

CAPITOLO 3

ALTRI METODI DI PROVA IN TRANSITORIO

3.1 INTRODUZIONE

Oltre al metodo QDT (Quasi Dynamic Test), recentemente introdotto dallo standard europeo 12975-2, in letteratura sono presenti diversi metodi di prova in transitorio (indoor e outdoor) che sono stati proposti da diversi autori a partire da 1977.

I metodi “indoor” sono poco utilizzati a causa del costo del simulatore solare.

3.2 CLASSIFICAZIONE

I metodi “outdoor”, in relazione al tipo di approccio seguito, possono essere classificati nei seguenti gruppi (Amer et al., 1997): *metodi semplificati (ad un nodo)*, *metodi a più nodi*, *metodi multi-test*, *metodi basati sulla funzione di trasferimento* e *metodi non validati*.

3.2.1 METODI SEMPLIFICATI

Arranovitch (1977) ha sviluppato un metodo che, in maniera semplice, aggiunge il termine relativo alla capacità termica del collettore al bilancio energetico di quest’ultimo in stato stazionario; ne segue che l’equazione che esprime il bilancio termico del collettore in funzione della temperatura media del fluido è data dalla seguente equazione

$$Q_u = F'(\tau\alpha)G_c A_c - F' U_c A_c (T_{fm} - T_a) - (Mc)_e \frac{dT_{fm}}{dt} \quad (3.1)$$

L’efficienza del collettore è calcolata con la seguente formula:

$$\eta = \frac{Q_u + (Mc)_e (dT_{fm} / dt)}{G_c A_c} = F'(\tau\alpha) - F' U_c \frac{(T_{fm} - T_a)}{G_c} \quad (3.2)$$

L'efficienza viene diagrammata in funzione del termine $(T_{fm} - T_a)/G_c$. Il metodo non richiede il controllo della temperatura in ingresso ma si rende necessaria una prova aggiuntiva per determinare il valore della capacità termica. Per la velocità di variazione della temperatura in ingresso usualmente si impone la seguente condizione:

$$\frac{dT_{fm}}{dt} \leq 12^\circ\text{C h}^{-1} \quad (3.3)$$

in modo che al termine $\left[(Mc)_e \frac{dT_{fm}}{dt} \right]$ sia relativamente piccolo rispetto a Q_u . Ne segue che il metodo è applicabile ai casi di variazione lenta dell'insolazione per la quali l'eq. (3.3) può essere soddisfatta. Chiaramente ciò rappresenta una limitazione per l'uso di questo metodo; ne segue che esso non ha un'applicabilità estesa a tutte le condizioni possibili di funzionamento del collettore.

Perers (1993) ha descritto un metodo di applicabilità più generale che considera: (a) un termine relativo alla capacità termica a un nodo che tiene conto degli effetti dinamici e (b) IAM separato per la radiazione diretta e quella diffusa. I parametri del collettore vengono determinati mediante regressione lineare multipla. Secondo gli autori il modello sembra sovrastimare l'efficienza ottica e i coefficienti che tengono conto delle perdite termiche. Questo sarebbe attribuibile all'espressione assai semplificata dell'IAM e all'incompletezza di un modello del secondo ordine (Perers et al., 1990; Perers e Walletun 1991). Inoltre un'analisi dei risultati presentata da Perers e Walletun (1991) mostra una fluttuazione significativa nei valori della capacità termica da un test all'altro.

Un'altra procedura in transitorio è stata proposta da Souproun (1992). Essa si basa essenzialmente sull'analisi di una singola curva sperimentale ottenuta prima riscaldando e poi raffreddando il collettore. Tale curva è ottenuta con un lungo periodo di riscaldamento di 90 minuti o fino a quando la temperatura del fluido termovettore supera i 60 °C. Tra i due casi si sceglie quello dalla durata minore. In seguito il processo di raffreddamento è ottenuto schermato il collettore dai raggi solari. Sia durante il processo di riscaldamento che quello di raffreddamento è necessario che la radiazione solare e le altre condizioni ambientali rimangono costanti. Analizzando questa curva è possibile determinare i coefficienti di perdita termica e l'efficienza ottica del collettore.

È richiesto un periodo lungo di radiazione in stato stazionario per realizzare il processo di riscaldamento. Occorre segnalare che periodi così lunghi di radianza stazionaria sono

infrequenti nelle prove all'esterno, ne segue che il metodo non è raccomandato se le prove sono all'esterno e può essere adottato proficuamente solo effettuando le prove con un simulatore.

3.2.2 METODI A PIÙ NODI

Wijeysundera e Hawlader (1984) e Hawlader e Wijeysundera (1987) hanno proposto per il collettore un modello a 2 nodi nel quale la capacità termica della copertura trasparente è sommata a quella della piastra assorbente mentre la capacità del fluido è trattata in maniera separata. È stata utilizzata la tecnica della trasformata di Laplace per ottenere le espressioni della temperatura della piastra assorbente e del fluido. La prova sperimentale è effettuata schermando il collettore e facendo circolare al suo interno il fluido a temperature elevate. La variazione della temperatura nella piastra a metà altezza e del fluido all'uscita vengono monitorate in maniera continua. Assumendo un set di parametri del collettore, i risultati teorici vengono confrontati con quelli sperimentali. La procedura viene iterata finché si raggiunge il migliore accordo con i risultati sperimentali. Con questo metodo non ci sono restrizioni riguardo i valori assunti dai parametri; ne segue che sono necessarie un notevole numero di iterazioni. Non c'è garanzia che i valori introdotti dei parametri siano corretti: combinazioni diverse dei parametri di prova possono portare agli stessi risultati e quindi il metodo non è affidabile. Comunque i risultati degli autori mostrano un accordo ragionevole con le temperature di piastra mentre invece le temperature di uscita differiscono sostanzialmente dai risultati sperimentali. Occorre anche tener presente che è richiesta un'elevata accuratezza nella misura della rampa di temperatura.

Kamminga (1985a) ha sviluppato un modello a 4 nodi (copertura, piastra, fluido e isolante) per descrivere il comportamento in transitorio dei collettori solari piani. Mediante il modello e la comparazione con i dati sperimentali, si è ottenuta una soluzione approssimata per la temperatura del fluido all'interno del collettore. In un lavoro più recente (Kamminga 1985b) il modello è stato semplificato considerando 3 nodi (copertura, piastra e fluido) e le equazioni differenziali del modello sono state risolte utilizzando la trasformata di Fourier. Utilizzando una serie di misure sperimentali i parametri del collettore possono essere determinati con il metodo dei minimi quadrati. Secondo l'autore il metodo porta ad errori rilevanti se le variabili di Fourier non vengono scelte in maniera appropriata. Infine, i risultati relativi a differenti prove mostrano un'elevata dispersione rendendo instabile e non ripetibile il metodo.

3.2.3 METODI “MULTI-TEST”

Saunier e Chungpaibulpatana (1983) e Saunier et al. (1985) hanno proposto un metodo con il quale il collettore, connesso ad una unità ausiliaria, è testato nelle condizioni di potenza utile estratta nulla. Essi hanno assunto un'espressione quadratica per la perdite del collettore. Il metodo richiede test della durata di una giornata durante i quali il collettore è esposto al sole e test della durata di una notte durante i quali il collettore è esposto a una serie di cicli di riscaldamento e di raffreddamento. Entrambe le prove sono condotte all'aperto. I parametri di resa termica del collettore sono determinati utilizzando la tecnica della regressione multilineare applicata ai dati sperimentali.

Il metodo richiede (i) un test addizionale per determinare i parametri dell'unità ausiliaria e (ii) un lungo test notturno per stimare la capacità termica e i coefficienti di perdita. Inoltre secondo gli autori c'è una significativa dispersione nei valori dei parametri del collettore ottenuto da prove differenti dovuto al fatto di non considerare gli effetti del secondo ordine nella determinazione della capacità termica (Saunier e Chungpaibulpatana, 1983). Chungpaibulpatana e Exell (1988, 1990) hanno modificato il metodo esposto eliminando il test notturno. Mentre la base teorica rimane la stessa, la procedura sperimentale è stata cambiata in vista della determinazione individuale dei parametri. In aggiunta al test giornaliero di Saunier sono stati introdotti 2 test addizionali con il collettore coperto e un processo di riscaldamento di breve durata ha rimpiazzato i lunghi processi di riscaldamento precedenti. Tuttavia a tutt'oggi non è stata riportata in letteratura una verifica sperimentale del metodo. D'altra parte in questo metodo sono contemplati un numero elevato di test ed un'analisi accurata dei dati per stimare con approssimazioni successive i parametri del collettore.

3.2.4 METODI BASATI SULLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

Rogers (1981) ha introdotto un metodo basato sulla risposta dinamica del collettore alle condizioni climatiche di funzionamento. Il metodo rende possibile l'ottenimento dei parametri caratteristici dello stato stazionario da un'analisi dei dati sperimentali. Il metodo è stato adottato dalla British Standard Institution come standard per le prove in transitorio [British Standard 6757 (British Standard 1986)]. Il modello assume che la potenza utile fornita dal collettore in un arbitrario intervallo di tempo è l'effetto cumulativo delle frazioni di energia assorbita durante questo intervallo e quello di alcuni intervalli precedenti. Il metodo utilizza una funzione di risposta all'impulso per applicare un fattore

peso alla radiazione solare incidente sul collettore. Emery e Rogers (1984) hanno implementato questo metodo nel test di 3 differenti collettori ed hanno ottenuto valori leggermente differenti, più bassi rispetto a quelli ottenuti con metodi in stato stazionario.

Il metodo utilizza un approccio sperimentale simile a quello dello standard ASHRAE 93-86 e quindi è più semplice degli altri metodi. Tuttavia presenta i seguenti svantaggi

- a) Richiede di maneggiare un numero elevato di dati;
- b) Conseguentemente l'ammontare del tempo di calcolo è elevato;
- c) La funzione di trasferimento del collettore è ottenuta indirettamente come quella funzione che meglio fitta i dati sperimentali;
- d) Il metodo per ora non è stato provato in maniera estesa;

Wang et al. (1987) hanno proposto una procedura in stato transitorio chiamata "filter method". Il modello parte da un'equazione differenziale del secondo ordine la cui incognita è la potenza utile assorbita dal collettore. La funzione di trasferimento del collettore è ottenuta da un test separato con il collettore coperto. A partire da tale funzione si costruisce un filtro digitale per processare e analizzare i dati. Benché il metodo incorpori una procedura sperimentale semplice esso richiede tuttavia familiarità con l'analisi e il filtraggio digitale dei segnali.

3.2.5 METODI NON VALIDATI

Frid (1990) ha proposto un modello a 2 o 3 nodi per i test in transitorio. La soluzione esatta dei modelli è stata ottenuta analiticamente in modo da esprimere la potenza termica utile fornita dal collettore in funzione dei suoi parametri ed altre funzioni di trasferimento. Sono stati suggeriti metodi di regressione per la stima dei parametri.

Saranno ora passati in rassegna in modo più dettagliato i seguenti metodi:

1. *Metodo di Rogers;*
2. *Metodo di Saunier;*
3. *Metodo di Exell;*
4. *Metodo di Perers;*
5. *Metodo di Wijesundera;*
6. *Metodo DSC (Dynamic Solar Collector);*
7. *Metodo QDT (Quick Dynamic Testing);*
8. *Metodo NDM (New Dynamic Method).*

Oltre a questi metodi, particolare attenzione è stata rivolta al “*filter method*” per il quale si rimanda al capitolo 4. Le prove sono effettuate utilizzando l’apparato sperimentale della figura 3.1.

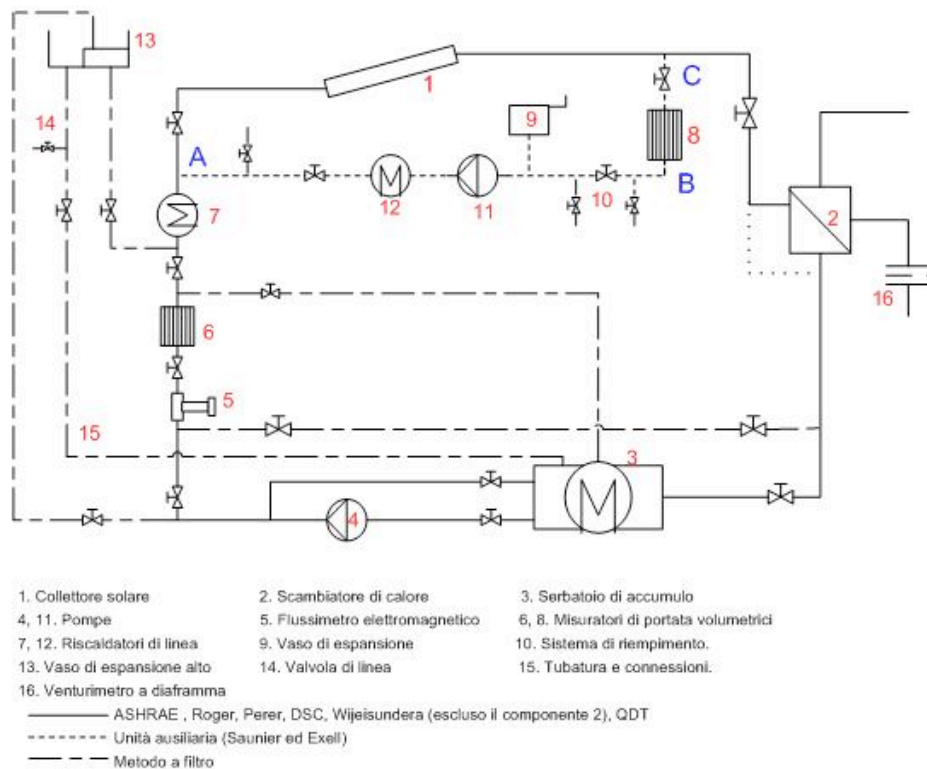


Fig. 3.1 – Schema del circuito di prova

3.3 IL METODO DI ROGERS

Il modello assume che la potenza utile assorbita dal collettore in un determinato intervallo (j) è data dalla somma delle frazioni K_N di potenza assorbita durante l’intervallo (j) e durante un numero di intervalli precedenti N . E’ sufficiente un numero finito N di intervalli temporali (Δt) per ottenere un valore significativo della potenza di output. I valori delle frazioni K_1, K_2, \dots, K_N sono assunti costanti per un dato collettore e definiscono la “funzione risposta” che caratterizza il comportamento dinamico del collettore. Siccome K_n viene posto pari a zero per $n > N$, deve essere verificata la relazione:

$$\sum_{n=1}^N K_N = 1 \quad (3.4)$$

Posto $\eta_0 = F'(\tau\alpha)$ (zero-loss collector efficiency), $U = F' U_c$ e $\Delta T = (T_i - T_a)$, la potenza utile specifica (per unità di area) fornita dal collettore viene espressa come:

$$q_u(j) = \sum_{n=1}^N K_n F'' [\eta_0 G_{c,n}(j) - U \Delta T_n(j)] \quad (3.5)$$

Poiché nel modello viene assunto che la temperatura d'ingresso del fluido T_{fi} sia costante e che la temperatura dell'aria ambiente T_a vari lentamente, si può adottare la seguente approssimazione:

$$\sum_{n=1}^N K_n F'' U \Delta T_n(j) = F'' U \Delta \bar{T}(j) \quad (3.6)$$

dove:

$$\Delta \bar{T}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta T_n(j) \quad (3.7)$$

Utilizzando l'eq. (3.6), l'eq. (3.4) può essere scritta come:

$$q_u(j) = F'' \eta_0 \sum_{n=1}^N [K_n G_{c,n}(j)] - F'' U \Delta \bar{T}(j) \quad (3.8)$$

Questa è un'equazione lineare che contiene $N+1$ parametri da determinare quali $F'' \eta_0 K_1, F'' \eta_0 K_2, \dots, F'' \eta_0 K_N, F'' U$. Questi parametri sono stimati mediante una regressione multilineare dei dati sperimentali.

Nella procedura il periodo di campionamento (Δt) deve essere scelto come il più piccolo multiplo di 30 secondi e, comunque, non inferiore ad $1/5$ del tempo di transito del fluido nel collettore ($\Delta t \geq M/5\dot{m}$). Infatti, indicando con M la massa di fluido contenuta nel collettore e con \dot{m} la portata, il tempo di transito risulta pari a M/\dot{m} . Dovendo inoltre essere $N\Delta t \geq M/\dot{m}$, segue che $N \geq 5$. I dati istantanei possono essere rilevati con continuità

e poi mediati in un intervallo temporale di 30 o 60 secondi. Ogni sequenza di dati deve essere costituita da almeno sessanta punti mediati. Sono necessarie quattro sequenze ognuna delle quali riferita ad un fissato valore di temperatura di ingresso del fluido; le temperature devono essere uniformemente distribuite tra la temperatura ambiente e la massima temperatura ammissibile dal collettore.

Per valutare i parametri del collettore si assumono successivi valori di tentativo per N a partire dal valore $N=5$. Per ogni valore di N vengono predisposte quattro sequenze di dati (una per ogni valore di temperatura di ingresso T_{fi}) costituite dai valori medi di $q_u(j), G_{c,1}(j), G_{c,2}(j), \dots, G_{c,N}(j), \Delta T(j)$ ($j=1, \dots, J$) con $J \geq 60$.

La regressione multilineare delle quattro sequenze di dati ottenuta mediante l'eq. (3.8) fornisce, come già detto, la stima delle $N+1$ incognite $F''\eta_0 K_1, F''\eta_0 K_2, \dots, F''\eta_0 K_N, F''U$ e dei relativi errori standard. Il valore ottimo di N è scelto in modo da minimizzare l'errore standard del parametro $F''U$ (Emery e Rogers, 1984).

Tenendo conto della (3.4) è possibile scrivere:

$$F''\eta_0 = \sum_{n=1}^N F''\eta_0 K_n \quad (3.9)$$

Manipolando l'eq. (1.21) del capitolo 1, il fattore di flusso del collettore F'' può essere anche espresso come:

$$F'' = - \frac{\frac{F'' U}{G' c_p}}{\ln \left(1 - \frac{F'' U}{G' c_p} \right)} \quad (3.10)$$

Essendo noto $F''U$, si determina F'' dalla (3.10), η_0 dalla (3.9) e, quindi, U e tutti i coefficienti K_1, K_2, \dots, K_N .

I valori di efficienza del collettore ai diversi intervalli temporali j vengono determinati con la relazione:

$$\eta(j) = \frac{q_u(j)}{F'' \sum_{n=1}^N K_n G_{c,n}(j)} \quad (3.11)$$

e graficati in funzione del parametro:

$$T^*(j) = \frac{\Delta \bar{T}(j)}{\sum_{n=1}^N K_n G_{c,n}(j)} \quad (3.12)$$

In accordo con l'eq. (3.8), il test viene ritenuto accettabile se i punti sperimentali si addensano molto (a meno di piccoli errori) sulla retta di equazione:

$$\eta(j) = \eta_0 - U T^*(j) \quad (3.13)$$

3.4 IL METODO DI SAUNIER

Il collettore è collegato ad un'unità ausiliaria costituita da un condotto ben isolato corredato da una pompa, un vaso di espansione ed un riscaldatore elettrico. Come mostra la fig. 3.1, il circuito dei collettori può essere anche scollegato (in by-pass) dall'unità ausiliaria. Quando il collettore è connesso all'unità ausiliaria, il fluido viene fatto circolare attraverso il sistema con portata elevata in modo che l'incremento di temperatura che esso subisce nell'attraversare il collettore sia molto piccolo (massimo 1°C). In tali condizioni il collettore funziona con potenza utile estratta piccola e sia il fluido che la piastra assorbente sono considerati alla stessa temperatura. Sotto tali ipotesi, gli autori, per il collettore e l'unità ausiliaria, hanno assunto il seguente modello ad un nodo:

$$\begin{aligned} (M_a + M_e) c_p \frac{dT_{fm}}{dt} = & (P_p + \delta P_e) + \eta_0 A_c G_c - (U_1 + U_a)(T_{fm} - T_a) + \\ & - U_2 A_c (T_{fm} - T_a)^2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Secondo tale modello, la caratterizzazione del collettore avviene mediante i parametri M_e (massa effettiva), $\eta_0 = F'(\tau\alpha)$ (zero-loss efficiency), U_1 (coefficiente di perdita del primo

ordine) e U_2 (coefficiente di perdita del secondo ordine). Il termine M_a ed U_a , rispettivamente massa effettiva e coefficiente di perdita (normalizzato rispetto all'area del collettore A_c), si riferiscono all'unità ausiliaria e sono determinati con una prova separata chiamata auxiliary unit test (Saunier et al. 1985). P_p e P_e rappresentano rispettivamente la potenza della pompa e la potenza elettrica del riscaldatore che può essere acceso ($\delta=1$) o spento ($\delta=0$).

Il test si effettua seguendo nell'ordine le tre procedure di seguito riportate:

1. Auxiliary unit test;
2. Night-time test;
3. Day-time test.

Auxiliary unit test

L'unità ausiliaria, connessa in by-pass in modo da escludere il collettore, viene sottoposta a due cicli di riscaldamento e due cicli di raffreddamento della durata di un'ora cadauno.

Durante il processo di riscaldamento, la potenza elettrica viene mantenuta costante con valori compresi tra 200 e 700 W.

Successivamente, mediante regressione multilineare dei dati sperimentali, utilizzando l'eq. (3.14), si giunge al calcolo dei parametri M_a ed U_a dell'unità ausiliaria.

Night-time test

La prova di notte è condotta su tutto il sistema (Collettore + unità ausiliaria); viene eseguita una serie di riscaldamenti e raffreddamenti della durata di circa 90 minuti con potenze elettriche costanti comprese tra 600 e 1200 W. Ogni periodo di riscaldamento è seguito da un raffreddamento durante il quale la temperatura del collettore deve scendere a valori prossimi della temperatura ambiente.

Utilizzando i valori di M_a ed U_a ricavati dal test relativo all'unità ausiliaria, mediante l'eq. (3.14) nella quale viene posto $G_c=0$, si ottengono i parametri M_e , U_1 , U_2 tramite regressione dei dati sperimentali.

Day-time test

Il collettore, collegato all'unità ausiliaria, viene esposto alle condizioni ambientali reali, e viene testato utilizzando portate molto elevate in modo da poter trascurare la potenza utile

estratta ($q_u \approx 0$). Utilizzando i dati sperimentali raccolti durante questo test, i valori di M_a ed U_a ricavati nel test dell'unità ausiliaria, ed i valori di M_e , U_1 , U_2 ricavati nel test notturno, sempre mediante l'eq. (3.14), si perviene al calcolo di η_0 (procedura A). Se invece dei dati relativi al test notturno si utilizza solo M_e , dall'analisi dei dati sperimentali si ricava η_0 , U_1 , U_2 (procedura B). La Fig. 3.2 riporta in modo sintetico la sequenza dei test e dei calcoli.

I dati di radiazione solare, temperature del fluido, temperatura ambiente, potenza elettrica del riscaldatore, etc., sono registrati ogni minuto. La prova diurna viene di solito eseguita tra le 10:00 e le 14:00, anche in giornata moderatamente nuvolosa. Il test richiede una notte e due giorni al massimo.

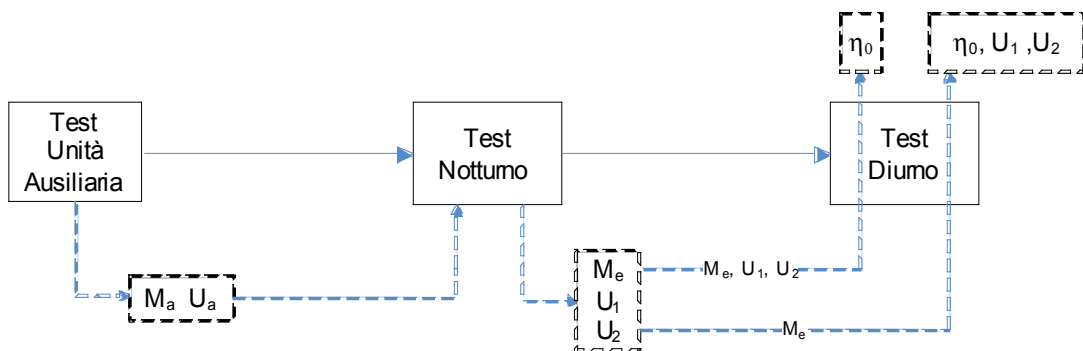


Fig. 3.2 – Sequenza delle prove e dei calcoli nel metodo di Saunier

3.5 IL METODO EXELL

S. Chungpaibulpatana e R.H.B. Exell tra il 1988 e il 1990, sulla base del modello di Saunier, hanno proposto un loro metodo per l'analisi in transitorio delle prestazioni dei collettori solari termici a piastra piana, detto appunto *metodo Exell*.

Il metodo Exell, estremamente complesso e laborioso, sostituisce il test notturno del metodo di Saunier (night-time test) con due test di riscaldamento aggiuntivi da effettuare con collettore schermato dalla radiazione solare (short-term and long-term heating under shaded conditions); in più tiene conto dell'effetto del vento sul collettore. La stima di ogni

parametro, mediante i dati sperimentali, richiede a monte il calcolo di una capacità termica del sistema ad hoc.

Il modello di equazione è lo stesso di Saunier, ma espresso in forma integrale:

$$H_T [T_{fm}(t_2) - T_{fm}(t_1)] = \int_{t_1}^{t_2} [P_p + \delta P_e + \eta_0 A_c G_c(t)] dt - (U_1 A_c + U_a) \int_{t_1}^{t_2} (T_{fm} - T_a) - U_2 A_c \int_{t_1}^{t_2} (T_{fm} - T_a)^2 \quad (3.15a)$$

dove $H_T = H_e + H_a$ è la capacità termica di tutto il sistema (collettore più unità ausiliaria) ed U_1 e U_2 sono i coefficienti di perdita di primo e secondo ordine del collettore. L'eq. (3.15a) può essere scritta anche nella forma:

$$H_T [T_{fm}(t_2) - T_{fm}(t_1)] = \int_{t_1}^{t_2} [P_p + \delta P_e + \eta_0 A_c G_c(t)] dt - U_{1T} \int_{t_1}^{t_2} (T_{fm} - T_a) - U_{2T} \int_{t_1}^{t_2} (T_{fm} - T_a)^2 \quad (3.15b)$$

con $U_{1T} = U_1 A_c + U_a$ e $U_{2T} = U_2 A_c$.

Il circuito di prova è simile a quello della procedura di Saunier, ma in più è dotato di un generatore artificiale di vento e di sistema di schermatura solare di agevole manovrabilità. Il test si esegue in condizioni di potenza estratta nulla ($q_u \approx 0$) facendo circolare il fluido con portate elevate. Il collettore è caratterizzato da η_0 , U_1 e U_2 da determinare mediante l'analisi di regressione lineare multipla eseguendo più prove al variare della velocità del vento. Il test complessivamente richiede quattro prove, da eseguire nel seguente ordine: test dell'unità ausiliaria, test con brevi riscaldamenti, test con lunghi riscaldamenti, test diurno. Tutte le prove, tranne quelle per l'unità ausiliaria, vanno ripetute per diverse velocità del vento (v); normalmente si adottano tre valori di v compresi tra 0 e 4 m/s.

Le sequenze dei test e dei calcoli da eseguire sono schematizzati nella Fig. 3.3

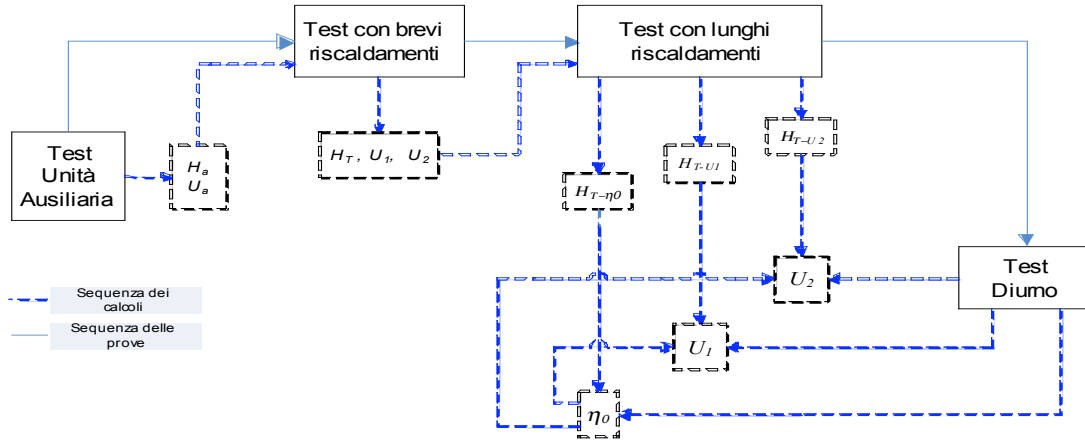


Fig.3.3 - Sequenza dei calcoli e dei test.

Auxiliary unit test

L'unità ausiliaria, collegata in by-pass, subisce una sequenza di brevi riscaldamenti seguiti da altrettanti raffreddamenti naturali, rispettivamente della durata di 2-3 minuti e di 5-7 minuti; la potenza elettrica del riscaldatore è costante ed è compresa fra 500 W e 1200 W.

Il test inizia quando la temperatura media del fluido è prossima a quella ambiente e termina quando essa vale circa 90-95 °C.

Per questo tipo di test, essendo escluso il collettore solare, l'eq. (3.15a/b), scritta in forma differenziale, diventa:

$$H_a \left(\frac{dT_{fm}}{dt} \right) = P_p + \delta P_e - U_a (T_{fm} - T_a) \tag{3.16}$$

Considerando ben isolato il circuito dell'unità ausiliaria in modo da poter trascurare, in questa fase, le sue perdite ($U_a \approx 0$), e trascurando la potenza della pompa, l'eq. (3.16) scritta alle differenze finite, diventa:

$$H_a (T_H - T_L) = P_e (\Delta t) \tag{3.17}$$

dove T_L e T_H rappresentano le temperature di estrapolazione delle curve di raffreddamento naturale valutate nel punto medio dell'intervallo di riscaldamento (vedi Fig. 3.5).

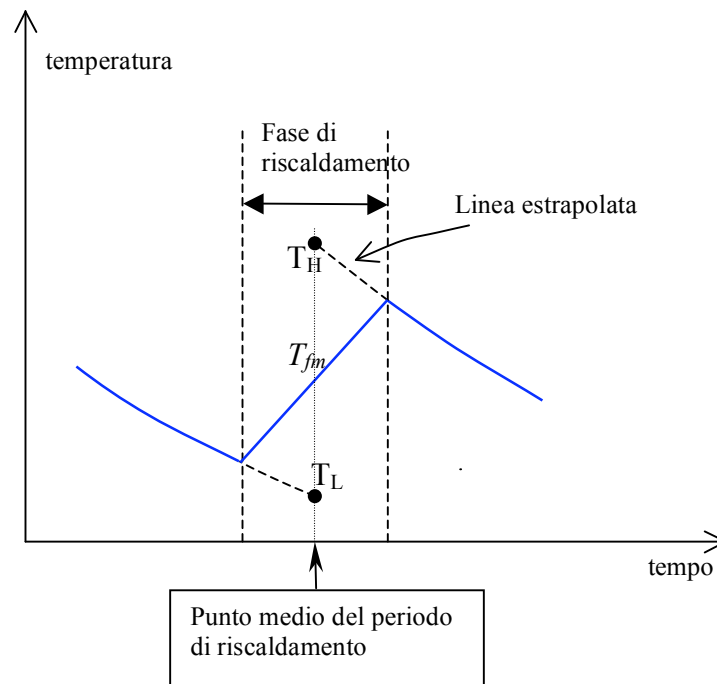


Fig. 3.5 – Procedura grafica per la stima di T_H e T_L .

Per determinare analiticamente T_H e T_L si può ipotizzare che il fluido, durante la fase di raffreddamento, segua una legge di tipo “zero-dimensionale”; si può scrivere pertanto:

$$\theta_m(t) = \theta_m(t_0) e^{-K_a(t-t_0)} \quad (3.18)$$

dove: $\theta_m(t) = [T_{fm}(t) - T_a]$, $\theta_m(t_0) = [T_{fm}(t_0) - T_a]$ e $K_a = \frac{U_a}{H_a}$

L'equazione (3.18), in forma logaritmica, può essere scritta come:

$$\ln[\theta_m(t)] = C - K_a(t - t_0) \quad (3.19)$$

Utilizzando i dati sperimentali di T_{fm} e T_a ottenuti durante le fasi di raffreddamento del fluido, si trovano i termini C e K_a dell'eq. (3.19) mediante regressione lineare. Dall'eq. (3.19) segue:

$$T_{fm}(t_m) = T_a(t_m) e^{C - K_a(t_m - t_0)} \quad (3.20)$$

Questa equazione viene utilizzata per calcolare le temperature T_H e T_L ; si ha infatti $T_L = T_{fm}(t_m)$ se si considera il periodo pre-riscaldamento, e $T_H = T_{fm}(t_m)$ se si considera il periodo post-riscaldamento.

Dalla conoscenza di T_H e T_L , mediante l'eq. (3.17), si calcola H_a ; può essere determinato un valore di H_a in corrispondenza di ogni intervallo di riscaldamento; il valore effettivo da utilizzarsi risulta dunque pari al valor medio di tali valori.

Utilizzando i valori di K_a ottenuti mediante l'eq. (3.19) durante ogni fase di raffreddamento, si ottengono tanti valori di U_a mediante la relazione $U_a = K_a H_a$; mediando infine tutti questi valori, si ottiene il coefficiente di perdita effettivo dell'unità ausiliaria (vedi Fig. 3.6 per i dettagli).

Short-term heating under shaded conditions

Il collettore, collegato all'unità ausiliaria, viene schermato dalla radiazione solare. L'intero sistema (collettore + unità ausiliaria) viene sottoposto a dei cicli di riscaldamenti alternati ad altrettanti raffreddamenti con potenze elettriche costanti comprese tra 1 e 2,2 kW; il test viene ripetuto per almeno tre valori della velocità del vento utilizzando, per ognuno di essi, quattro livelli di potenza. I riscaldamenti durano 5 minuti mentre i raffreddamenti da 5 a 7 minuti in modo da indurre una diminuzione della temperatura del fluido di 3-5 °C. Mediante analisi di regressione dei dati sperimentali acquisiti, utilizzando l'eq. (3.15b), si determina la capacità termica del sistema H_T e valori approssimati dei coefficienti di perdita U_{1T} e U_{2T} (anche di U_1 e U_2 essendo noto U_a). La Fig. 3.7 riporta in modo dettagliato la sequenza dei calcoli.

Long-term heating under shaded conditions

Il sistema viene sottoposto a dei cicli di riscaldamento e raffreddamento naturale della durata di un'ora seguendo la stessa metodologia del night-time test del metodo di Saunier. Questa procedura viene ripetuta per diversi valori della velocità del vento

Calcolo di $H_{T-\eta_0}$.

Utilizzando i valori U'_{1T} e U'_{2T} , trovati mediante il test precedente (vengono contrassegnati con l'apice per indicare che non sono valori definitivi) ed utilizzando l'eq. (3.15b) nella quale, ovviamente, viene posto $G_c=0$, per ogni periodo di riscaldamento si trovano diversi valori di H_T in funzione dell'intervallo d'integrazione utilizzato. Esso può essere scelto arbitrariamente fra 5, 10 e 15 minuti con step temporale di 1 minuto.

Riportando su un grafico, in funzione del parametro $X_p = \int (T_{fm} - T_a) dt / \int P_e dt$, i valori di H_T determinati ed interpolando mediante una retta la sola parte approssimativamente lineare del grafico, si determina $H_{T-\eta_0}$ dall'intersezione della retta con l'asse delle ordinate, avendo posto: $H_T = H_{T-\eta_0} + H_0 X_p$. Si determinano i valori di $H_{T-\eta_0}$ dagli altri periodi di riscaldamento ed al variare della velocità del vento, e mediando si ottiene il valore effettivo di $H_{T-\eta_0}$.

Calcolo di H_{T-U_1} .

I valori di H_T determinati per il calcolo di $H_{T-\eta_0}$ vengono riportati in un grafico in funzione del tempo t_m (tempo, in minuti, nel punto medio dell'intervallo d'integrazione a partire dall'istante in cui inizia il riscaldamento; se, ad esempio, l'intervallo d'integrazione è pari a 10', i valori di H_T vanno riportati agli istanti temporali: 5', 15', 25', 35', etc). Anche in questo caso il grafico presenta una parte approssimativamente lineare (di solito per t_m compreso tra 10' e 30'). Interpolando con una retta i punti compresi in tale zona, si ottiene il valore di H_{T-U_1} in funzione di t_m . Tale procedura viene ripetuta per diversi valori della potenza elettrica del riscaldatore e per diversi valori della velocità del vento, ottenendo $H_{T-U_1} = f(t_m, P_e, v)$.

Calcolo di H_{T-U_2} .

Utilizzando i dati sperimentali relativi ad ogni riscaldamento ed i valori di U'_{1T} e U'_{2T} calcolati in precedenza, la capacità termica H_{T-U_2} si determina sempre mediante l'equazione integrale (3.15b), ma utilizzando come estremi di integrazione degli istanti temporali ben definiti. Il valore t_1 coincide con l'istante temporale in cui la resistenza termica tra piastra e fluido diviene trascurabile (limite inferiore del range di variazione di t_m nel calcolo di H_{T-U_1}); t_2 coincide invece con la fine del periodo di riscaldamento (ad esempio 60'). Ripetendo il calcolo per diversi valori della potenza elettrica del riscaldatore e per diversi valori della velocità del vento, si ottiene $H_{T-U_2} = f(P_e, v)$. La Fig. 3.7 illustra in modo dettagliato l'intera procedura.

Day-time test

Il test di giorno si esegue con il collettore esposto alla radiazione solare per circa un'ora; poi si pone uno schermo sul collettore finché la temperatura media del fluido scende a valori prossimi alla temperatura ambiente, comunque per non più di un'ora.

Calcolo di η_0

L'equazione (3.15b), trascurando la potenza della pompa P_p , può essere posta nella seguente forma:

$$\eta_s = \eta_0 - U_{1T}^* X \quad (3.21)$$

dove:

$$\eta_s = \bar{H}_{T-\eta_0} \frac{[T_{fm}(t + \Delta t) - T_{fm}(t)]}{\int_t^{t+\Delta t} G_c A_c dt} \quad (3.22)$$

$$X = \int_t^{t+\Delta t} \frac{[T_{fm}(t) - T_a(t)]}{G_c A_c} dt \quad (3.23)$$

Le integrazioni sono effettuate con passo temporale di 1 minuto e la durata di ogni periodo di integrazione è pari quella utilizzata nel calcolo di $H_{T-\eta_0}$ (ad esempio 10').

E' necessario tener conto delle seguenti considerazioni:

- Non possono essere utilizzati valori di X superiori a X_p (parametro utilizzato nel calcolo di $H_{T-\eta_0}$), in modo da mantenere la dipendenza lineare tra η_s e X .
- I punti (η_s, X) , all'inizio della fase di riscaldamento, devono essere scartati a causa della significativa resistenza termica tra fluido e piastra captante.
- Vanno scartati i punti (η_s, X) se, durante il periodo d'integrazione, il flusso solare varia di oltre 30 W/m^2 . E' inoltre opportuno che durante ogni periodo d'integrazione il flusso solare sia sempre o crescente o decrescente.

Riportando i valori di η_s in funzione di X ed interpolando linearmente, si ottiene il valore di η_0 dall'equazione (3.21). Valutando η_0 al variare dell'angolo d'incidenza, si può determinare la sua dipendenza da tale parametro.

Calcolo di U_1 .

Impiegando i valori di η_0 e H_{T-U_1} , precedentemente determinati, tramite l'eq. (3.15b) si calcolano i valori di U_{1Tp} (il pedice p sta per provvisorio), al variare del tempo t_m , per ogni riscaldamento (solare); il periodo d'integrazione deve essere lo stesso di quello adoperato per il calcolo di H_{T-U_1} .

Selezionando i valori di U_{1Tp} ottenuti al variare di t_m (si escludono i valori troppo lontani dalla media) ed effettuando la media, si ottiene il coefficiente totale di perdita del primo ordine U_{1T} . Ripetendo i calcoli per diverse velocità del vento, si ottiene la legge $U_{1T}=f(v)$. Determinato U_{1T} ed essendo noto U_a , si può determinare il coefficiente di perdita del primo ordine del collettore $U_1=f(v)$.

Calcolo di U_2 .

Utilizzando ancora l'equazione (3.15b) ed i valori noti di H_{T-U_2} , η_0 , U_{1T} , si può determinare U_{2T} per ogni periodo di riscaldamento (solare) impiegando lo stesso periodo d'integrazione utilizzato per il calcolo di H_{T-U_2} . Si effettua la media di tali valori, e ripetendo i calcoli per diverse velocità del vento, si ottiene la legge $U_{2T}=f(v)$; dividendo tali valori per l'area del collettore, si ottiene il coefficiente di perdita del secondo ordine del collettore $U_2=f(v)$. Si veda la Fig. 3.8 per i dettagli dell'intera procedura.

Procedura per determinare i parametri H_A ed U_A dell'Unità Ausiliaria

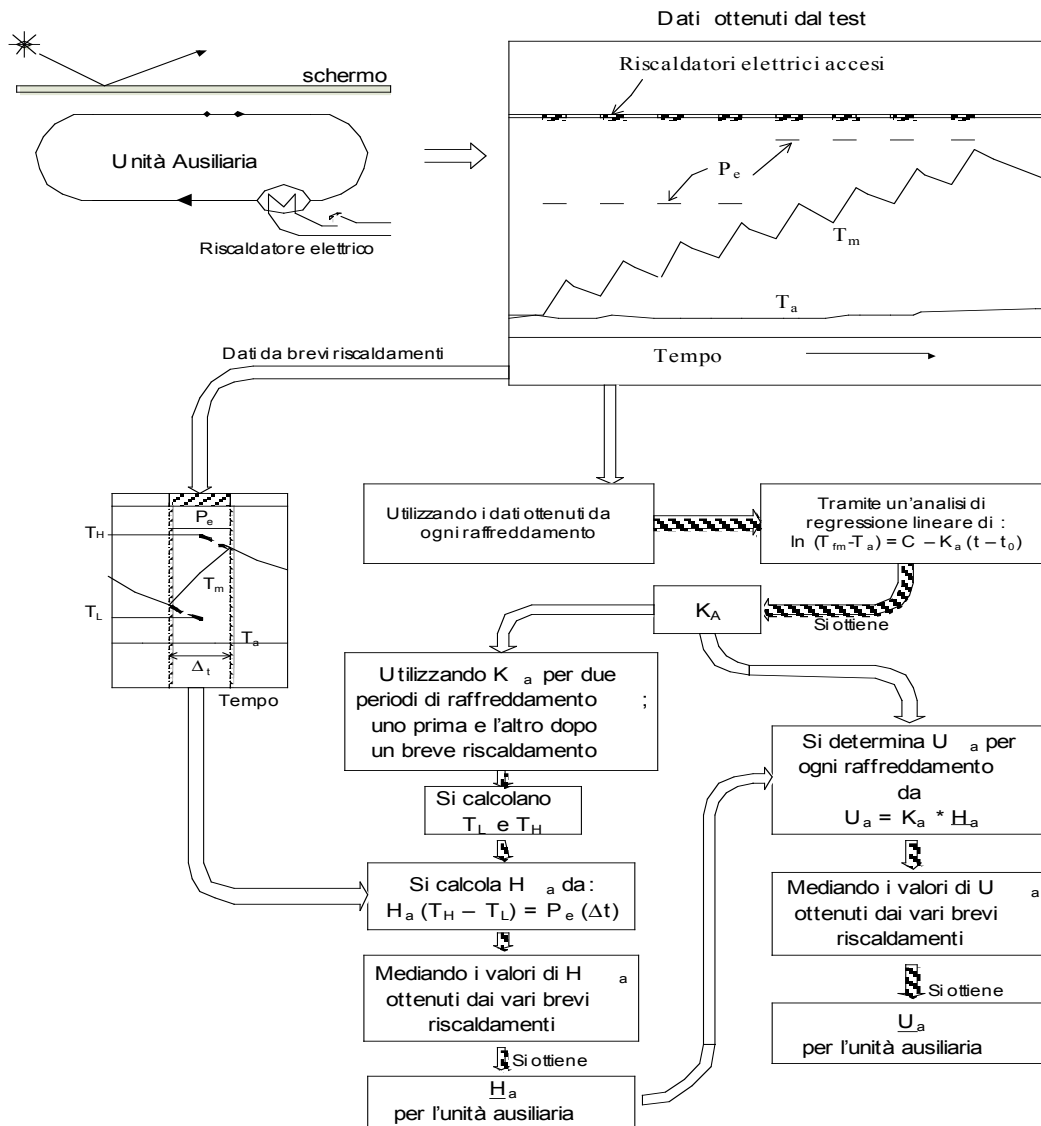


Fig. 3.6 – Auxiliary unit test

Procedura per determinare i coefficienti di perdita $U_{1T'}$ ed $U_{2T'}$ del sistema quando il collettore viene schermato

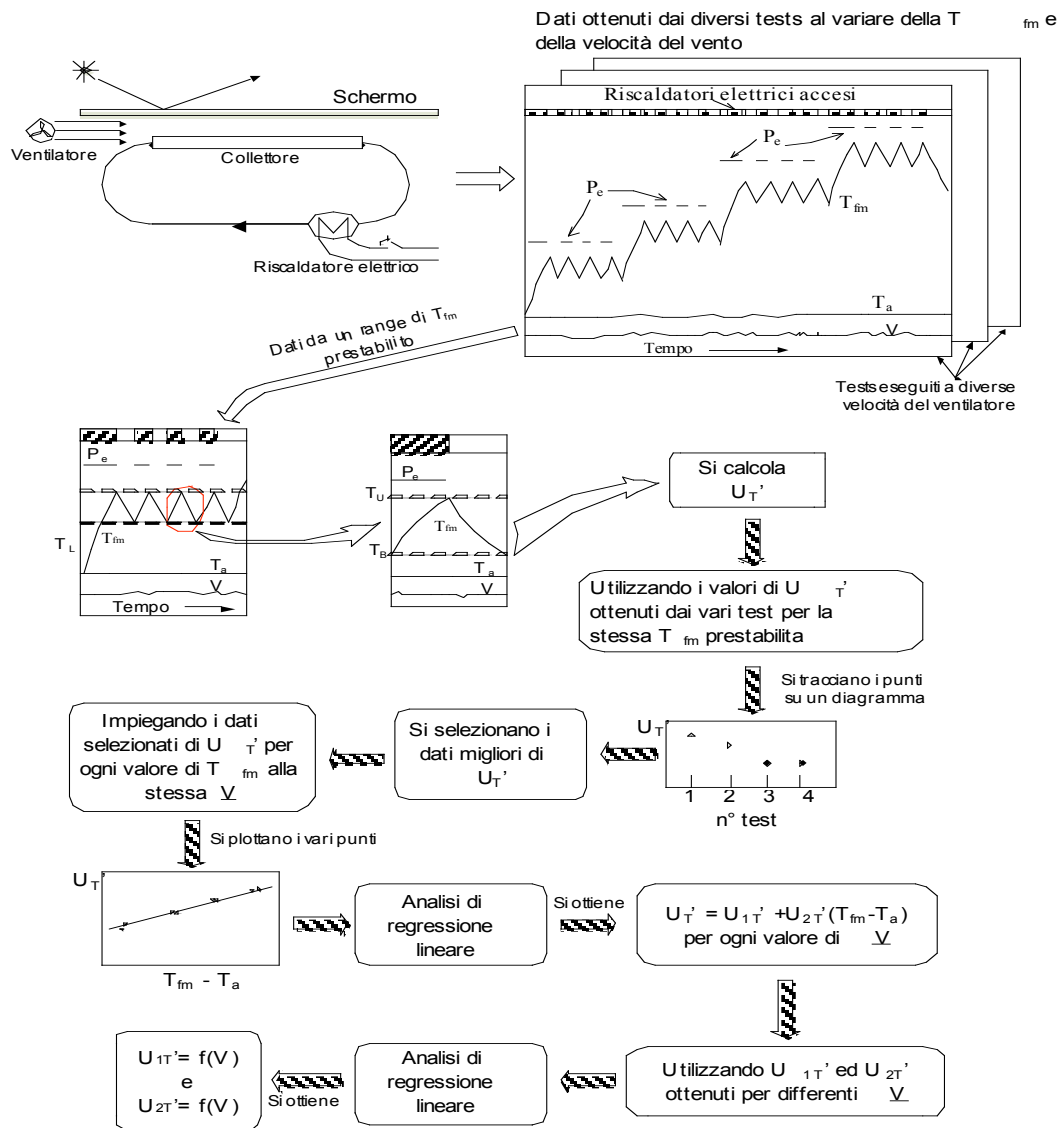


Fig. 3.7 – Short-term heating under shaded conditions

Procedura per determinare le capacità termiche effettive medie del sistema : $H_{T-\eta_0}$, H_{T-U1} , H_{T-U2} .

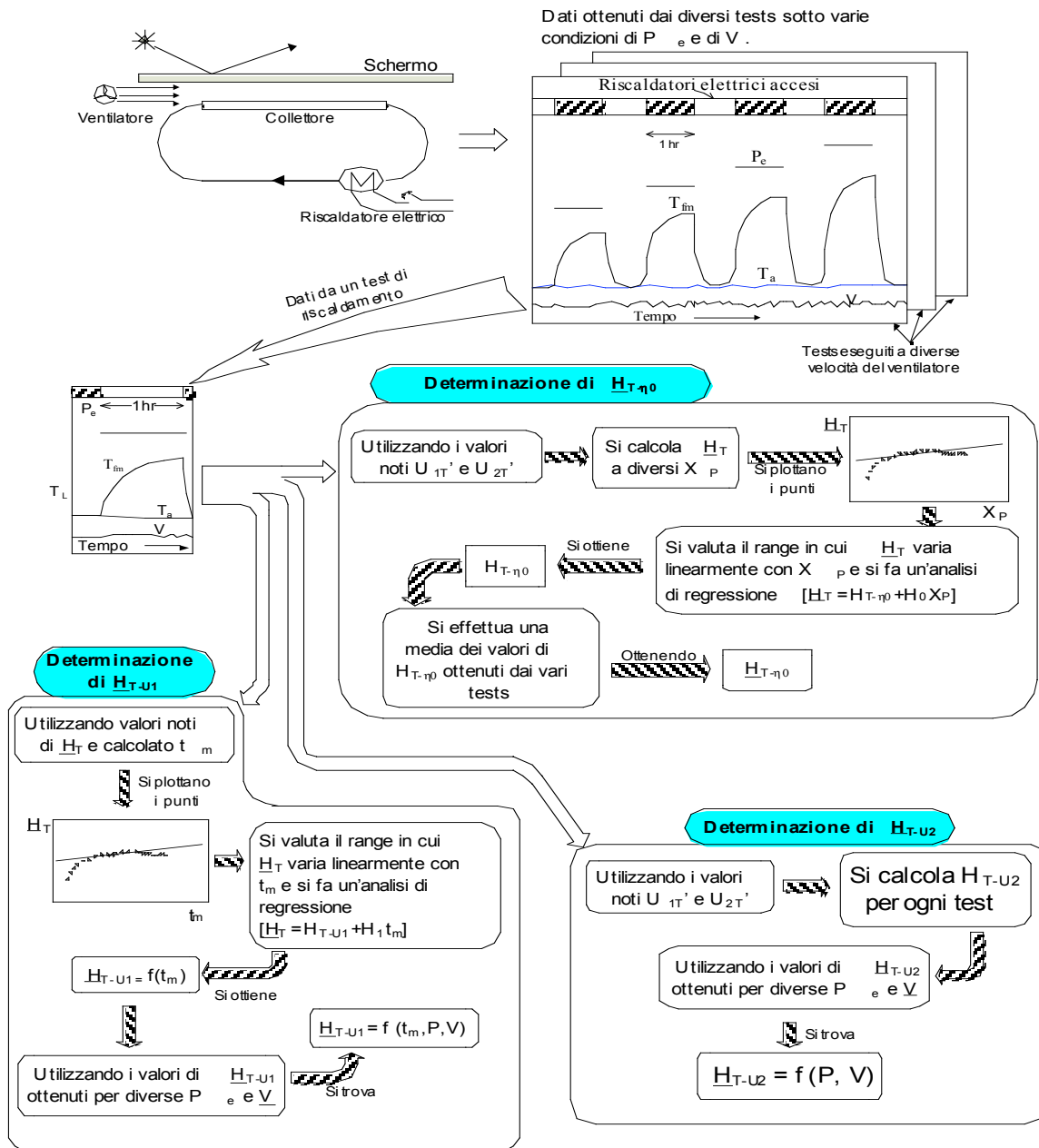


Fig. 3.8 – Long term heating under shaded conditions

Procedura per determinare i parametri del collettore : τ_{10} , U_{10} , U_{20} .

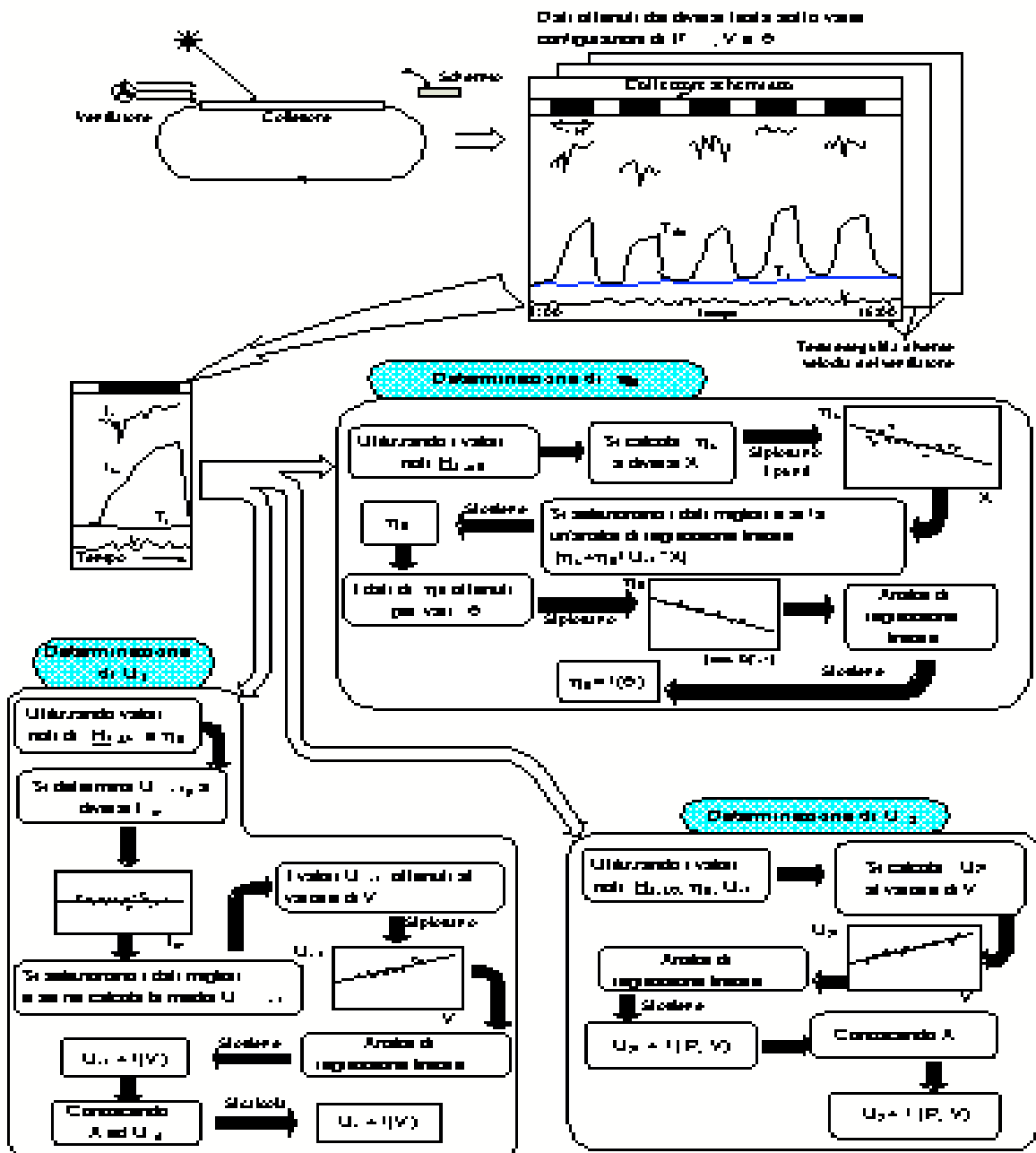


Fig. 3.9 – Day-time test

3.6 IL METODO DI PERERS

Si tratta di un metodo relativamente recente, proposto nel 1997 dallo svedese Bengt Perers del Solar Energy Research Center, ottenuto come combinazione di precedenti modelli già testati sperimentalmente. Tale modello è stato assorbito quasi integralmente dallo standard UNI-EN 12975-2 sia per il notevole contributo fornito da Perers sull'argomento ed anche per il fatto che Perers, nel periodo di stesura della norma, ha fatto parte del Task 26-Solar Combisystems nell'ambito del programma SHC (Solar Heating & Cooling Programme) dell'International Energy Agency.

Il modello completo, valido per collettori vetrati, non vetrati, a tubi evacuati ed a concentrazione, permette di calcolare la potenza utile specifica in uscita dal collettore mediante la relazione:

$$\begin{aligned}
 q_u = & F'(\tau\alpha)_n K_{\theta b}(\theta) G_b + F'(\tau\alpha)_n K_{\theta d} G_d - B_w w G - F'U_1(T_{fm} - T_a) \\
 & - F'U_2(T_{fm} - T_a)^2 - F'U_w(T_{fm} - T_a)w - F'U_{sky}(T_{fm} - T_{sky}) + \\
 & - (mc)_e(dT_{fm}/dt) - U_p(T_{fm} - T_a)
 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Nell'Eq. (3.24) w rappresenta la velocità del vento sul piano dei collettori ed U_p il coefficiente di perdita delle tubazioni per unità di area del collettore. Confrontando questa equazione con quella utilizzata nel metodo QDT si nota che nella (3.24) compare solo un termine aggiuntivo (l'ultimo) che rappresenta la perdita termica del circuito di prova; esistono inoltre le seguenti relazioni: $B_w=c_6$, $F'U_1=c_1$, $F'U_2=c_2$, $F'U_w=c_3u$, $F'U_{sky} = -c_4(E_L - \sigma\theta_a^4)/(T_{fm} - T_{sky})$, $(mc)_e=c_5$. Per i collettori vetrati possono essere trascurati il terzo, il sesto ed il settimo termine a secondo membro.

Se il metodo viene applicato a collettori a concentrazione provvisti di riflettori esterni, l'eq. (3.24), sopra riportata, va completata con due termini aggiuntivi per tenere conto della radiazione diretta e diffusa proveniente dal riflettore. Il contributo aggiuntivo $q_{u,r}$, in funzione del valore della riflettanza R , sarà:

$$q_{u,r}(R) = F'(\tau\alpha)_n K_{\theta b}(\theta_{b,r}) K_m G_{b,r} + F'(\tau\alpha)_e K_{\theta d}(\theta_{d,r}) G_{d,r} \quad (3.25)$$

Nell'eq. (3.25) $G_{b,r}$ e $G_{d,r}$ rappresentano rispettivamente la radiazione diretta e diffusa proveniente dal riflettore, $\theta_{b,r}$ e $\theta_{d,r}$ gli angoli di incidenza della radiazione diretta e diffusa

proveniente dal riflettore, e K_m è un fattore di correzione per la radiazione inviata dal riflettore per una lunghezza finita del riflettore.

L'identificazione parametrica del collettore viene effettuata mediante l'eq. (3.24) e lo strumento matematico della regressione lineare multipla (MLR). Possono essere utilizzati dati sperimentali rilevati nell'arco delle 24 ore, con circolatore sempre acceso, senza limitazioni sul flusso solare, sulla temperatura esterna, sulla portata e sulla velocità del vento. Durante le prove è necessario controllare solo la temperatura di ingresso del fluido in modo da mantenerla quasi costante (± 1 °C). Per quanto riguarda la temperatura d'ingresso, Perers suggerisce di effettuare delle prove con cinque diversi valori scelti in modo che la differenza di temperatura $\Delta T = (T_{fi} - T_a)$ sia compresa rispettivamente tra 0 e 3°C, 3 e 20°C, tra 20 e 40°C, tra 40 e 60°C e tra 60 e 80°C.

3.7 IL METODO DI WIJEYSUNDERA

Il metodo si propone di giungere ad una stima dei valori medi giornalieri di $F_R(\tau\alpha)$ e di $F_R U_c$, partendo da un'equazione di bilancio energetico che tenga conto essenzialmente dei flussi energetici che riguardano il serbatoio di accumulo. Viene trascurato l'effetto della capacità termica del collettore rispetto a quella del serbatoio ed i parametri principali diventano la capacità termica e la temperatura del serbatoio di accumulo. E' inoltre fondamentale, durante le prove, mantenere l'acqua del serbatoio in una condizione di costante miscelazione (in modo da eliminare gli effetti di stratificazione) e non effettuare spillamenti di acqua calda. Viene trascurato l'input energetico delle pompe di circolazione ed i tubi costituenti il circuito primario, agli effetti dello scambio termico, vengono considerati come scambiatori di calore che disperdono energia verso l'ambiente esterno.

Il metodo prevede la scrittura di tre equazioni di bilancio termico: per l'intero sistema, per il collettore e per il circuito che collega il serbatoio al collettore (circuito di ingresso). Tali equazioni sono:

$$C_s \frac{dT_s}{dt} = A_c [F_R(\tau\alpha)G_c(t) - F_R U_c (T_{fi} - T_a)] - A_s U_s (T_s - T_a) + \\ - A_i U_i \epsilon_i (T_s - T_a) - A_u U_u \epsilon_u (T_{fu} - T_a) \quad (3.26)$$

$$\dot{m} c_p (T_{fu} - T_{fi}) = A_c [F_R(\tau\alpha)G_c(t) - F_R U_c (T_{fi} - T_a)] \quad (3.27)$$

$$\dot{m} c_p (T_s - T_{fi}) = A_i U_i \varepsilon_i (T_s - T_a) \quad (3.28)$$

I simboli presenti nella (3.26), ancora non descritti, hanno il seguente significato:

C_s capacità termica del serbatoio;

A_s area del serbatoio;

T_s temperatura del serbatoio;

U_s trasmittanza unitaria del serbatoio;

$A_i U_i$ trasmittanza totale del circuito che collega il serbatoio ai collettori (ingresso);

$A_u U_u$ trasmittanza totale del circuito che collega i collettori (uscita) al serbatoio;

ε_i e ε_u sono dei fattori di scambio termico, per i due rami di circuito sopra descritti; essi possono essere determinati con le relazioni:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{A_i U_i}{\dot{m} c_p} \right)^{-1} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_i U_i}{\dot{m} c_p} \right) \right] = (NUT)^{-1} [1 - \exp(-NUT)] \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_u = \left(\frac{A_u U_u}{\dot{m} c_p} \right)^{-1} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_u U_u}{\dot{m} c_p} \right) \right] = (NUT)^{-1} [1 - \exp(-NUT)]$$

Si noti che, se si considerano i tubi come uno scambiatore di calore acqua-aria (mezzo con capacità termica infinita), il fattore di scambio termico rappresenta l'efficienza dello scambiatore [$\varepsilon_{sc} = 1 - \exp(-NUT)$] rapportata al numero di unità di trasferimento. Tenendo conto che $(A_i U_i / \dot{m} c_p) = NUT$, la prima delle (3.27) può essere facilmente ricavata dalla relazione sotto riportata:

$$Q = \varepsilon_{sc} Q_{max} = (1 - e^{-NUT}) \dot{m} c_p (T_s - T_a) = A_i U_i \varepsilon_i (T_s - T_a)$$

Tenendo conto della (3.27) e della (3.28) e ponendo:

$$\theta_s(t) = T_s(t) - T_s(0)$$

$$\theta_a(t) = T_a(t) - T_s(0)$$

La (3.26) può essere scritta come:

$$\frac{d\theta_s}{dt} + \lambda\theta_s(t) = gG_c(t) + \lambda\theta_a(t) \quad (3.30)$$

I parametri g e λ sono ricavabili con le relazioni:

$$g = \frac{\lambda_1}{C_s} \quad (3.31)$$

$$\lambda = \frac{(\lambda_2 + \lambda_3)}{C_s} \quad (3.32)$$

con:

$$\lambda_1 = A_c F_R (\tau\alpha) \left[1 - \frac{A_u U_u \epsilon_u}{\dot{m} c_p} \right] \quad (3.33)$$

$$\lambda_2 = A_c F_R U_c \left[1 - \frac{A_u U_u \epsilon_u}{\dot{m} c_p} \right] \left[1 - \frac{A_i U_i \epsilon_i}{\dot{m} c_p} \right] \quad (3.34)$$

$$\lambda_3 = A_s U_s + A_u U_u \epsilon_u + A_i U_i \epsilon_i - \frac{A_o U_o \epsilon_o A_i U_i \epsilon_i}{\dot{m} c_p} \quad (3.35)$$

Integrando l'equazione (3.30), si ottiene:

$$\theta_s(t) = \int_0^t [gG_c(t-\tau) + \lambda\theta_a(t-\tau)] \exp(-\lambda\tau) d\tau \quad (3.36)$$

dalla quale segue:

$$T_s(t) = T_s(0) + \int_0^t [gG_c(t-\tau) + \lambda\theta_a(t-\tau)] \exp(-\lambda\tau) d\tau \quad (3.37)$$

La (3.37) permette di ottenere il valore stimato della temperatura del serbatoio in funzione dei valori sperimentali del flusso solare, della temperatura dell'aria esterna e della portata di fluido nel collettore. L'espressione tempo-discreta della (3.37), valida per $n > 1$, proposta da Wijesundera, è:

$$T_s(n) = T_s(0) + \frac{1 - e^{-\lambda \Delta \tau}}{\lambda} \sum_{i=1}^{n-1} [g G_c(i) + \lambda \theta_a(i)] e^{-(n-1-i)\lambda \Delta \tau} \quad (3.38a)$$

Nella formula precedente l'intervallo temporale (0-t) è stato suddiviso in (n-1) step di ampiezza $\Delta \tau = t / (n - 1)$. Una formula alternativa alla (3.38a), molto più precisa (di un ordine di grandezza), è la seguente:

$$T_s(t) = T_s(0) + \frac{t}{2n} \left\{ g G_c(t) + \lambda \theta_a(t) + [g G_c(0) + \lambda \theta_a(0)] e^{-\lambda t} + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \left[g G_c\left(t \frac{n-i}{n}\right) + \lambda \theta_a\left(t \frac{n-i}{n}\right) \right] e^{-\lambda i(t/n)} \right\} \quad (3.38b)$$

In questa formula, invece, l'intervallo temporale (0-t) è diviso in n step di ampiezza $\Delta \tau = (t / n)$ ed è valida per $n \geq 1$.

La stima dei parametri g e λ viene effettuata minimizzando la funzione:

$$\phi = \sum_{n=1}^N [T_s(n) - \bar{T}_s(n)]^2 \quad (3.39)$$

dove $T_s(n)$ rappresenta il valore all'istante n , calcolato mediante la (3.38a), $\bar{T}_s(n)$ il valore sperimentale al medesimo istante, ed N il numero totale dei dati sperimentali disponibili.

Come già detto, la procedura si basa sul valore della temperatura del liquido contenuto nel serbatoio che, pertanto, deve essere perfettamente miscelato mediante un'apposita pompa (di miscelazione), in modo che la variazione di temperatura lungo la direzione verticale risulti inferiore a 0.1 °C. Il coefficiente di perdita del serbatoio e la sua capacità termica sono determinati riscaldando l'acqua del serbatoio mediante delle resistenze elettriche sino ad una temperatura di circa 80°C e lasciandola poi raffreddare con la pompa

di miscelazione in funzione; i valori di C_s e U_s si determinano tramite analisi di regressione dei dati sperimentali.

Il metodo richiede solo stazionarietà della portata mentre tutte le altre grandezze possono variare; un test tipico è condotto tra le ore 9:00 e le 17:00. Solitamente sono necessari almeno sette giorni di prova per ottenere valori medi accettabili dei parametri del collettore $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_c$.

3.8 QUICK DYNAMIC TESTING

Si tratta di un metodo estremamente semplice, proposto da Amer, Nayak e Sharma, che prevede una sequenza di prova molto simile a quella seguita dallo standard ASHRAE per la determinazione della costante di tempo del collettore.

Il collettore viene esposto al sole con temperatura d'ingresso del fluido costante e portata specifica (G') costante pari a $0,02 \text{ kg/sm}^2$ oppure pari al valore specificato dal costruttore. Il test inizia quando le temperature d'ingresso e di uscita del fluido hanno raggiunto valori stabili. Il collettore viene improvvisamente ombreggiato mediante uno schermo per provocare una rapida riduzione della temperatura di uscita del fluido. Quando la velocità con la quale decresce la temperatura di uscita del fluido è molto bassa, lo schermo è rimosso. La temperatura di uscita inizia di nuovo ad aumentare ed il test termina quando questa raggiunge un valore quasi costante compatibile con le condizioni ambientali prevalenti in quel momento. Il test viene condotto intorno al mezzogiorno solare per raggiungere condizioni di stabilità in breve tempo. Se la durata del test è solo di pochi minuti, l'intero test può essere ripetuto più volte, per diverse temperature di ingresso del fluido ($30\text{-}80^\circ\text{C}$), per assicurare la ripetibilità dei risultati.

La potenza utile specifica viene valutata con la semplice relazione:

$$q_u = F'(\tau\alpha)G_c - F'U_c(T_{fm} - T_a) - (mc)_e \frac{dT_{fm}}{dt} \quad (3.40)$$

nella quale $(mc)_e$ rappresenta la capacità termica specifica effettiva del collettore. Secondo gli autori, il coefficiente di perdita totale del collettore U_c può essere scritto in funzione della velocità del vento v e della differenza di temperatura $\Delta T=(T_{fm}-T_a)$:

$$U_c = U_1 + v(U_2 + U_3 \Delta T) + U_4 \Delta T \quad (3.41)$$

Effettuando misure sperimentali che riguardano la portata, la temperatura di ingresso e di uscita del fluido dal collettore, la temperatura ambiente e l'irraggiamento solare sul piano del collettore, si può giungere alla stima dei parametri dell'eq. (3.40), mediante analisi di regressione dei dati sperimentali. In relazione ai collettori vetrati, gli stessi autori consigliano di trascurare i termini del secondo ordine nell'eq. (3.41).

3.9 NEW DYNAMIC METHOD

Il metodo è stato proposto da Amer, Nayak e Sharma nel 1999 in un lavoro pubblicato su *Energy Conversion & Management*. Si tratta di un modello ad un nodo che assume le perdite termiche come funzione lineare della differenza di temperatura tra il fluido e l'ambiente. I processi di scambio termico sono considerati monodimensionali e l'efficienza ottica $\eta_0 = F'(\tau\alpha)$ è ritenuta costante nel tempo (il test deve essere effettuato attorno al mezzogiorno solare in modo che η_0 possa ritenersi più o meno costante con l'angolo di incidenza). Inoltre, il coefficiente di perdita U_c ed il calore specifico del fluido c_p sono considerati invariati con la temperatura. La portata di fluido nel collettore viene considerata costante ed uniformemente distribuita attraverso i tubi.

Il modello si basa su un'equazione di bilancio energetico applicata ad un elemento di collettore di lunghezza Δx nella direzione del moto del fluido e di larghezza w pari all'interasse tra due tubi adiacenti:

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 c_p [T_f(x + \Delta x, \tau) - T_f(x, \tau)] = F'(\tau\alpha) G_c(\tau) w \Delta x + \\ - F' U_c [T_f(x, \tau) - T_a(\tau)] w \Delta x - (Mc)_{\Delta x} \frac{\partial T_f(x, \tau)}{\partial \tau} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Considerando la capacità del collettore distribuita uniformemente su tutta l'area del collettore si ha :

$$\frac{(Mc)_{\Delta x}}{w \Delta x} = \frac{(Mc)_{\text{aletta}}}{w L} = \frac{(Mc)_e}{A_c} \quad (3.43)$$

dove $(Mc)_{\Delta x}$ rappresenta la capacità termica di un elemento di piastra di lunghezza Δx , $(Mc)_{\text{aletta}}$ la capacità termica di un elemento di lunghezza L ed $(Mc)_e$ la capacità termica complessiva della piastra assorbente.

Se nella (3.42) si dividono tutti i termini per $w\Delta x$, si tiene conto della (3.43) e si fa tendere a zero Δx , con semplici passaggi, si ottiene:

$$\frac{\partial T_f(x, \tau)}{\partial x} + \frac{F'U_c A_c}{\dot{m}c_p L} T_f(x, \tau) = \frac{F'(\tau\alpha) A_c}{\dot{m}c_p L} G_c(\tau) + \frac{F'U_c A_c}{\dot{m}c_p L} T_a(\tau) + \frac{(Mc)_e}{\dot{m}c_p L} \frac{\partial T_f(x, \tau)}{\partial \tau} \quad (3.44)$$

Imponendo le condizioni (iniziale ed al contorno):

$$\begin{aligned} T_f(x, 0) &= T_0 \\ T_f(0, \tau) &= T_{fi}(\tau) \end{aligned} \quad (3.45)$$

l'eq. (3.44), risolta con la tecnica della trasformata di Laplace, fornisce l'espressione della temperatura del fluido $T_f(x, \tau)$:

$$\begin{aligned} T_f(x, \tau) &= \int_0^\tau \left[\frac{F'(\tau\alpha)}{(\dot{m}c)_e} G_c(\tau-t) + \frac{F'U_c}{(\dot{m}c)_e} T_a(\tau-t) \right] \exp\left(\frac{F'U_c}{(\dot{m}c)_e} t\right) dt + \\ &+ T_0 \exp\left(\frac{F'U_c}{(\dot{m}c)_e} \tau\right) \left[1 - u\left(\tau - \frac{\tau_d x}{L}\right) \right] + \exp\left(-\frac{\tau_d x}{\tau_L L}\right) \left[T_{fi}\left(\tau - \frac{\tau_d x}{L}\right) u\left(\tau - \frac{\tau_d x}{L}\right) \right] + \\ &- \int_0^\tau \left[\frac{F'(\tau\alpha)}{(\dot{m}c)_e} G_c(\tau-t) + \frac{F'U_c}{(\dot{m}c)_e} T_a(\tau-t) \right] \exp\left(\frac{F'U_c}{(\dot{m}c)_e} t\right) u\left(t - \frac{\tau_d x}{L}\right) dt \end{aligned} \quad (3.46)$$

dove:

$$\begin{aligned}\tau_d &= \frac{(Mc)_e}{\dot{m} c_p} \\ \tau_L &= \frac{(Mc)_e}{F'U_c}\end{aligned}\tag{3.47}$$

ed u è la funzione gradino unitario, definita come:

$$u\left(t - \frac{\tau_d x}{L}\right) = \begin{cases} 0 & t < \frac{\tau_d x}{L} \\ 1 & t \geq \frac{\tau_d x}{L} \end{cases}\tag{3.48}$$

L'eq. (3.46) può essere notevolmente semplificata eseguendo l'integrazione tra l'istante 0 e l'istante τ_d ; chiaramente è necessario scegliere un valore corretto di τ_d in modo che la risposta del collettore sia realisticamente rappresentata. Gli autori consigliano di scegliere τ_d come il tempo necessario affinché la risposta del collettore ad un input transitorio raggiunga il 95% del valore finale costante. Con tale ipotesi l'eq. (3.46) diventa:

$$T_{fu}(\tau) = \int_0^{\tau_d} \left[\frac{F'(\tau\alpha)}{(mc)_e} G_c(\tau-t) + \frac{F'U_c}{(mc)_e} T_a(\tau-t) \right] \exp\left(\frac{F'U_c}{(mc)_e} t\right) dt + T_0 \exp\left(\frac{F'U_L}{(mc)_e} \tau\right)\tag{3.49}$$

Se il tempo di risposta τ_d viene suddiviso in N segmenti uguali, ognuno di durata $\Delta\tau$, l'integrale di convoluzione della (3.49) può essere approssimato con una sommatoria di convoluzione:

$$\begin{aligned}T_{fu}(\tau) &= \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{F'(\tau\alpha)}{(mc)_e} G_c(\tau - k\Delta\tau) + \frac{F'U_c}{(mc)_e} T_a(\tau - k\Delta\tau) \right] \exp\left(\frac{F'U_c}{(mc)_e} k\Delta\tau\right) \Delta\tau + \\ &+ T_0 \exp\left(\frac{F'U_L}{(mc)_e} \tau_d\right)\end{aligned}\tag{3.50}$$

La (3.50) è un'equazione non lineare che contiene come incognite: $F'(\tau\alpha)$, $F'U_c$ ed $(mc)_e$. Secondo la (3.50) la temperatura di uscita del fluido dal collettore all'istante τ è

una funzione cumulativa degli input durante lo stesso istante temporale e degli input ad istanti temporali precedenti; ognuno degli input è moltiplicato per un fattore peso che rappresenta la funzione risposta del sistema.

Il metodo prevede due prove: la prova del tempo di risposta (response time test) e la prova di prestazione termica (thermal performance test). Durante entrambi le prove è necessario misurare la temperatura d'ingresso e di uscita del fluido dal collettore, la temperatura ambiente, la portata e l'irraggiamento solare totale sul piano dei collettori. Ogni test dovrebbe essere eseguito almeno due volte per verificare la ripetibilità dei risultati.

Response time test

Il tempo di risposta del collettore (τ_d) viene stimato variando soltanto uno degli input (la radiazione solare), mentre gli altri vengono mantenuti costanti. Il collettore è esposto al sole e vi circola il fluido con temperatura d'ingresso e portata costanti. Dopo un breve periodo di funzionamento in tali condizioni (circa 10 minuti), la temperatura del fluido all'uscita del collettore raggiungerà un valore costante (se il flusso solare è costante). A questo punto il collettore viene schermato dalla radiazione solare e si continua a monitorare la temperatura del fluido in uscita. Il tempo di risposta τ_d coincide con l'istante temporale τ nel quale si verifica la condizione: $(T_{fu}(\tau) - T_{fi}) = 0,95(T_{fu}(0) - T_{fi})$.

Thermal performance test

Questo test può essere condotto con diverse metodologie, classificate nei tre gruppi A, B e C. Il gruppo A si riferisce ad un test, della durata di un'intera giornata, condotto nelle reali condizioni atmosferiche. Il gruppo B si riferisce ad un test condotto in condizioni "transitorie forzate" ottenute usando uno schermo opaco: il collettore viene coperto mediante lo schermo per 5 minuti e poi esposto al sole per altri 15-30 minuti; anche questo ciclo è realizzato durante tutto l'arco della giornata. Il test relativo al gruppo C è analogo a quello del gruppo B, ma viene utilizzato uno schermo semi-trasparente costituito da più strati di polietilene in modo da provocare una riduzione del 30% della radiazione solare incidente. Lo schermo deve essere mantenuto parallelo al piano del collettore ad una distanza di 0.5 m. L'area dello schermo deve essere più grande di quella del collettore (almeno 0,5 m per ogni lato). Non è richiesta la costanza della temperatura d'ingresso del fluido.