con il metodo stazionario è stata anche determinata la caratteristica del primo ordine inglobando i due coefficienti di perdita in un unico coefficiente di perdita. La caratteristica del primo ordine è risultata:

$$\eta = 0,799 - 5,63 (T_m - T_a) / G_c$$

Nella figura 5.35 è riportata la caratteristica del collettore del primo ordine insieme ai dati sperimentali.

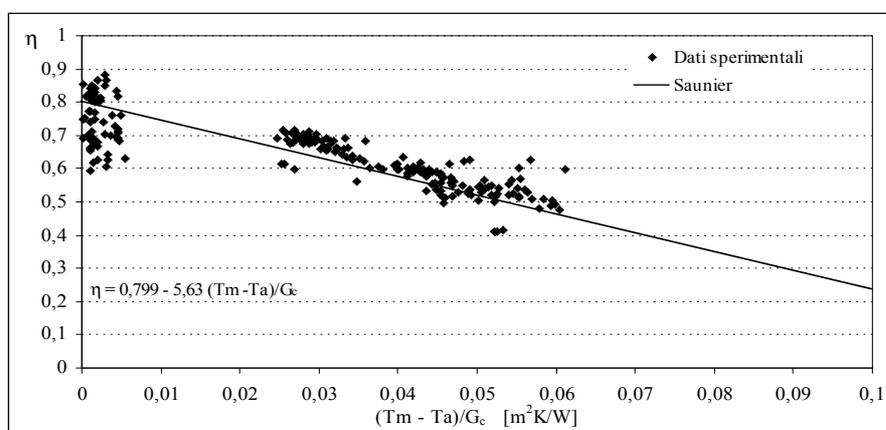


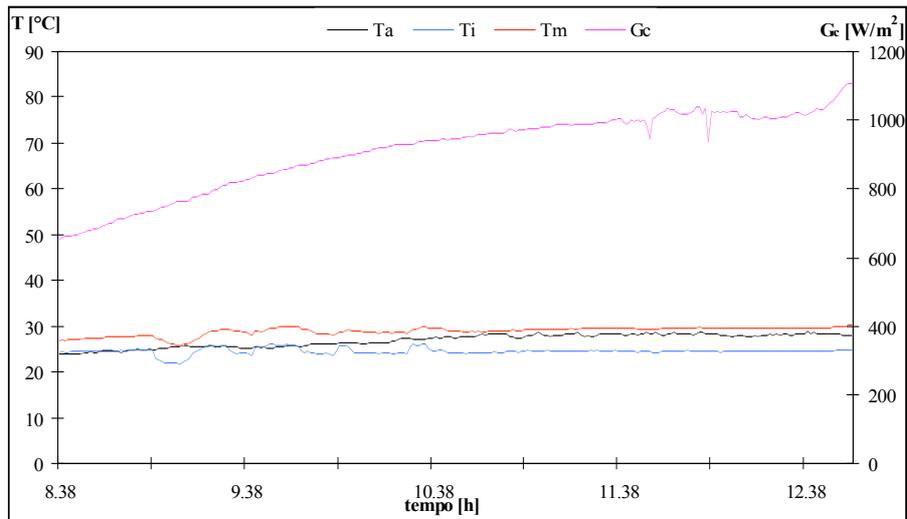
Fig. 5.35 – Retta di efficienza di Saunier e dati sperimentali.

La dispersione fra dati teorici e sperimentali porta ad uno scarto medio del  $-1,734\%$  ed uno scarto quadratico medio del  $9,41\%$ , con l'errore massimo pari a  $33,98\%$  e quello minimo del  $-23,76\%$ . Gli errori al di sotto dello scarto medio riguardano il  $70\%$  dei dati, nel  $12,12\%$  dei casi si hanno scarti superiori al  $10\%$  e gli errori inferiori al  $-10\%$  interessano il  $6,49\%$  dei dati.

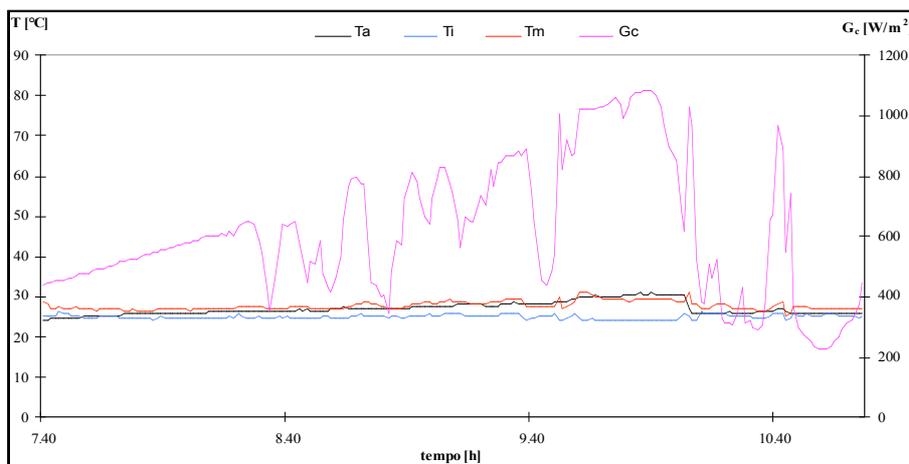
### 5.5.3 IL METODO QDT

Per caratterizzare il collettore con il metodo QDT sono stati necessari cinque giorni di prova. Nei primi due giorni il collettore è stato testato in condizioni di rendimento massimo ( $\eta_0$  conditions) utilizzando una temperatura di ingresso del fluido vicina a quella esterna ( $24 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ) con condizioni di cielo prevalentemente sereno o di parziale

nuvolosità. Altri tre giorni di prova sono stati eseguiti con temperature del fluido in ingresso di  $47\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $60\pm 1^\circ\text{C}$  e  $68\pm 1^\circ\text{C}$  in condizioni di cielo sereno o di parziale nuvolosità incluse nuvole frammentate. Nelle figg. 5.36a, b, c, rispettivamente per un giorno tipo 1, tipo 2 e tipo 3, sono riportati il flusso solare sul piano dei collettori, la temperatura esterna, la temperatura di ingresso e la temperatura media del fluido nel collettore.



*Fig.5.36a - Dati sperimentali per un giorno tipo 1*



*Fig. 5.36b – Dati sperimentali per un giorno tipo 2*

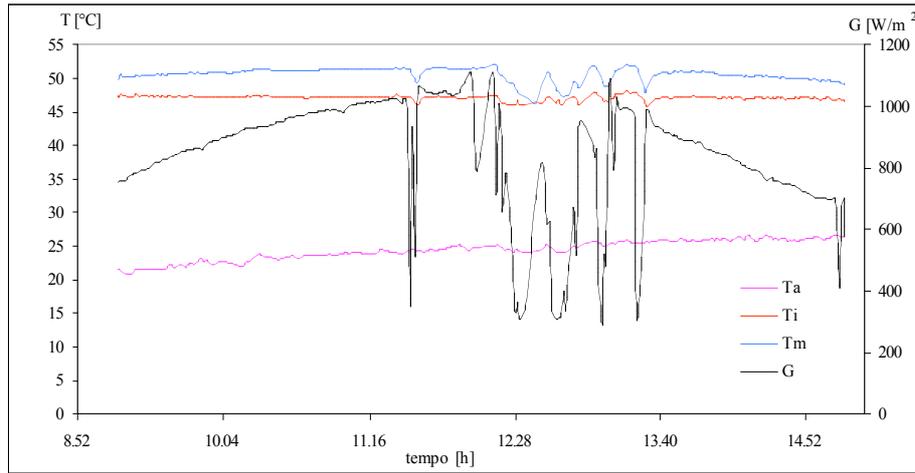


Fig.5.36c - Dati sperimentali per un giorno tipo 3

E' stata utilizzata una portata specifica del fluido termovettore di  $0,02 \text{ Kg/sm}^2$ , e sono state rilevate sperimentalmente le seguenti grandezze:  $T_i$ ,  $T_a$ ,  $T_u$ ,  $G_c$ ,  $G_d$ ,  $G_b$ . Tutte le grandezze acquisite nell'arco dei cinque giorni sono state mediate ad intervalli temporali di 5-10 minuti, ottenendo i dati sperimentali necessari per la determinazione dei parametri caratteristici del collettore. Per quanto riguarda la capacità termica del collettore è stata utilizzata quella teorica perché molto prossima a quella sperimentale ricavata con il metodo di Saunier (scarto 3%). Trascurando l'influenza della velocità del vento e dello scambio termico radiativo infrarosso (trattasi di collettore vetrato), ed utilizzando l'IAM determinato nelle prove sperimentali preliminari, mediante analisi di regressione multilineare basata sull'eq. (2.10), sono stati determinati gli altri parametri caratteristici del collettore. In particolare si è ottenuto:

$$c_1 = 4,3965 \text{ W/m}^2\text{K} , \quad c_2 = 0,02763 \text{ W/m}^2\text{K} \quad F'(\tau\alpha)_e = 0,8263 .$$

L'equazione per il calcolo della potenza utile teorica fornita dal collettore è risultata:

$$q_u = 0,8247G_b + 0,7842G_d - 4,3965(T_m - T_a) - 0,02763 (T_m - T_a)^2 - 16360 \frac{dT_m}{dt}$$

la quale, riferita al flusso solare totale sul piano dei collettori, diventa:

$$q_u = 0,8177G_c - 4,3965(T_m - T_a) - 0,02763 (T_m - T_a)^2 - 16360 \frac{dT_m}{dt}$$

Con riferimento all' eq. (1.53), se si porta il termine di accumulo al primo membro e si divide tutto per  $G_c$ , dall'equazione precedente è possibile ricavare la caratteristica teorica del collettore del secondo ordine:

$$\eta = 0,8177 - 4,3965 T_m^* - 0,02763 G_c T_m^{*2}$$

L'equazione precedente può essere modificata in accordo allo standard ISO 9806-1, ponendo al numeratore dell'ultimo termine  $G_c=G_0=800 \text{ W/m}^2$ . In tal caso, interpolando i dati teorici di rendimento con una curva del secondo ordine, si ha:

$$\eta = 0,8185 - 3,9231 T_m^* - 0,0356 G_0 T_m^{*2}$$

Per poter eseguire il confronto con il metodo stazionario e con gli altri metodi trattati, è stata infine determinata la caratteristica del primo ordine; essa è stata individuata riportando in un grafico i valori di rendimento teorico e ottenendo poi la linea di tendenza (vedi fig. 5,37a). L'equazione trovata è:

$$\eta = 0,8263 - 5,4 T_m^*$$

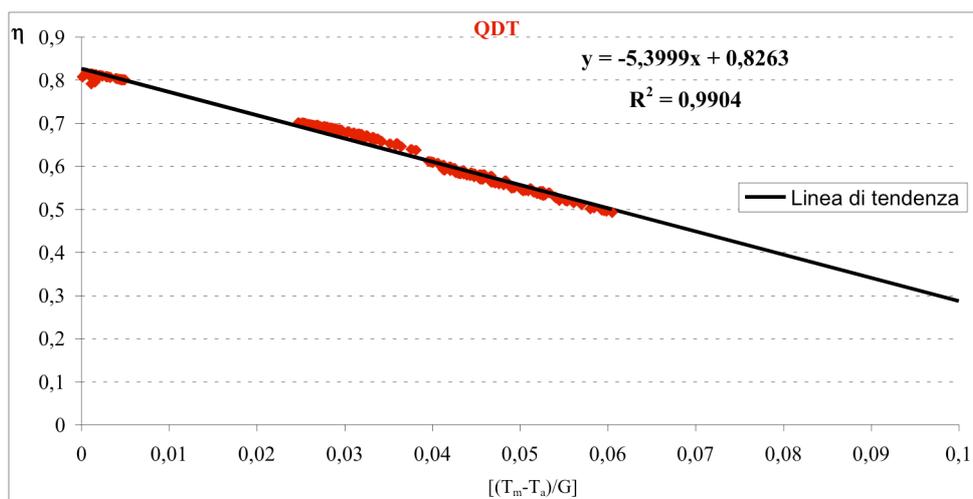


Fig. 5.37a - Determinazione della caratteristica del I ordine del collettore (metodo QDT)

Nella fig. 5.37b è stata invece riportata la caratteristica del primo ordine del collettore insieme ai dati sperimentali di rendimento.

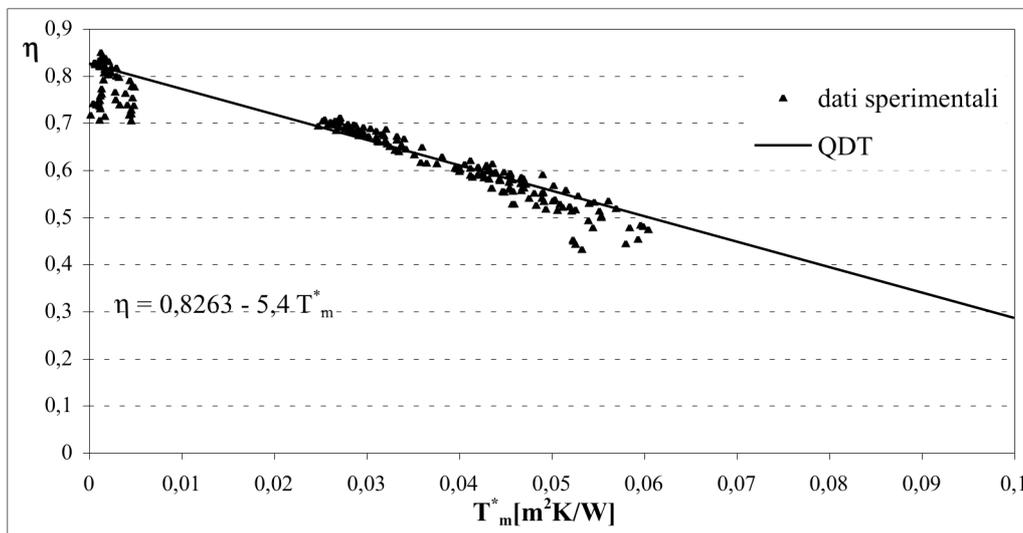


Fig. 5.37b – Retta di efficienza del metodo QDT e dati sperimentali

Il confronto tra dati teorici e sperimentali presenta uno scarto medio dell' 1,785% ed uno scarto quadratico medio del 5,236%; l'errore massimo risulta del 24,67% e quello minimo del -7,08%. Considerando gli errori in valore assoluto, per il 45% del campione l'errore risulta inferiore allo scarto medio; per l'80% del campione inferiore al 5% e solo nel 6,3% dei casi l'errore risulta superiore al 10%.

### 5.5.3.1 METODO STAZIONARIO UNI EN 12975-2.

Come prevede la stessa norma UNI EN 12975-2 è possibile estrapolare una serie di dati sperimentali “stabili” tra quelli utilizzati per il metodo QDT, in modo da determinare la caratteristica del collettore in condizioni stazionarie.

Dai dati sperimentali medi di  $T_a$ ,  $T_i$ ,  $T_u$  e  $G_c$  ottenuti nei cinque giorni di prova sono stati selezionati 16 punti caratterizzati da condizioni di flusso solare, temperatura di ingresso, temperatura ambiente e portata molto stabili. Si è proceduto quindi al calcolo della potenza utile e del rendimento per ognuno dei 16 valori selezionati. Dall'interpolazione lineare dei valori di efficienza ottenuti si è ricavata la curva caratteristica del collettore in condizioni stazionarie, come riportato in figura 5.38.

Nella fig. 5.39 sono state altresì riportate, a titolo di confronto, la caratteristica del primo ordine ottenuta con il metodo QDT e quella stazionaria da esso derivata, entrambe previste dalla UNI EN 12975-2.

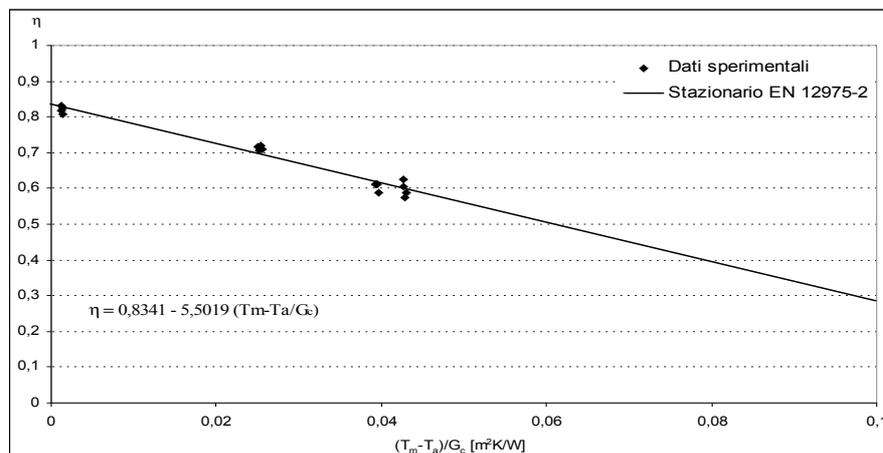


Fig. 5.38 – Retta di efficienza UNI EN 12975-2 (Stazionario)

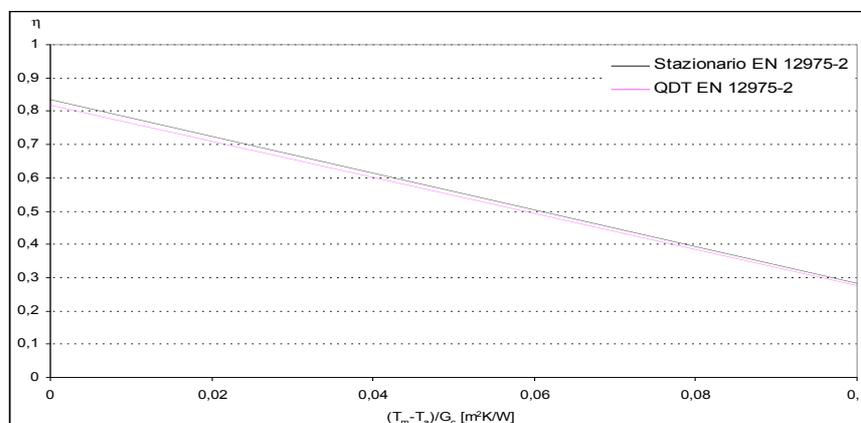


Fig. 5.39 – Caratteristica del collettore ottenuta con entrambi i metodi della UNI EN 12975-2

#### 5.5.4 METODO DI PERERS

Per poter applicare il metodo di Perers è necessario procedere prima alla stima del coefficiente di perdita dell'unità ausiliaria (circuito di prova escluso il serbatoio ed il collettore). Tale grandezza è stata già determinata nel metodo di Saunier ed è risultata

$U_p=0,333 \text{ W/m}^2\text{K}$  (riferita all'unità di superficie del collettore); per quanto riguarda invece la capacità termica del collettore, in analogia al metodo QDT, si fatto riferimento al suo valore teorico.

Per la stima degli altri parametri, considerata la quasi sovrapposibilità dei metodi, sono stati utilizzati gli stessi dati sperimentali relativi ai cinque giorni di test del metodo QDT. Per questo modello si è ottenuto:

$$F'U_1 = 4,3965 \text{ W/m}^2\text{K} \quad F'U_2 = 0,02763 \text{ W/m}^2\text{K} \quad U_p=0,333 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Poiché  $F'U_1$  e  $U_p$  possono essere sommati in quanto moltiplicano la stessa differenza di temperatura, l'equazione per il calcolo della potenza utile fornita dal collettore, nel caso di flusso solare scomposto in diretta e diffusa, risulta:

$$q_u = 0,8247G_b + 0,7842G_d - 4,7295(T_m - T_a) - 0,02763 (T_m - T_a)^2 - 16360 \frac{dT_m}{dt}$$

Nel caso essa sia riferita invece al flusso solare totale, si ha:

$$q_u = 0,8177G_c - 4,7295(T_m - T_a) - 0,02763 (T_m - T_a)^2 - 16360 \frac{dT_m}{dt}$$

Con riferimento all' eq. (1.53), se si porta il termine di accumulo al primo membro e si divide tutto per  $G_c$ , dall'equazione precedente è possibile ricavare la caratteristica teorica del collettore del secondo ordine:

$$\eta = 0,8177 - 4,7295 T_m^* - 0,02763 G_c T_m^{*2}$$

L'equazione precedente può essere modificata in accordo allo standard ISO 9806-1, ponendo al numeratore dell'ultimo termine  $G_c=G_0=800 \text{ W/m}^2$ . In tal caso, interpolando i dati teorici di rendimento con una curva del secondo ordine, si ha:

$$\eta = 0,8185 - 4,2561 T_m^* - 0,0356 G_0 T_m^{*2}$$

Per poter eseguire il confronto con il metodo stazionario e con gli altri metodi trattati, è stata infine determinata la caratteristica del primo ordine; essa è stata individuata riportando in un grafico i valori di rendimento teorico e trovando poi la linea di tendenza (vedi fig. 5.40a). L'equazione trovata è:

$$\eta = 0,8263 - 5,7329 T_m^*$$

Nella fig. 5.40b è stata invece riportata la caratteristica del primo ordine del collettore insieme ai dati sperimentali di rendimento.

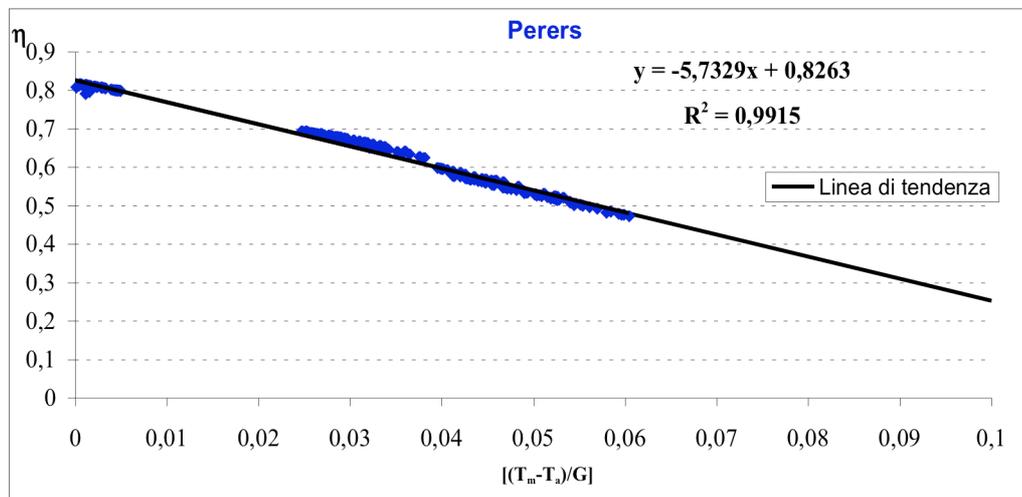


Fig. 5.40a - Determinazione della caratteristica del I ordine del collettore (metodo di Perers)

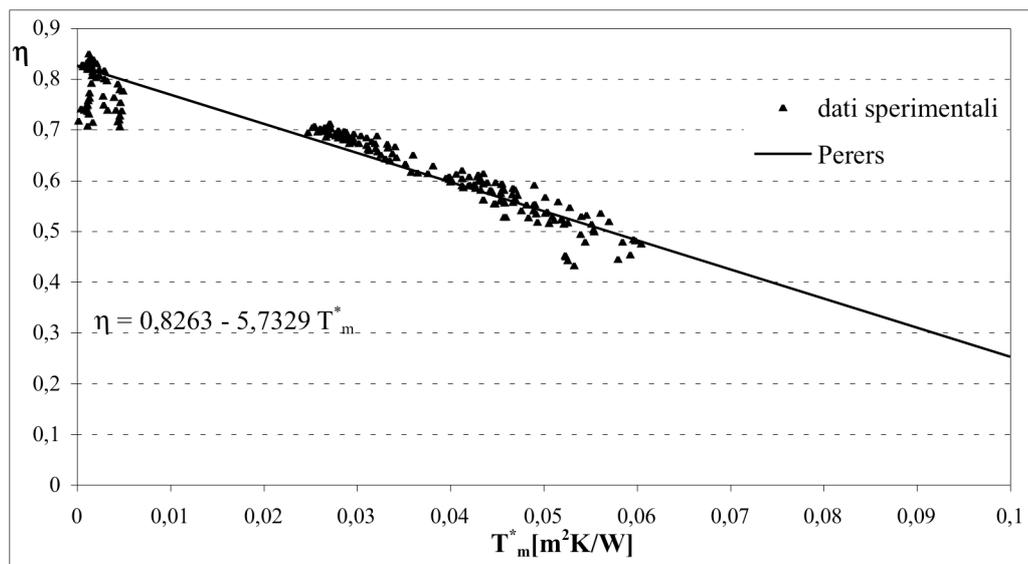


Fig. 5.40b – Retta di efficienza di Perers e dati sperimentali

Lo scarto medio tra dati teorici e sperimentali è risultato dello 0,083% e lo scarto quadratico medio del 4,93%; l'errore massimo del 20,57% e quello minimo del -9,84%. Considerando gli errori in valore assoluto, per il 75,4% del campione l'errore è risultato inferiore al 5% e solo nel 5,8% è risultato superiore al 10%.

Com'era intuitivo attendersi, il metodo QDT ed il metodo di Perers forniscono lo stesso valore di rendimento ottico. In relazione invece al coefficiente di perdita, come si può notare, il valore fornito dal metodo di Perers è esattamente pari a quello fornito dal metodo QDT incrementato di  $U_p$ . Ciò è dovuto al fatto che Perers, erroneamente, a mio giudizio, imputa al collettore perdite non proprie. Infatti, con l'introduzione dell'ultimo termine (perdite nel circuito di prova) nell'Eq. (3.24), essa è riferibile più al serbatoio di accumulo che non al collettore.

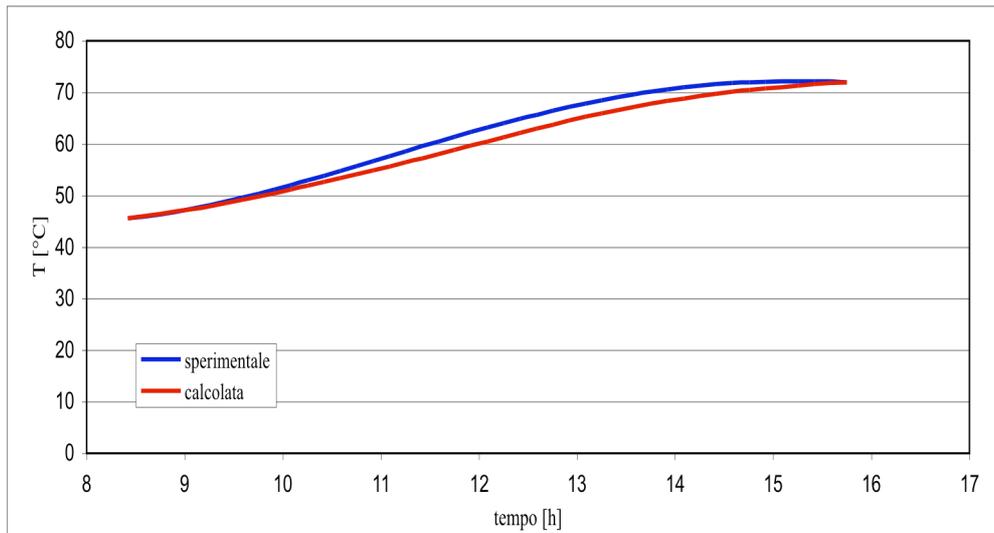
### **5.5.5 METODO DI WIJEYSUNDERA**

Il metodo di Wijeysondera è stato quello che ha creato maggiori difficoltà a livello di test sperimentali a causa delle peculiarità del metodo e del circuito di prova utilizzato.

Trattandosi di un metodo basato sul valore della temperatura del serbatoio di accumulo, è stato necessario acquisire tale dato con accuratezza, mantenendo sempre in funzione una pompa di miscelazione in modo da eliminare fenomeni di stratificazione. Il serbatoio utilizzato (750 l), presentando una capacità termica significativa (valore teorico 3,25 MJ/K), ha comportato, soprattutto in giornate parzialmente nuvolose, incrementi di temperatura modesti quasi al limite dell'errore strumentale. Tale inconveniente è stato comunque superato acquisendo i dati sperimentali ogni minuto, ed effettuando il bilancio del serbatoio ogni 10'.

Inizialmente sono state condotte delle prove per determinare la capacità termica del serbatoio ed il suo coefficiente di perdita totale. L'acqua contenuta nel serbatoio, mediante delle resistenze elettriche, è stata portata fino alla temperatura di 80°C e lasciata poi raffreddare in modo naturale. Mediante analisi di regressione dei dati sperimentali è stata ricavata una capacità termica del serbatoio di 3,3 MJ/K ed un coefficiente di perdita totale di 2 W/K. Per determinare, invece, i parametri del collettore sono stati eseguiti sette giorni di prova in condizioni di cielo sereno e di cielo parzialmente nuvoloso. Le prove sono state condotte dalle ore 9.00 alle ore 17.00 circa. Nella Fig. 5.41, per una giornata serena (9 aprile 2008), è stata riportata la temperatura del serbatoio sperimentale e quella calcolata con l'equazione teorica (3.38a).

Fig. 5.41 – Temperatura del serbatoio per il 9 aprile 2008



La figura mostra un ottimo accordo tra dati teorici e dati sperimentali. Lo scarto medio tra le due temperature è risultato del -2,36%, mentre lo scarto quadratico medio del 2,77%.

Per ogni giorno di prova, utilizzando i valori sperimentali di  $T_s$  e le Eqq. (3.38a) e (3.39), sono stati ricavati i parametri  $g$  e  $\lambda$ . Dopo aver effettuato la media dei valori giornalieri, si è ottenuto:

$$g=1,3494 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{K/J} \quad \lambda=1,1154 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

Utilizzando poi le equazioni da (3.31) a (3.35), si è determinato:

$$\lambda_1=4,3855 \text{ m}^2/\text{s} \quad \lambda_2=33,51 \text{ J/Ks}^2 \quad \lambda_3=3,995 \text{ J/Ks}^2$$

$$F_R(\tau\alpha)_e=0,7327 \quad F_R U_c=5,6081 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Infine, mediante le Eqq. (1.31a), (1.31b) e (1.32b), si è ottenuto:

$$F'(\tau\alpha)_e=0,7593 \quad F' U_c=5,8111 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Nella Fig. 5.42 è stata riportata la caratteristica del collettore determinata con il metodo di Wijeysondera ed i dati sperimentali di rendimento. Il confronto, in termini numerici, è caratterizzato da uno scarto medio del -10,76% ed un RMS% del 12%; l'errore massimo è

del 6,34% e quello minimo del -19,78%. Considerando gli errori in valore assoluto, solo per il 12% del campione l'errore è risultato inferiore al 5%; nel 68,6% dei casi è risultato superiore al 10% e nel 17% superiore al 15%.

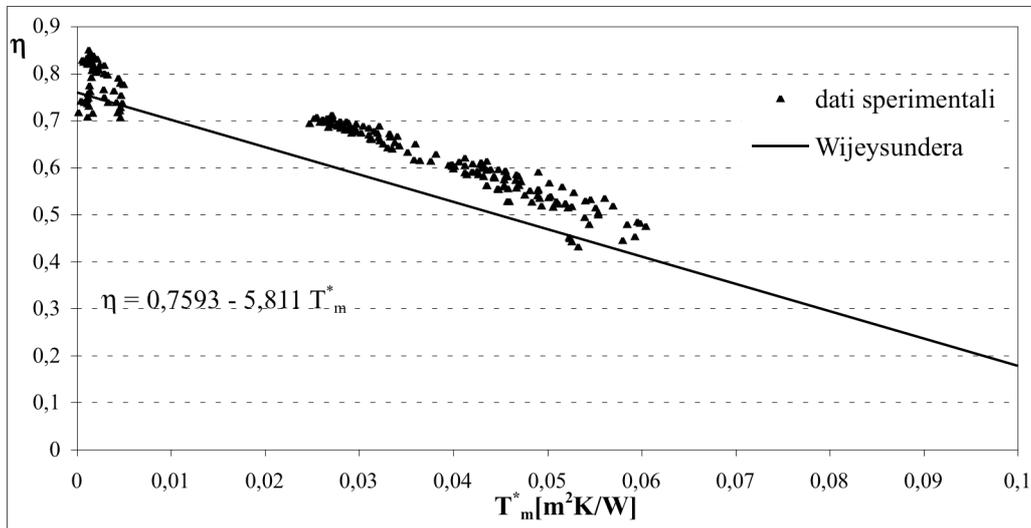


Fig. 5.42 – Retta di efficienza di Wijeysundera e dati sperimentali

### 5.5.6 QUICK DYNAMIC TESTING

E' stata eseguita una sequenza di prove simile a quella ASHRAE per la determinazione della costante di tempo del collettore. Il collettore è stato esposto al sole con temperatura d'ingresso del fluido costante e portata specifica costante pari a  $0,02 \text{ kg/sm}^2$ . Il test è stato condotto intorno al mezzogiorno solare per raggiungere condizioni di stabilità in breve tempo. Considerato che la durata del test è stata solo di pochi minuti, per assicurare la ripetibilità dei risultati, l'intero test è stato ripetuto quattro volte, con temperature di ingresso del fluido di 30, 40, 50 e  $60^\circ\text{C}$ . Le prove sono state effettuate il 27 maggio 2008, giornata particolarmente serena, con flusso solare sempre superiore ai  $900 \text{ W/m}^2$ .

Nella fig. 5.43 sono stati riportati, per un solo test, le temperature di ingresso e di uscita del fluido, la temperatura esterna ed il flusso solare. Utilizzando i dati sperimentali raccolti durante i quattro test, la capacità termica teorica, e trascurando l'effetto della velocità del vento sulle perdite termiche, mediante regressione lineare basata sull'eq. (3.40), sono stati determinati i parametri caratteristici del collettore:  $F'(\tau\alpha)_e=0,8232$  e  $F'U_c=5,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

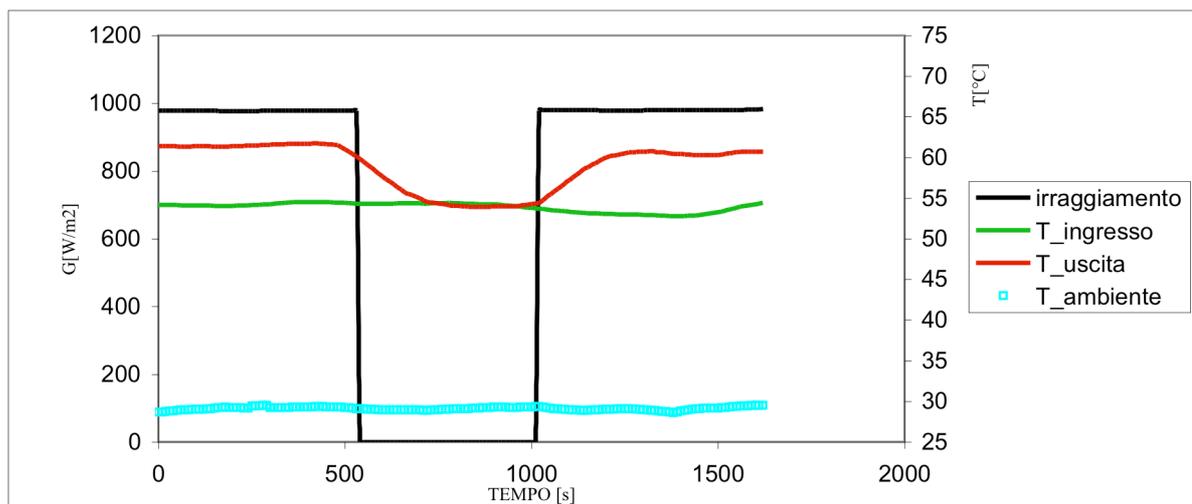


Fig. 5.43 – Flusso solare e temperature durante una prova con il Quick Dynamic Testing

Nella Fig. 5.44 è stata riportata la caratteristica del collettore determinata con il Quick Dynamic Testing ed i dati sperimentali di rendimento. Il confronto, in termini numerici, è caratterizzato da uno scarto medio del -0,44% ed un RMS% del 5,23%; l'errore massimo è del 19,38% e quello minimo del -8,48%. Considerando gli errori in valore assoluto, per il 69% del campione l'errore è risultato inferiore al 5%; nel 93,2% dei casi è risultato inferiore al 10% e solo nel 2,4% superiore al 15%.

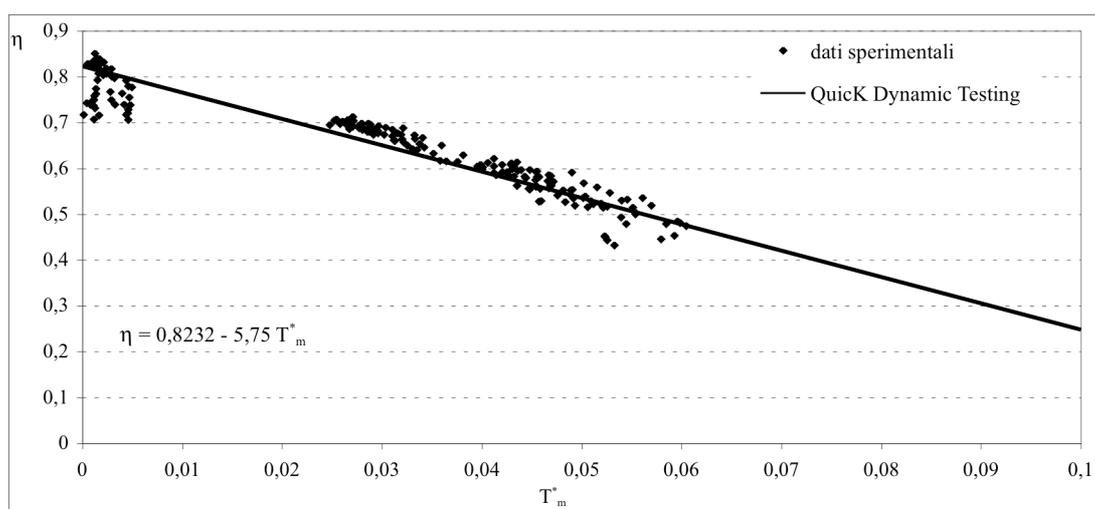


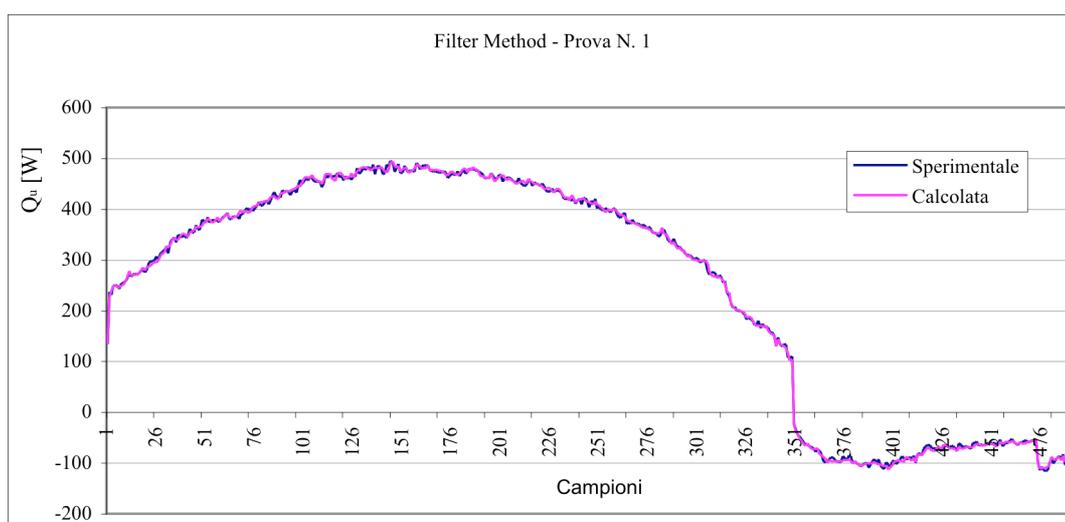
Fig. 5.44 – Retta di efficienza di Wijeysondera e dati sperimentali

### 5.5.7 METODO DEL FILTRO

Non avendo una casistica cui poter fare riferimento o uno standard che ne specifichi l'applicazione, è stato necessario condurre diverse prove sperimentali al fine di capire quali metodologie potessero essere proficuamente impiegate nel metodo e, quindi, quali test riproducessero meglio il comportamento reale dell'impianto. I punti acquisiti durante i test sono stati elaborati mediante un codice di calcolo in ambiente Labview con supporto Matlab basato sul filtro di Kalman, cortesemente messo a disposizione dal Laboratorio Qualificazione Componenti Solari del Centro Ricerche E.N.E.A.- Trisaia (MT). Grazie ai risultati di queste elaborazioni, si è potuto determinare la potenza utile estratta dal collettore, e, conseguentemente, la curva di efficienza dello stesso. Tra le diverse strategie di prova eseguite, due in particolare hanno fornito risultati soddisfacenti e tali da permettere la caratterizzazione del collettore.

#### *Prova N. 1*

La prova ha avuto una durata di 48 ore durante le quali il collettore è stato esposto alle reali condizioni atmosferiche imponendo solo la portata costante (pari a  $0,02 \text{ Kg/m}^2\text{s}$ ). Alla fine della seconda giornata, dalle ore 19 alle ore 23, il fluido termovettore è stato riscaldato mediante delle resistenze elettriche. Dopo le quattro ore di riscaldamento, le resistenze elettriche sono state disattivate lasciando che il collettore si raffreddasse in evoluzione libera fino al mattino successivo.



*Fig. 5.45 – Confronto tra potenza utile teorica e sperimentale*

I dati sperimentali sono stati elaborati mediante il codice di calcolo per determinare i parametri  $p_i$  che permettono il calcolo della temperatura media del fluido nel collettore (teorica) e della potenza utile (teorica) estratta mediante il sistema (4.30). Nella fig. 5.45 è riportato il confronto tra la potenza utile teorica e quella misurata sperimentalmente. La figura mostra un ottimo accordo tra i valori teorici ed i dati sperimentali, e ciò è convalidato dal valore dello scarto quadratico medio pari al 3,15%.

In corrispondenza di ogni dato del campione, utilizzando il valore della potenza utile, si è determinato il valore del rendimento teorico tenendo anche in conto degli effetti di accumulo. Successivamente, i dati di rendimento teorico sono stati diagrammati in funzione della differenza di temperatura media ridotta ed è stata tracciata la linea di tendenza per determinare la caratteristica del collettore del I ordine (vedi fig. 5.46).

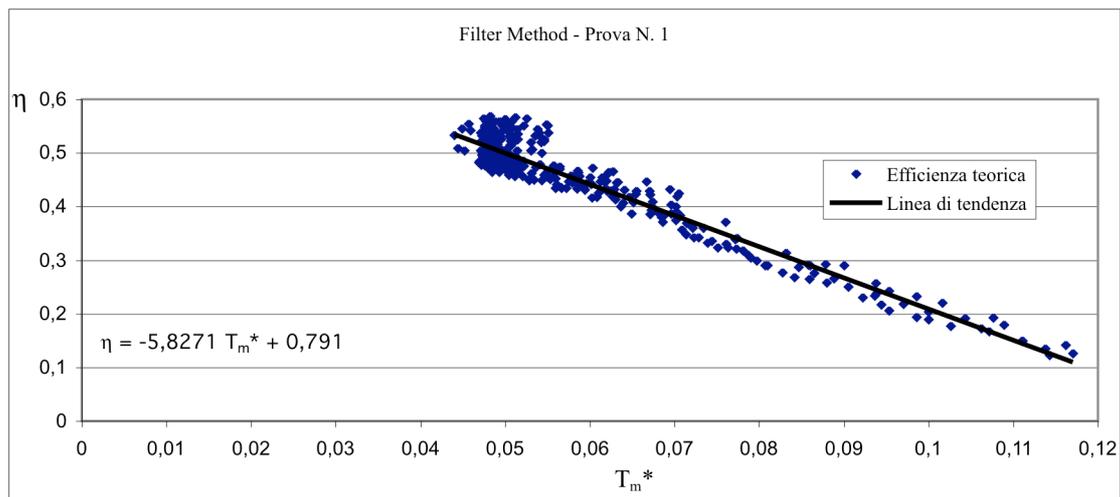


Fig. 5.46 - Determinazione della caratteristica del I ordine del collettore (Filter Method)

Nella fig. 5.47 è invece riportata la caratteristica teorica del collettore del primo ordine ed i dati di rendimento determinati sperimentalmente. Il confronto, in termini numerici, è caratterizzato da uno scarto medio dello 0,69% ed un RMS% del 9,49%; l'errore massimo è del 27,64% e quello minimo del -49,71%. Considerando gli errori in valore assoluto, per il 62% del campione l'errore è risultato inferiore al 5%; nel 78,64% dei casi è risultato inferiore al 10%, nel 90,7% inferiore al 15% e solo nel 4,3% dei casi superiore al 20%.

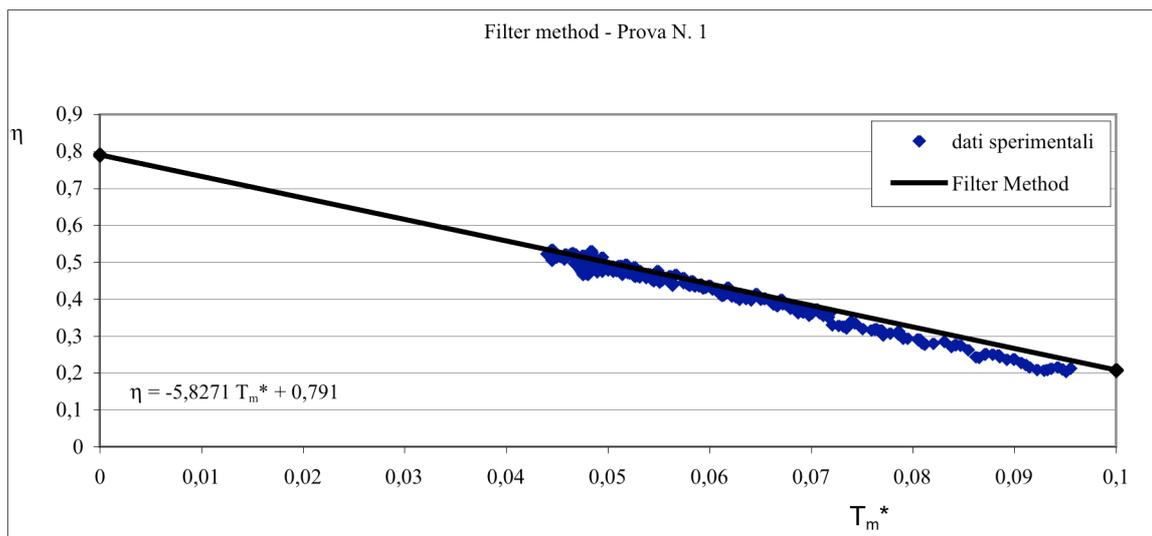


Fig. 5.47 – Retta di efficienza del Filter Method e dati sperimentali

#### Prova N. 2

Anche la seconda prova ha avuto una durata complessiva di due giorni: nel primo giorno si è lasciato l'impianto in evoluzione libera come nella prima di prova con la medesima portata di fluido. Nel secondo giorno sono stati effettuati invece due cicli di riscaldamento: uno (di quattro ore) centrato attorno al mezzogiorno solare ed uno dalle ore 19.00 alle ore 23.00. Dalle ore 23.00 in poi, il sistema è stato lasciato in evoluzione libera fino al mattino successivo con la pompa di circolazione accesa.

I risultati ottenuti con questa seconda prova sono illustrati graficamente nelle figg. 5.48, 5.49 e 5.50. In relazione al confronto tra le potenze utili, si è avuto uno scarto quadratico medio del 3,92%; lo scostamento tra rendimento teorico e sperimentale è risultato invece caratterizzato da uno scarto medio dell'1,61% ed un RMS% dell'8,1%. L'errore massimo è del 26,79% e quello minimo del -20,65%. Considerando gli errori in valore assoluto, per 21,4% del campione l'errore è risultato inferiore allo scarto medio; nel 53,5% dei casi è risultato inferiore al 5% e nel 20% dei casi superiore al 10%.

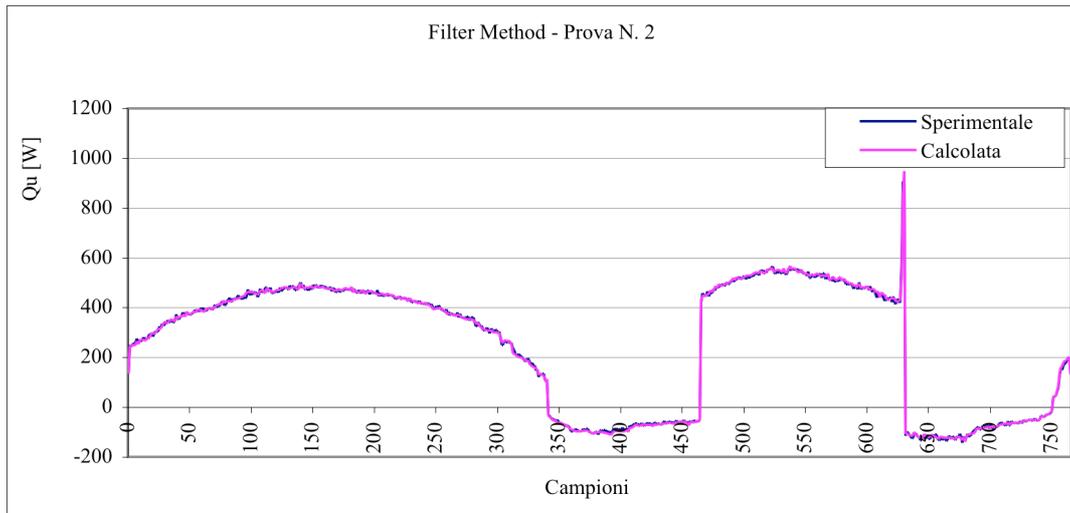


Fig. 5.48 – Confronto tra potenza utile teorica e sperimentale

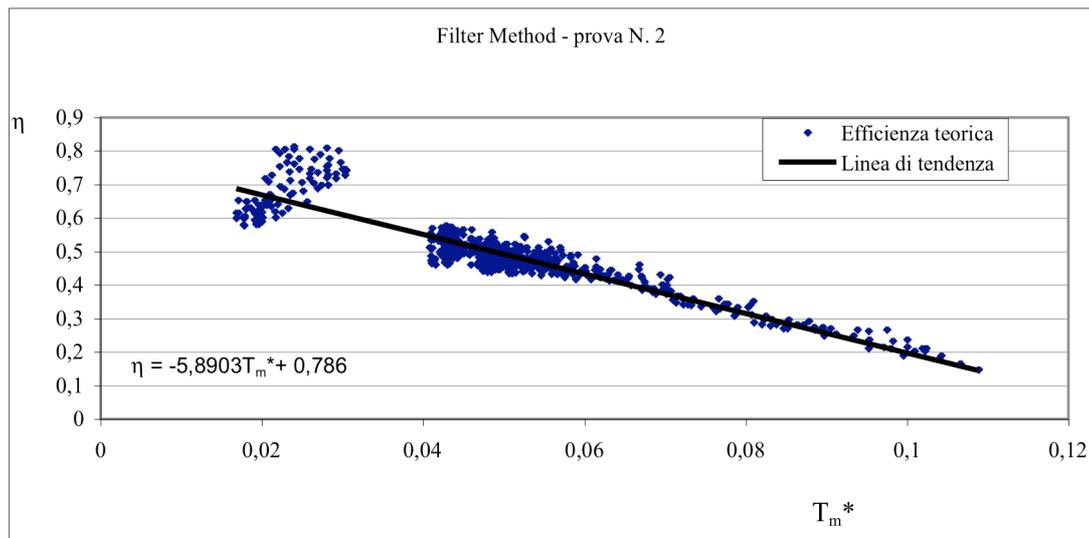


Fig. 5.49 – Determinazione della caratteristica del I ordine del collettore (Filter Method)

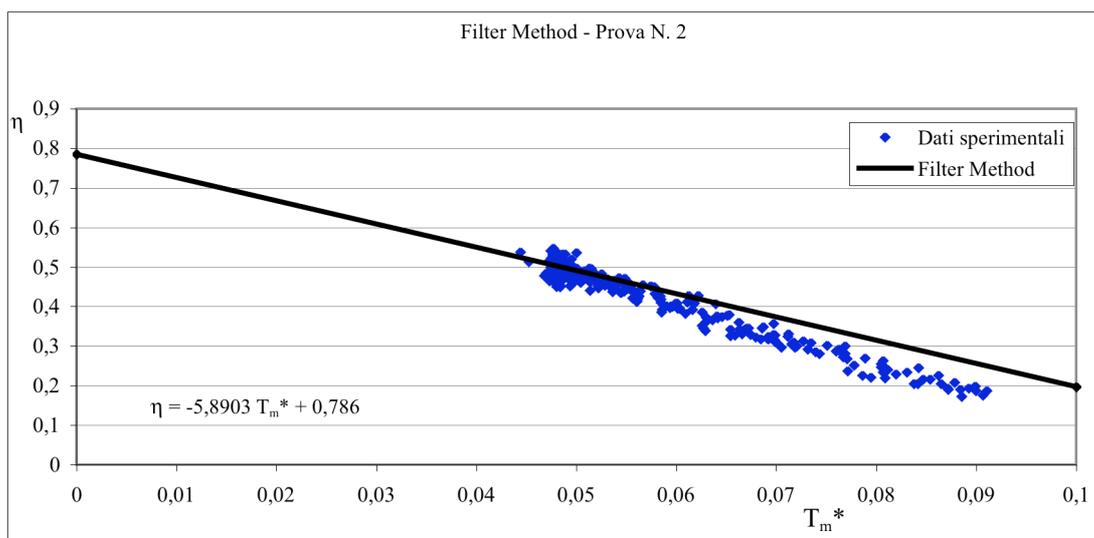


Fig. 5.50 – Retta di efficienza del Filter Method e dati sperimentali.

## 5.6 CONFRONTO TRA I DIVERSI METODI

Per poter eseguire il confronto tra i diversi metodi studiati e sperimentati, i parametri caratteristici del collettore relativi alla curva del primo ordine sono stati raccolti nella tabella 5.1.

METODO	$F'(\tau\alpha)$	$F'U_c$	$\Delta F'(\tau\alpha)$ (%)	$\Delta(F'U_c)$ (%)
Stazionario ISO 9806-1	0,8110	5,9806	0,00	0,00
Stazionario EN 12975-2	0,8341	5,5019	2,85	-8,00
ROGERS	0,7890	5,8880	-2,71	-1,55
SAUNIER	0,7990	5,6300	-1,48	-5,86
QDT (EN 12975-2)	0,8263	5,4000	1,88	-9,70
PERERS	0,8263	5,7329	1,88	-4,14
WIJEYSUNDERA	0,7593	5,8110	-6,37	-2,83
FILTER METHOD (Prova N. 1)	0,7910	5,8271	-2,46	-2,56
FILTER METHOD (Prova N. 2)	0,7860	5,8903	-3,08	-1,51
QUICK DYNAMIC TESTING	0,8232	5,7500	1,50	-3,94

Tab. 5.1 - Parametri caratteristici del collettore e scarti relativi al metodo ISO

Nella stessa tabella, prendendo come riferimento la caratteristica stazionaria determinata con lo standard ISO 9806-1, sono riportati gli scarti percentuali relativi al rendimento ottico ed al coefficiente di perdita del collettore. Detti scarti, a livello grafico, sono meglio evidenziati nella fig. 5.51.

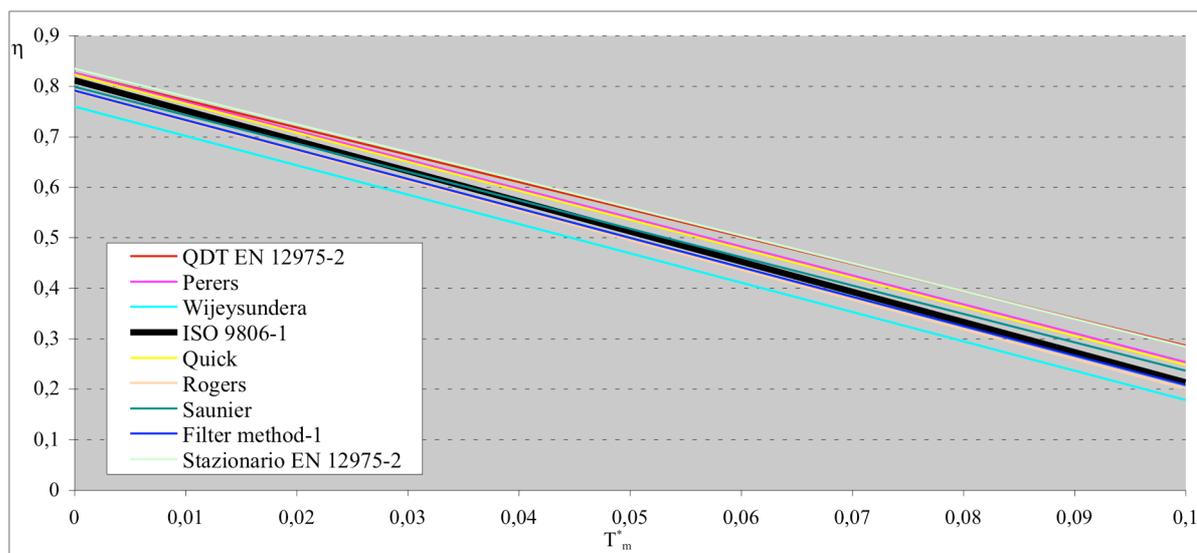


Fig. 5.51 – Confronto tra le curve caratteristiche (del primo ordine) ottenute con i diversi metodi

La tabella 5.1 mostra un sostanziale accordo tra i diversi metodi, soprattutto per quanto riguarda l'efficienza ottica. Prendendo come riferimento la caratteristica stazionaria ottenuta secondo lo standard ISO 9806-1, lo scostamento massimo, sulla stima del rendimento ottico, si ottiene con il metodo di Wijeysondera ed è pari al -6,37%; tale scostamento è in ogni caso in linea con quanto già trovato dagli stessi autori del metodo. Per quanto riguarda invece la stima del coefficiente di perdita termica del collettore, i metodi di Rogers, di Wijeysondera e del filtro, sono quelli che si avvicinano di più al dato stazionario; il metodo QDT previsto dalla nuova norma è, invece, paradossalmente, quello che presenta lo scostamento massimo (circa il 10%).

Nella tabella 5.2 sono riportati inoltre i parametri caratteristici del collettore relativi alla curva del secondo ordine per sei dei dieci metodi studiati. Dette curve, infine, sono riportate in forma grafica nella fig. 5.52.

<b>METODO</b>	<b>F'(τ<math>\alpha</math>)</b>	<b>c<sub>1</sub></b>	<b>c<sub>2</sub></b>
Stazionario ISO 9806-1	0,7999	4,5274	0,02861
SAUNIER	0,7990	4,3500	0,06000
QDT (EN 12975-2)	0,8185	3,9231	0,03560
PERERS	0,8185	4,2561	0,03560
WIJEYSUNDERA	0,7718	4,5720	0,01469
FILTER METHOD (Prova N. 1)	0,7871	5,7087	0,00102

Tab. 5.2 - Parametri caratteristici del collettore (curva del II ordine)

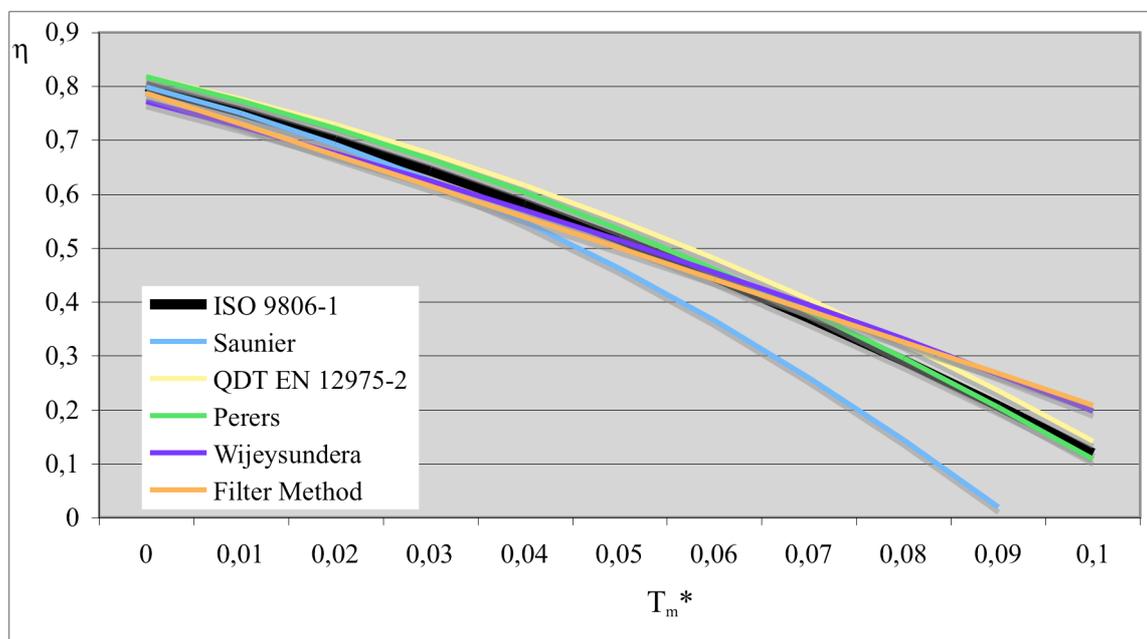


Fig. 5.52 – Confronto tra le curve caratteristiche (del secondo ordine) ottenute con i diversi metodi

Con riferimento alla fig. 5.52 si può sottolineare che, ad eccezione del metodo di Saunier, tutti gli altri metodi presentano risultati in ottimo accordo con il metodo stazionario. Il metodo di Wijeysondera ed il filter method presentano piccoli scostamenti per valori di  $T_m^* > 0,08$ .