

CAPITOLO 2

METODI DI PROVA NORMATI

2.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo vengono introdotti ed illustrati i metodi per la determinazione della curva di efficienza in condizioni stazionarie, e per la caratterizzazione in transitorio dei collettori solari. In particolare viene descritta la norma europea EN 12975/2001 che ha sostituito le singole norme nazionali, diventando standard unico per tutti i paesi dell'unione, che contempla un metodo di prova in stazionario, il quale, a sua volta recepisce la normativa ISO, e un metodo di prova in transitorio denominato QDT (Quasi Dynamic Test).

La necessità di introdurre prove in condizioni transitorie dipende essenzialmente dal fatto che le prove in regime stazionario richiedono condizioni molto stringenti (prove da effettuarsi centrate rispetto al mezzogiorno, a meno che non si disponga di piattaforme ad inseguimento, cielo sereno e bassa percentuale di diffusa, portata e temperature in ingresso fisse) e, quindi, tempi di prova molto lunghi nonché costi elevati. Tale situazione peggiora ulteriormente nei periodi invernali quando non è facile avere giornate con cielo sereno soprattutto per i paesi del centro e nord Europa con caratteristiche climatiche meno favorevoli rispetto all'Italia. I metodi in regime transitorio richiedono prove estese all'intera giornata (con la possibilità quindi di acquisire giornalmente un numero assai elevato di punti sperimentali rispetto al metodo in stazionario), senza il vincolo del cielo sereno; anzi, per la determinazione accurata dei parametri, è necessario effettuare prove in giornate nuvolose. Inoltre, i metodi in regime transitorio tengono conto del comportamento dinamico del collettore mediante l'utilizzo della capacità termica o di parametri equivalenti e, quindi, portano a modelli più vicini al funzionamento reale. Per ovviare ai problemi ed alle limitazioni insite nei metodi di prova in regime stazionario, nella norma è stata introdotta una prova in transitorio denominata QDT.

2.2 METODO STAZIONARIO SECONDO LA NORMA EN 12975-2

2.2.1 INTRODUZIONE

La conoscenza del comportamento termico dei collettori è essenziale per la predizione della resa energetica annua dei sistemi solari termici. Con la pubblicazione dello standard europeo EN 12975 tutte le norme dei vari paesi europei sono state sostituite da quest'ultimo, quindi attualmente per tutta Europa vi è uno standard unico di prova. Questo garantisce che i metodi di prova siano gli stessi per tutti i paesi europei e rende possibile la comparazione dei risultati per quanto riguarda i test effettuati da laboratori diversi. Oltre i metodi di prova per testare la resistenza, l'affidabilità e la rispondenza agli standard di sicurezza, per i collettori solari a liquido, la norma comprende due metodi alternativi per la caratterizzazione della resa termica dei collettori solari termici. Accanto ai metodi noti per la prova in condizioni stazionarie, in accordo con gli standard ISO 9806-1,3 e ASHRAE 93-77, lo standard EN 12975 contempla infatti un test in condizioni "quasi dinamiche" che permette di operare in un range di condizioni climatiche molto più vaste del metodo in condizioni stazionarie e nello stesso tempo rende possibile una completa comparazione tra i due metodi. Le basi del metodo sono rappresentate da oltre 15 anni di attività di ricerca condotte in Svezia (Perers 1993, 1995 e 1997) (Hellström 1998). Importanti contributi allo sviluppo del metodo sono stati dati durante questo periodo dalla cooperazione internazionale all'interno di differenti task IEA quali la task 3, 6 e 14 e il progetto di ricerca tedesco Vels (Pauschinger, Drück, 1995).

2.2.2 INTRODUZIONE AI METODI DI PROVA STAZIONARI

L'efficienza istantanea del collettore solare, in condizioni stazionarie, si definisce come rapporto tra l'energia utile estratta dal collettore e l'energia solare incidente sul collettore. La potenza estratta Q_u si calcola come:

$$Q_u = \dot{m} c_f \Delta T \quad (2.1)$$

L'efficienza è data dalla seguente formula:

$$\eta = \frac{Q_u}{A G} = \frac{q_u}{G} \quad (2.2)$$

L'efficienza può essere calcolata in funzione dell'area lorda, dell'area di apertura o dell'area dell'assorbitore.

L'efficienza si può esprimere in funzione della temperatura ridotta T_m^* . Detta T_m la temperatura media aritmetica del fluido nel collettore:

$$T_m = T_{in} + \frac{\Delta T}{2} \quad (2.3)$$

La differenza di temperatura ridotta si calcola come

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G} \quad (2.4)$$

L'efficienza in funzione della temperatura ridotta è data dalla seguente formula:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 G (T_m^*)^2 \quad (2.5)$$

La determinazione di η_0, a_1, a_2 , è effettuata con il metodo dei minimi quadrati applicati alle coppie corrispondenti di valori η e T_m^* determinati per via sperimentale.

2.2.3 DESCRIZIONE DEL TEST

Il test si effettua misurando l'efficienza e la temperatura ridotta per almeno 4 valori di temperatura di ingresso compresi tra una prima temperatura vicina al valore della temperatura ambiente e una temperatura massima intorno agli 80 °C. Se possibile il primo valore di temperatura deve essere scelto con uno scostamento massimo di ± 3 K dalla temperatura ambiente dell'aria in modo da ottenere una accurata determinazione di η_0 . Per ciascuna delle temperature prescelte devono essere effettuate almeno quattro misure per dare in totale 16 punti. Se le condizioni del test lo permettono, un uguale numero di punti deve essere preso prima e dopo il mezzogiorno solare per ciascuna temperatura di ingresso. Ciò non è necessario se il collettore viene montato su una piattaforma mobile ad inseguimento.

Nella prova occorre che ciascun punto valido debba essere preceduto da un periodo di preconditionamento della durata minima di 4 volte la costante di tempo (se conosciuta) o non inferiore a 15 minuti (se la costante di tempo non è conosciuta) con temperatura fissata all'ingresso, seguito da una misura in stato stazionario della durata minima pari almeno a 4 volte la costante di tempo (se conosciuta) o comunque non inferiore a 10 minuti se la costante di tempo non è conosciuta.

Per stato stazionario si intende la situazione in cui nessuno dei parametri sperimentali della tabella 2.1 riportata di seguito si discosti dal suo valore medio durante il test più dei limiti indicati:

PARAMETRO	
Test sulla radiazione globale	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
Temperatura dell'aria	$\pm 1 \text{ K}$
Portata massica del fluido	$\pm 1 \%$
Temperatura del fluido in ingresso	$\pm 0,1 \text{ K}$

Tabella 2.1-Deviazioni o scarti permessi sulle misure e sulla durata del test

2.2.4 IL MODELLO DEL COLLETTORE SECONDO LE PROVE IN STATO STAZIONARIO

Iniziamo con il richiamare il modello in condizioni di stato stazionario utilizzato nello standard EN 12975. Questo modello è stato ampiamente utilizzato sia nelle prove (ISO 9806-1 e ASHRAE 93-77) sia per la simulazione. L'equazione di base di tale modello in riferimento all'output energetico utile del collettore, in condizioni di incidenza normale, può essere scritta come:

$$q_u = F'(\tau\alpha)_{en} G - c_1(t_m - t_a) - c_2(t_m - t_a)^2 \quad (2.6)$$

In tale formula $F'(\tau\alpha)_{en}$ rappresenta l'efficienza in condizioni di perdite nulle e di incidenza normale, mentre c_1 e c_2 sono riferiti alle perdite termiche che a loro volta dipendono dalla temperatura di funzionamento del collettore. Lo standard contempla inoltre delle prove separate per la determinazione della dipendenza di $F'(\tau\alpha)_{en}$ dall'angolo di incidenza, denotata come $K_{\vartheta}(\vartheta)$, e della capacità termica (specificata) effettiva del collettore, denotata in seguito c_5 oppure $(mc)_e$. Tale parametro può essere misurato o calcolato come media pesata delle capacità termiche specifiche dei componenti del collettore. L'equazione che descrive il comportamento dinamico del collettore basata sul metodo di prova in stato stazionario può essere dunque scritta nel modo seguente:

$$q_u = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\vartheta}(\vartheta) G - c_1(t_m - t_a) - c_2(t_m - t_a)^2 - c_5 dt_m / dt \quad (2.7)$$

Chiaramente questo modello è applicabile, a rigore, in condizioni meteo serene oppure in prove indoor con un simulatore della radiazione solare. Nella sequenza dei test sono accettabili solo livelli di radiazione elevata e quindi bassa frazione di diffusa. Inoltre viene richiesto che l'angolo di incidenza sia prossimo alle condizioni di incidenza normale in modo da trascurare gli effetti dell'angolo di incidenza nella determinazione di $F'(\tau\alpha)_{en}$. Tali prescrizioni limitano fortemente il numero di misure utili richiedendo lunghi periodi di prova e rendono il metodo assai costoso. Il modello in stazionario inoltre non tiene conto di termini correttivi per la radiazione diffusa. D'altra parte ciò è richiesto nella maggioranza dei programmi di simulazione per i calcoli della resa termica di lunga durata. In questo caso la radiazione solare va divisa in radiazione diffusa e radiazione diretta e, inoltre, per tener conto degli effetti dell'angolo di incidenza, deve essere introdotto un termine correttivo separato per la radiazione diffusa. Nella procedura del test in condizioni stazionarie, infine, per ogni punto di misura sono richieste condizioni climatiche estremamente stabili in modo che la durata delle prove, specie nella stagione invernale, comporta tempi assai lunghi, essendo validi solamente i punti sperimentali presi in giornate di cielo completamente sereno centrati rispetto al mezzogiorno solare. L'utilizzo di un metodo in transitorio permette di superare l'ostacolo richiedendo, per la validità dei punti sperimentali raccolti, condizioni molto meno stringenti.

2.3 IL QUASI DYNAMIC TEST

2.3.1 IL CONTESTO NORMATIVO

Nell'Ottobre del 2000 il CEN ha approvato la norma EN 12975-1 dal titolo "Thermal solar systems and components – Solar collectors – Part 1: General requirements"; a Giugno del 2001 ha inoltre approvato la parte 2 della stessa norma dal titolo "Test methods". L'UNI, in qualità di membro CEN, assolve al suo compito di dare a questa norma la veste di norma nazionale pubblicando:

- A Marzo 2002 la UNI EN 12975-1: *Impianti termici solari e loro componenti - Collettori solari – Parte 1: Requisiti generali*
- A Maggio del 2005 la UNI EN 12975-2: *Impianti termici solari e loro componenti - Collettori solari – Parte 2: Metodi di prova*

Tale norma, nella veste europea prima, e nelle adozioni dei membri CEN poi, si pone come riferimento principale per le prove sui collettori solari, citando al suo interno eventuali altri riferimenti normativi da prendere in considerazione ed i termini in cui farlo.

2.3.2 I CONTENUTI DELLA NORMA

La norma specifica metodi di prova per la convalida della durabilità, dell'affidabilità e dei requisiti di sicurezza per i collettori a riscaldamento di liquido, siano essi vetrati o non vetrati; la norma include inoltre due metodi di prova per la caratterizzazione delle prestazioni termiche degli stessi collettori.

Essa non è applicabile ai collettori in cui l'unità di accumulo termico è parte integrante del collettore, nella misura in cui il processo di captazione non può essere separato dal processo di accumulo per scopi di misurazione di questi due processi.

Si noti che la UNI EN 12975 si riferisce alle prove sui collettori, e non alle prove sugli impianti nella loro globalità; in tal senso, infatti, il riferimento normativo è la EN 12976 che ha trovato adozione nella UNI EN 12976 pubblicata a Maggio del 2005.

Per quanto riguarda la convalida della durabilità, dell'affidabilità e dei requisiti di sicurezza, la norma prevede le seguenti prove:

1. Pressione interna
2. Alte temperature
3. Shock termico esterno
4. Shock termico interno
5. Penetrazione alla pioggia
6. Congelamento
7. Pressione interna (verificata nuovamente)
8. Urto

Per quanto riguarda la caratterizzazione delle prestazioni termiche la norma prevede che questa possa avvenire sia in condizioni statiche che quasi-dinamiche, tanto per i collettori vetrati quanto per quelli non vetrati.

La novità principale della UNI EN 12975 riguarda proprio la determinazione delle prestazioni termiche, infatti in essa è contemplato, oltre al metodo in condizioni stazionarie, un metodo che consente di condurre test all'aperto sotto la naturale radiazione solare e vento naturale o simulato, detto "Quasi-dynamic test".

2.3.3 QDT (QUASI-DYNAMIC TEST)

Qui di seguito diamo le specifiche di prova per il metodo del *Quasi-dynamic test (QDT)*. Si noti che le sequenze di prova raccomandate e le altre specifiche di prova date, sono strettamente connesse a quelle ampiamente accettate per le prove in stato-stazionario dei collettori solari. Sostanzialmente le richieste di dati di prova adatti sono le stesse per entrambi i tipi di approccio, e pertanto la sequenza di prova raccomandata permetterà anche l'identificazione dei parametri convenzionali in stato-stazionario, ottenendo e selezionando quelle sequenze di dati corrispondenti alle richieste dello stato-stazionario.

Il metodo di prova e la sequenza di prova raccomandati, combineranno e permetteranno la stima della effettiva capacità termica, dell'angolo di incidenza non normale (IAM) e della velocità del vento rispetto all'efficienza del collettore. Lo strumento matematico usato per l'identificazione dei parametri del collettore è detto Regressione Lineare Multipla (MLR), ed è fondamentalmente lo stesso di quello usato nell'identificazione dei parametri in stato-stazionario, eccetto per il fatto che in questo caso possiamo identificare più parametri simultaneamente.

Un diverso approccio ed una simultanea stima dei parametri sono ovviamente resi possibili dalla adozione di un diverso modello di collettore. Di seguito vengono riportate le ipotesi alla base del modello e le differenze rispetto a quello adottato per le prove in stazionario.

2.3.4 MODELLO DEL COLLETTORE ADOTTATO NEL QDT

Nella identificazione dei parametri del collettore è utilizzato il modello di collettore con potenza utile effettiva; vediamo qui di seguito le differenze rispetto al modello di collettore adottato nelle prove in condizioni statiche.

Per il modello collettore per le prove in stazionario l'equazione di base è un modello stazionario per operare con un angolo di incidenza vicino alla normale:

$$q_u = F'(\tau\alpha)_{en} G^* - c_1 (t_m - t_a) - c_2 (t_m - t_a)^2 \quad (2.8)$$

L'insolazione è denotata con G^* , ma dovrebbe invece essere denotata con G_b per puntualizzare che solo elevati livelli di insolazione sono accettati nella sequenza di prova, e quindi una piccola frazione diffusa. Non sono presenti correzioni per le condizioni “non stazionarie”, così sono richieste per ogni punto di prova ingressi e condizioni di radiazione molto stabili.

Inoltre, si assume un angolo di incidenza molto vicino a quello normale, così gli effetti dell'angolo di incidenza possono essere trascurati.

Nel modello stazionario ci sono inoltre prove facoltative per la determinazione della dipendenza dell'angolo di incidenza da η_0 (zero loss efficiency) e dalla effettiva capacità termica del collettore. Effettuando queste ulteriori prove la equazione in stazionario può essere arricchita ed assumere la seguente forma:

$$q_u = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta)G^* - c_1(t_m - t_a) - c_2(t_m - t_a)^2 - c_5 \frac{dt_m}{dt} \quad (2.9)$$

Come prima cosa nel modello per l'approccio in transitorio il primo termine della equazione è diviso in due parti, dando η_0 come la somma di due contributi, uno per la radiazione diretta e l'altro per la radiazione diffusa; ossia $F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta)G^*$ è diviso in $F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta)G_b + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta d}(\theta)G_d$ mentre il resto della equazione è lasciato invariato. Per estendere l'applicazione ad una più ampia gamma di collettori solari, ma anche per ottenere una più completa caratterizzazione del collettore con la stessa prova e con lo stesso metodo, è stata apportata un'altra aggiunta al modello collettore, chiamata la “correzione per la dipendenza dal vento”. In questo approccio la dipendenza dal vento è modellata dall'aggiunta di due termini all'equazione di base. Un termine tiene conto dell'effetto su η_0 ($-c_6 u G^*$) mentre l'altro dell'effetto sulle perdite di calore $[-c_3 u (t_m - t_a)]$.

Infine un ultimo termine aggiuntivo tiene conto della dipendenza delle perdite di calore dall'irraggiamento ad elevata lunghezza d'onda $[+c_4 (E_L - \sigma T_a^4)]$.

Il modello collettore è ora completo e può essere scritto nella seguente forma:

$$q_u = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta) G_b + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta d} G_d - c_6 u G^* - c_1 (t_m - t_a) + \\ - c_2 (t_m - t_a)^2 - c_3 u (t_m - t_a) + c_4 (E_L - \sigma T_a^4) - c_5 dt_m / dt \quad (2.10)$$

Tale equazione fornisce la potenza in uscita del collettore per unità di area di riferimento adottata.

2.3.5 VANTAGGI DEL METODO QDT

Con l'utilizzo del modello collettore precedente descritto e con l'applicazione fedele del QDT, l'irraggiamento solare totale sul piano di apertura collettore potrà variare (anche se saranno inclusi nell'insieme dei dati per l'identificazione dei parametri solo i dati acquisiti con livello di irraggiamento non inferiore a 300 Wm^{-2}).

L'applicazione del QDT e quindi l'estensione dei metodi di analisi alle condizioni di tutti i giorni si traduce in diversi vantaggi; se ne elencano i principali:

- Test all'aperto più brevi e meno costosi.
- Una più completa caratterizzazione del collettore.
- Il modello di collettore adottato è direttamente compatibile con quello dei precedenti standard del test di base, essendo presenti semplicemente dei termini correttivi.
- Un confronto con le prove in stazionario può essere sempre fatto valutando solo i periodi dei giorni di test del quasi-stazionario che corrispondono alle specifiche del test in condizioni stazionarie.
- La stessa attrezzatura di test può essere usata per l'analisi in condizioni stazionarie apportando solo piccoli cambiamenti, che inoltre aumenteranno l'accuratezza del test in condizioni quasi-dinamiche.
- I software per PC comunemente disponibili, come i fogli di calcolo o più avanzati pacchetti statistici, possono essere usati per l'identificazione dei parametri poiché hanno tra le opzioni la Regressione Lineare Multipla (MLR) adottata da questi metodi.

2.4 CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO DI PROVA QDT

Molte sono le specifiche da rispettare sia relativamente alle caratteristiche dell'impianto, sia relativamente alle procedure di acquisizione e di calcolo. Elenchiamo, qui di seguito, solo le specifiche più caratterizzanti del metodo, con particolare attenzione alle prove all'aperto su collettori solari vetrati:

- ***Montaggio del collettore e allocazione***

Allo scopo di facilitare le comparazioni internazionali dei risultati delle prove, il collettore dovrà essere montato in modo che l'angolo di inclinazione della superficie di apertura rispetto all'orizzontale sia: $45^\circ \pm 5^\circ$. Il collettore dovrà essere montato all'aperto in una posizione fissa orientata a sud, entro $\pm 5^\circ$.

Dovrà essere usata una struttura di montaggio aperta che permette all'aria di circolare liberamente intorno alla parte anteriore e posteriore del collettore. Il collettore dovrà essere montato così che il bordo inferiore non sia a meno di 0,5 m sopra la superficie del terreno. Correnti di aria tiepida, come quelle che lambiscono i muri delle costruzioni, non dovranno passare sul collettore.

La allocazione del supporto di prova dovrà essere tale che non arrivi ombra sul collettore durante la prova.

La radiazione solare che non arriva direttamente dal disco solare è assunta come se venisse in modo isotropo dall'emisferico campo di vista del collettore. Nell'intento di minimizzare gli errori derivanti da questa approssimazione, il collettore sarà posizionato dove non ci sarà una significativa radiazione solare riflessa su di esso e non ci saranno significativi ostacoli nel campo di vista. Non più del 5% del campo di vista del collettore dovrà essere ostruito.

La temperatura delle superfici adiacenti dovrà essere il più possibile prossima a quelle dell'aria ambiente al fine di minimizzare l'influenza dell'irraggiamento termico.

La prestazione di molti collettori è sensibile alla velocità dell'aria. Al fine di massimizzare la riproducibilità dei risultati, i collettori dovranno essere montati così che l'aria possa liberamente passare sotto, sopra ed ai lati del collettore. La velocità principale dell'aria, parallela all'apertura del collettore dovrà essere compresa nei limiti specificati in seguito. Dove necessario, generatori artificiali di vento dovranno essere utilizzati per raggiungere queste velocità dell'aria.

- **Strumentazione**

Per poter effettuare le misurazioni sarà necessario disporre della strumentazione elencata qui di seguito.

Un piranometro di classe I, come specificato nella ISO 9060, dovrà essere usato per misurare la radiazione globale a bassa lunghezza d'onda dal sole e dal cielo. Le raccomandazioni pratiche per l'utilizzo date in ISO/TR 9901 dovranno essere osservate.

Un pirgeometro montato sul piano del collettore dovrà essere usato per misurare la radiazione globale ad elevata lunghezza d'onda.

Il pirgeometro usato durante la prova sarà posizionato sullo stesso piano dell'assorbitore rispettando tutte le specifiche e le accortezze dettate dalla norma.

Tre misure di temperatura sono richieste per testare i collettori solari. Queste sono la temperatura del fluido all'ingresso del collettore, la temperatura del fluido all'uscita del collettore, e la temperatura dell'aria ambiente.

La precisione richiesta e l'ambiente per queste misurazioni sono diversi, pertanto i sensori per la misura delle temperature e le attrezzature associate possono essere differenti.

La temperatura del fluido termovettore all'ingresso del collettore dovrà essere misurata con un'incertezza di 0.1 K, ma al fine di controllare che la temperatura non vari con il tempo, una risoluzione di gran lunga migliore del segnale di temperatura, pari a ± 0.02 K, è richiesta.

La differenza tra le temperature di ingresso e di uscita del collettore (ΔT) saranno determinate con una accuratezza < 0.05 K.

La temperatura dell'ambiente o aria circostante deve essere misurata con una accuratezza di 0.5 K.

Per le misure all'aperto il sensore dovrà essere protetto dalla radiazione solare diretta e riflessa per mezzo di una vernice bianca, un ben ventilato riparo, preferibilmente con ventilazione forzata. Il riparo stesso dovrà essere in ombra e posizionato a mezza altezza del collettore ma ad almeno 1 m dalla superficie del terreno per assicurare che sia protetto dall'influenza del riscaldamento del terreno.

Il riparo dovrà essere posizionato ad un lato del collettore e a non più di 10 m da esso.

Se l'aria viene forzata sul collettore da un generatore di vento, la temperatura dell'aria dovrà essere misurata allo sfogo del generatore di vento e bisognerà fare controlli per assicurarsi che questa temperatura non devia da quella dell'aria ambiente di più di ± 1 K.

La portata massica può essere misurata direttamente o, alternativamente, se è nota la densità, questa può essere calcolata misurando la portata volumetrica e la temperatura. La precisione della misura della portata di fluido dovrà essere all'interno di ± 1 % del valore misurato, in massa per unità di tempo.

Usando la velocità del vento misurata sul collettore, è possibile definire chiaramente le condizioni in cui le prove sono state effettuate. La velocità dell'aria circostante sulla superficie frontale del collettore dovrà essere misurata con una incertezza di 0.5 ms^{-1} per i collettori vetrati. Sotto condizioni all'aperto la velocità dell'aria circostante raramente è costante, e frequentemente ci sono raffiche. La misura di una velocità dell'aria media è perciò richiesta durante il periodo di prova. Ciò può essere ottenuto mediante una integrazione rispetto al tempo sul periodo di prova. L'anemometro dovrà essere calibrato ad intervalli annuali.

La pressione di ingresso del collettore e la caduta di pressione attraverso il collettore dovranno essere misurate con un sistema avente un errore del 5% del valore misurato oppure $\pm 10 \text{ Pa}$.

Se il collettore è fornito in moduli la perdita di pressione sarà specificata per modulo. Il tempo trascorso dovrà essere misurato con una precisione dello 0.2%.

In nessun caso la più piccola scala di divisione dello strumento o del sistema deve eccedere due volte la precisione specificata. Per esempio, se l'incertezza specificata è 0.1 K, la più piccola scala di divisione dello strumento non deve superare 0.2 °C. Tecniche digitali e ausili elettronici devono avere un errore uguale o migliore dell'1,0 % del valore misurato.

Registratori analogici e digitali devono avere un errore uguale o migliore dello 0.5 % del fondo scala di lettura ed avere una costante di tempo di 1s o meno. Il segnale di picco deve essere tra 50% e 100% del fondo scala. L'impedenza d'ingresso dei registratori dovrà essere maggiore di 1000 volte dell'impedenza dei sensori o 10 M Ω , comunque alto sia il valore.

L'area del collettore (assorbitore, lorda o di apertura) dovrà essere misurata con una incertezza dello 0.3 %. Le misure dell'area dovranno essere prese con una temperatura collettore di $(20 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$.

La massa di fluido contenuta nell'impianto dovrà essere misurata con un'accuratezza minima del 10%. Le misure possono essere effettuate o mediante pesatura del collettore quando è vuoto e nuovamente quando è pieno di fluido, o riempiendo e svuotando il collettore per determinare la massa di fluido che esso può contenere. La temperatura del

fluido dovrà essere tenuta a $\pm 2K$ della temperatura ambiente. Come alternativa può essere fatta una stima basata su considerazioni di tipo geometrico.

- **Installazione di prova**

La norma fornisce a titolo esemplificativo due esempi schematici di circuiti di prova, uno relativo al circuito chiuso e l'altro al circuito aperto. Riportiamo qui di seguito quello relativo al circuito chiuso:

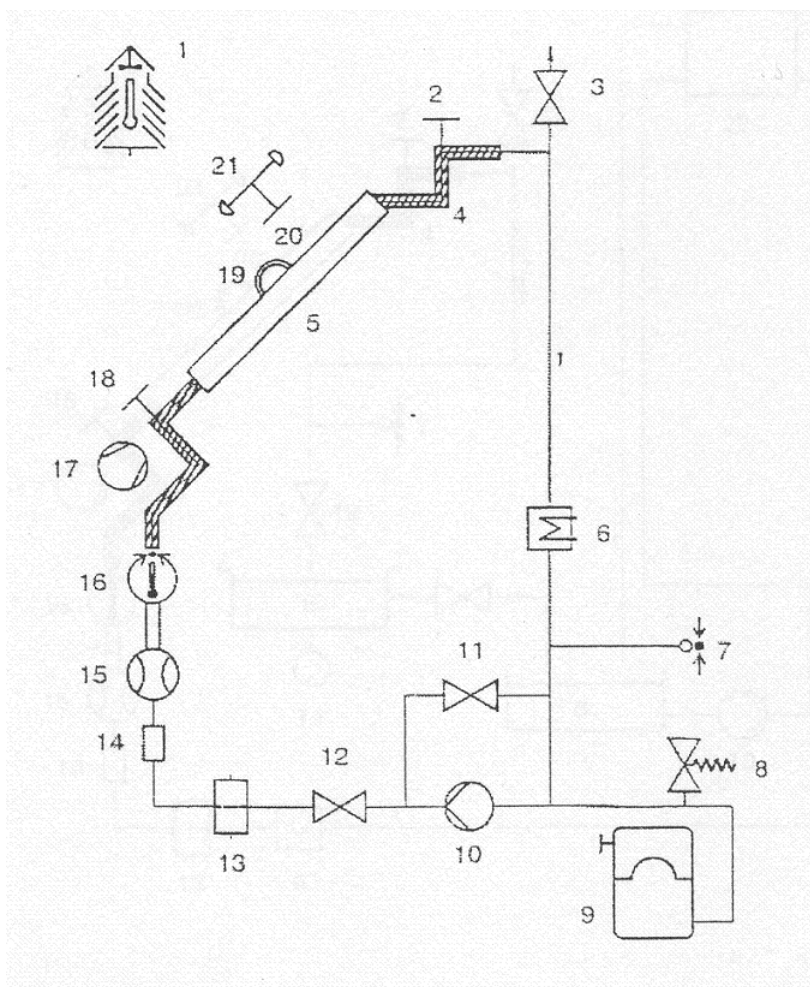


Figura 2.1- Esempio schematico del circuito di prova

Legenda

- 1 Sensore di temperatura dell'aria circostante
- 2 Sensore di temperatura (t_c)
- 3 Sfogo dell'aria (degasatore)

- 4 Tubazione isolata
- 5 Collettore solare
- 6 Riscaldatore/raffreddatore per il controllo primario della temperatura
- 7 Misuratore di pressione
- 8 Valvola di sicurezza
- 9 Vaso di espansione
- 10 Pompa
- 11 Valvola di bypass
- 12 Valvola di controllo flusso
- 13 Filtro (200 μ m)
- 14 Vetro per spiare
- 15 Flussimetro
- 16 Regolatore di temperatura secondario
- 17 Generatore artificiale di vento
- 18 Sensore di temperatura (t_{in})
- 19 Pirgeometro
- 20 Piranometro
- 21 Anemometro

Il fluido termovettore usato per testare i collettori può essere acqua oppure un fluido raccomandato dai costruttori del collettore. Il calore specifico e la densità del fluido devono essere noti ed entro $\pm 1\%$ del range delle temperature del fluido usato durante le prove. La portata massica o volumetrica del fluido termovettore dovrà essere la stessa per tutta la durata della sequenza di prova adottata per determinare la curva di efficienza termica, la costante di tempo e l'angolo d'incidenza modificati per un dato collettore. Le tubature utilizzate nel circuito del collettore devono essere resistenti alla corrosione e adatti per temperature superiori a 95 °C; la lunghezza dei tubi in generale dovrebbe essere contenuta.

La pompa del fluido dovrà essere posta in un punto del circuito di prova tale che il calore da essa dissipato nel fluido non alteri il controllo della temperatura di ingresso nel collettore o le misure dell' aumento di temperatura attraverso il collettore. Con alcuni tipi di pompa, un semplice circuito di bypass e il controllo manuale di una valvola a spillo può

garantire un adeguato controllo del flusso. Dove necessario, deve essere aggiunto un adeguato sistema di controllo del flusso per stabilizzare la portata massica.

La pompa ed il controllore del flusso dovranno essere capaci di mantenere la portata massica o volumetrica attraverso il collettore stabile entro $\pm 1\%$ nonostante le variazioni di temperatura, ed ogni temperatura in ingresso deve essere scelta nell'intervallo di funzionamento.

Il circuito di prova del collettore dovrà essere in grado di mantenere costante la temperatura di ingresso al collettore e ogni livello di temperatura all'interno dell'intervallo di funzionamento. Il tasso di captazione dell'energia nel collettore è dedotto misurando i valori istantanei della temperatura del fluido in ingresso ed in uscita, da ciò consegue che piccole variazioni nella temperatura di ingresso portano ad errori nella stima della efficienza di captazione. E' particolarmente importante evitare qualsiasi alterazione della temperatura d'ingresso.

I circuiti di prova possono contenere due stadi di controllo della temperatura in ingresso; il controllo primario della temperatura dovrebbe essere posizionato a monte del flussometro e del controllore di flusso. Un regolatore secondario della temperatura dovrebbe essere usato per aggiustare la temperatura proprio prima di entrare nel collettore. Questo controllo secondario non dovrebbe essere usato per correggere la temperatura del fluido di più $\pm 2K$.

2.5 CONDIZIONI DI PROVA

Al momento della prova, l'irraggiamento solare totale sul piano di apertura collettore potrà variare, ma solo i dati acquisiti con livello di irraggiamento non inferiore a 300 Wm^{-2} saranno inclusi nell'insieme di dati per l'identificazione dei parametri. Livelli di irraggiamento sotto 300 Wm^{-2} sono necessari per le misure di elevati IAM così come per la dipendenza dalla radiazione diffusa.

Il valore medio della velocità dell'aria circostante, durante il periodo di prova, dovrà essere compreso tra 1ms^{-1} e 4ms^{-1} . Generatori di vento possono essere usati se necessario per raggiungere velocità del vento sufficienti.

A meno che non diversamente specificato, la portata di fluido dovrà essere regolata a 0.02 Kgs^{-1} per metro quadro di area di riferimento del collettore. Tale portata dovrà essere tenuta stabile entro $\pm 1\%$ del valore durante ciascun periodo di prova, e non dovrà variare oltre $\pm 10\%$ tra un periodo di prova e l'altro.

Misure di differenze di temperatura del fluido inferiori a 1.0 K non dovranno essere incluse nei risultati della prova, a causa degli annessi problemi di precisione dello strumento.

Siccome il metodo quasi-dynamic test è basato sulla minimizzazione dell'errore sulla potenza in uscita dal collettore (non dell'efficienza come nelle prove in stazionario) l'errore relativo delle differenze minime di temperatura del fluido non sarà più una causa di problema. Perciò la limitazione a 1.0 K della differenza di temperatura può essere rimossa in una revisione della norma e maggiori dati da ciascuna prova giornaliera potranno essere utilizzati.

In nessun caso periodi con uscite negative del collettore dovrebbero essere inclusi.

Periodi con uscite negative possono essere inclusi in una successiva versione. L'inclusione può infatti ridurre il tempo necessario per la prova, utilizzando il periodo notturno per la misura delle perdite di calore. Tuttavia, il metodo permette di identificare le perdite di calore separatamente per il giorno e per la notte. Tale aggiunta può già essere fatta per ragioni di comparazione e come ulteriore conferma.

2.6 PROCEDURA DI PROVA

Il collettore dovrà essere testato sul suo intervallo di temperature di funzionamento in condizioni all'aperto allo scopo di determinare la sua curva di efficienza. I dati puntuali che soddisferanno le richieste date qui di seguito saranno ottenuti per almeno 4 temperature del fluido in ingresso equamente distanziate sull'intervallo di temperature di funzionamento del collettore.

Una temperatura di ingresso dovrà essere scelta in modo tale che la temperatura media del fluido nel collettore stia entro ± 3 K della temperatura dell'aria ambiente attorno al mezzogiorno solare, al fine di ottenere una accurata determinazione di η_0 . La temperatura di ingresso dovrà essere tenuta sopra il punto di rugiada, così da evitare problemi di condensazione di acqua sull'assorbitore, diversamente otterremo risultati errati nella prova.

Le condizioni del tempo devono essere come descritte in seguito per GIORNO TIPO 1 e 2.

La seconda e la terza temperatura di ingresso dovranno essere scelte, così che la temperatura media del fluido nel collettore sia equidistante dal limite inferiore e superiore dell'intervallo della temperatura di funzionamento, come misurate al mezzogiorno solare.

A seconda del tipo di collettore, la più alta temperatura del fluido in ingresso dovrà essere scelta così che la temperatura di uscita del collettore sia circa:

- collettori per la preparazione di acqua calda domestica: $t_a + 60\text{ °C}$
- collettori per riscaldamento residenziale $t_a + 70\text{ °C}$
- collettori per piscine $t_a + 15\text{ °C}$
- collettori per processi di riscaldamento $t_a + 90\text{ °C}$

Le condizioni del tempo devono essere come descritte in seguito per GIORNO TIPO 4.

Il cambio di temperatura in ingresso deve essere fatto dopo ciascun giorno di prova o quando la sequenza è terminata. I dati registrati durante questi periodi di “step-change” (cambiamenti a scatti) non devono essere inclusi nei dati della prova. La temperatura di ingresso dovrà essere tenuta stabile entro $\pm 1\text{ K}$ durante ciascun giorno di prova o sequenza di prova. Se le condizioni della prova lo permettono, un uguale numero di dati dovrà essere preso prima e dopo il mezzogiorno solare per ogni temperatura del fluido in ingresso.

Durante una prova, le misure dovranno essere fatte come specificato in seguito, i dati possono quindi essere usati per identificare i periodi di prova dai quale poter trarre dati soddisfacenti.

2.7 MISURE E ACQUISIZIONE DATI

Devono essere effettuate le seguenti misure:

- area di apertura A_a , area assorbitore A_A e area lorda del collettore A_G ;
- capacità di fluido;
- radiazione solare globale sull'apertura del collettore;
- radiazione solare diffusa sull'apertura del collettore;
- radiazione ad elevata lunghezza d'onda incidente sull'apertura del collettore;
- angolo di incidenza della radiazione solare diretta (o determinato tramite calcolo);
- l'azimuth e angolo di incidenza dell'apertura collettore (precisione $\pm 1^\circ$);
- velocità aria circostante;
- temperatura aria circostante;
- temperatura del fluido termovettore all'ingresso collettore;
- temperatura del fluido termovettore all'uscita collettore;
- portata del fluido termovettore.

Frequenza di campionamento: 1 – 6 secondi

Intervalli su cui fare media: 5 – 10 minuti

Ciascuna linea di dati (archivio) dovrà contenere un'unica etichetta di tempo (precisione: ± 1 minuto), dando la possibilità di calcolare l'angolo di incidenza della radiazione solare sul collettore per ciascuno di tali linee di dati (periodi di tempo).

Nell'archivio dei dati, utilizzando lo stesso ritmo ed intervallo di campionamento, devono essere anche inclusi:

- la potenza utile in uscita dal collettore;
- la derivata rispetto al tempo della temperatura media del fluido t_m nel collettore.

2.8 PERIODO DI PROVA

La sequenza di prova raccomandata consiste in 4-5 giorni. Il numero effettivo dei giorni, così come in tutte le prove sui collettori, dipenderà dalle reali condizioni atmosferiche sul sito di prova. I dati registrati dovranno contenere dati equivalenti a tutte le importanti normali condizioni di funzionamento (un intervallo abbastanza variabile e dinamico), per dare parametri del collettore indipendenti. Questo si fa in maniera simile al metodo stazionario, ossia variando la temperatura di ingresso del collettore all'interno dell'intervallo per il quale è progettato. Se dopo 4-5 giorni i dati raccolti sono sufficienti, dovrà essere valutato per ciascun giorno di prova, seguendo le linee guida date qui di seguito:

Descrizione dei giorni di prova:

a) Giorno tipo 1

Misura sotto η_0 -conditions come specificato precedentemente e condizioni per lo più di cielo chiaro

b) Giorno tipo 2

Misura sotto η_0 -conditions come specificato precedentemente e condizioni di parziale nuvolosità (incluse nuvole frammentate)

c) Giorno tipo 3 (1 o 2 giorni)

Misura sotto condizioni di temperatura di funzionamento media come precedentemente specificato e condizioni di parziale nuvolosità, incluse nuvole frammentate così come condizioni di cielo chiaro.

d) Giorno tipo 4

Misura sotto condizioni di temperatura di funzionamento elevata come specificato precedentemente e condizioni di parziale nuvolosità, incluse nuvole frammentate così come condizioni di cielo chiaro.

L'ordine relativo dei differenti giorni di prova non è cruciale, ma può essere adattato alle reali condizioni del tempo sul sito di prova.

Può effettuarsi una prova (facoltativa) per la stima della dipendenza dall'angolo di incidenza. Se si effettua tale prova sarà necessario un ulteriore giorno di prova. Durante questo giorno, il collettore sarà testato ad un altro angolo di incidenza richiesto e ad elevata temperatura di funzionamento (Giorno tipo 4). Questi dati aggiuntivi possono essere valutati con un MLR esteso, insieme con tutti gli altri parametri del collettore e allo stesso istante.

2.8.1 VERIFICA DELLA BONTÀ DI ADATTAMENTO DEI DATI

Qui di seguito, sono date le linee guida per valutare l'adattabilità dei dati registrati. Per ragioni di chiarezza, molte specifiche sono date sotto forma di diagrammi stilizzati, mostrandoti importanti relazioni tra le diverse condizioni di prova, inclusi gli intervalli dinamici, che dovrebbero essere nei dati per raggiungere affidabili e indipendenti parametri del collettore. Questi diagrammi dovranno essere tracciati per valutare la bontà dei dati della prova usati per la determinazione dei parametri e dovranno essere inclusi nel rapporto della prova.

a) Giorni di prova, tipo 1 e 2: bassa temperatura di funzionamento

Misurando i dati da questa sequenza di prova, si otterranno tutte le informazioni necessarie per la determinazione di $F'(\tau\alpha)_{en}$, K_{0d} e $K_{0b}(\theta)$. Sufficienti dati dovrebbero essere ottenuti in 1-2 giorni di prova.

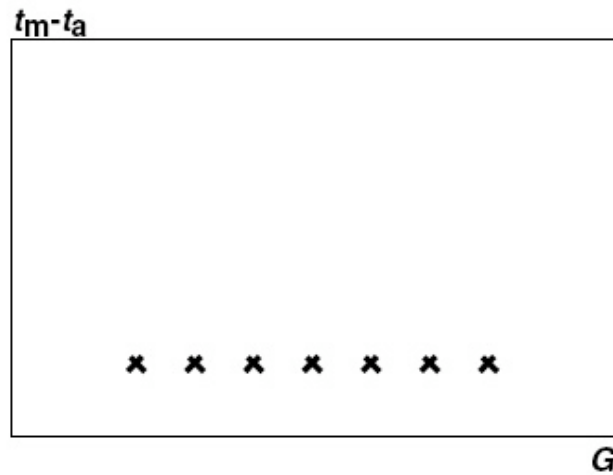


Figura 2.2- Andamento corretto di $(t_m - t_a)$ rispetto a G^* in giorno di prova TIPO 1 e 2

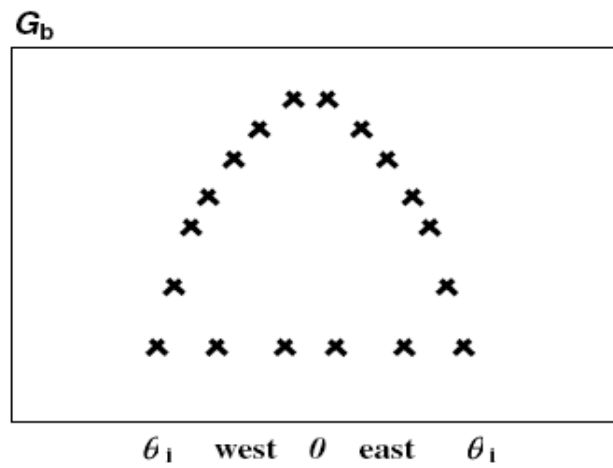


Figura 2.3- Andamento corretto di G_b rispetto a θ_i in giorno di prova TIPO 1 e 2

NOTA I dati misurati con elevati valori di G_b (curva sopra), daranno $K_{\theta b}(\theta)$. I valori più bassi daranno $K_{\theta d}$.

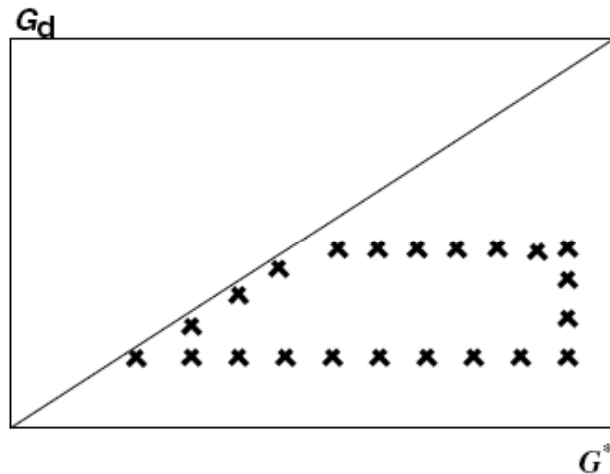


Figura 2.4- Andamento corretto di G_d rispetto a G^* in giorno di prova TIPO 1 e 2

Matematicamente espressi, i valori della relazione G_d / G^* , dovrebbero essere nell'intervallo da 0.5 a 0. Questa limitazione è stata fatta qui per adattare i dati alle specifiche dello stato-stazionario. In pratica questo significherà, che i dati della prova dovrebbero essere selezionati e la durata reale del periodo di prova aumentata.

b) Giorno di prova, tipo 3: temperatura di funzionamento media

I dati misurati da questa sequenza di prova, insieme con i dati ottenuti con il giorno di prova tipo 4, daranno tutte le necessarie informazioni per la determinazione delle perdite di calore del collettore, inclusa la dipendenza dalla velocità del vento.

Ogni periodo con uscita negativa dovrebbe essere escluso dai dati della prova.

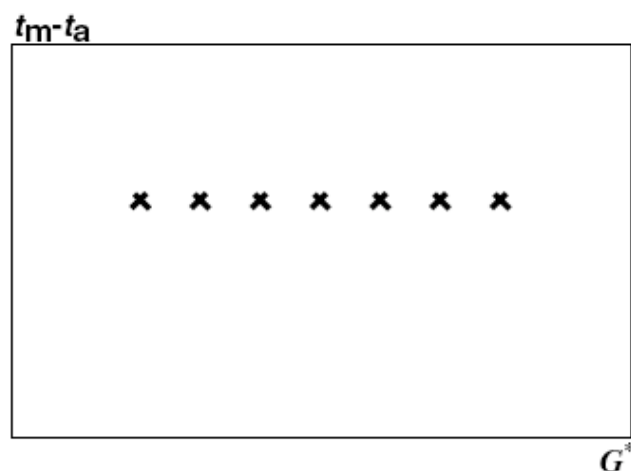


Figura 2.5- Andamento corretto di $(t_m - t_a)$ rispetto a G^* in giorno di prova TIPO 3

c) Giorno di prova, tipo 4: temperatura di funzionamento elevata

I dati misurati da questa sequenza di prova, insieme con i dati ottenuti con il giorno di prova tipo 3, daranno tutte le necessarie informazioni per la determinazione delle perdite di calore del collettore, inclusa la dipendenza dalla velocità del vento. Ogni periodo con uscita negativa dovrebbe essere escluso dai dati della prova.

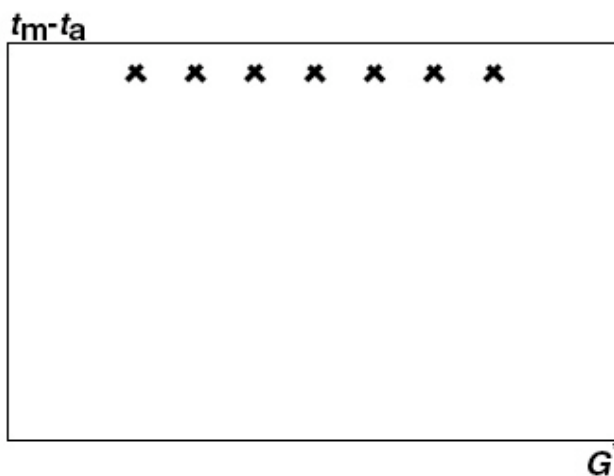


Figura 2.6- Andamento corretto di $(t_m - t_a)$ rispetto a G^* in giorno di prova TIPO 4

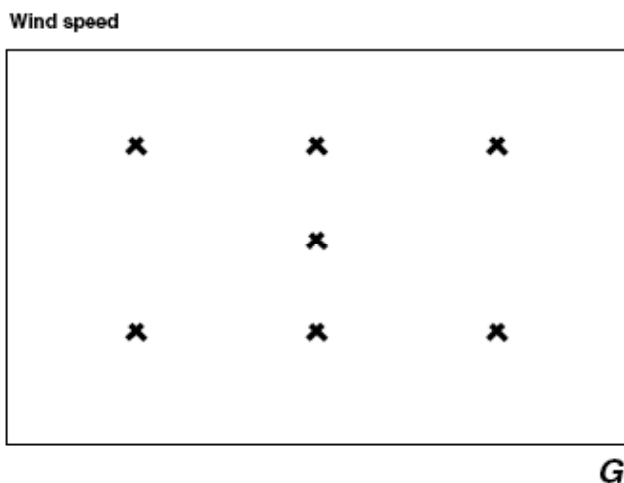


Figura 2.7- Andamento corretto della velocità del vento rispetto a G^* in giorno di prova TIPO 4

2.8.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI DELLA PROVA

I risultati della prova dovranno essere presentati in un rapporto utilizzando i formati di foglio dati nell'allegato D e nell'allegato F e con il testo e i contenuti aggiustati in accordo con ciò che è specificato nella norma. Le misure dovranno essere unite per produrre un set di dati, che incontra le richieste delle condizioni di prova e prevede sufficienti informazioni nei dati della prova. In aggiunta a quanto dato in allegato D ed in quello F, i dati misurati usati per la determinazione dei parametri del collettore dovranno essere presentati in 6 diagrammi, come descritto nelle sei figure qui sopra. Un settimo diagramma, mostrante l'uscita misurata del collettore rispetto all'uscita del modello, dovrà anche essere incluso nel rapporto scritto. Il settimo diagramma dovrà includere tutti i dati di prova usati per l'identificazione dei parametri nel primo diagramma. L'angolo di incidenza non normale (IAM) e $K_{\theta b}(\theta)$, dovranno essere presentati in un ottavo diagramma come indicato nella norma per le prove in transitorio.

In aggiunta ai coefficienti di prestazione del collettore come richiesto dagli allegati D o F, l'intera serie dei coefficienti di prestazione quasi dinamici come identificati dalla equazione del modello collettore, dovrà essere incluso nel rapporto scritto. Nel rapporto scritto sintetico, allegato E o G della norma, questi coefficienti dovranno sostituire quelli dati per la prova in stato-stazionario.

2.8.3 IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI E CALCOLO DELLA POTENZA UTILE IN USCITA

La Regressione Lineare Multipla (MLR), è un metodo matriciale molto veloce non iterativo, questo è disponibile in molti pacchetti di software standard con funzioni statistiche, come fogli di calcolo o più specifici programmi statistici come MINITAB o SISS. Lineare, in questo caso significa che il modello deve essere scritto come una somma dei termini con i parametri p_n come moltiplicatori di fronte ai termini.

Per esempio:

$$Y(\text{out}) = p_0 + p_1 * f(x_1, x_2) + p_2 * g(x_1, x_3, x_4) + p_3 * h(x_2, x_5) \quad (2.11)$$

I sotto modelli $f(x, \dots)$ $g(x, \dots)$ $h(x, \dots)$ in ciascun termine possono essere estremamente non-lineari.

Il metodo MLR permette liberamente complete selezioni di dati dall'archivio, in accordo con ogni specifica di prova, prima di applicare MLR stesso per l'identificazione dei parametri.

Questa selezione può essere fatta dopo le misure in pochi giorni.

2.8.4 PRESENTAZIONE GRAFICA DEI RISULTATI DELLA PROVA

Per uniformarsi con la presentazione dei risultati della prova in stazionario, i risultati dovranno essere presentati nella forma di una funzione di efficienza ed una curva di efficienza, che saranno calcolate dalla funzione seguente (ottenuta a partire dall'equazione del modello collettore):

$$\eta = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta) \frac{G_b}{G^*} + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta d} \frac{G_d}{G^*} - c_6 u \frac{G^*}{G^*} - c_1 (t_m - t_a) +$$

$$- c_2 (t_m - t_a)^2 - c_3 u (t_m - t_a) + \frac{c_4 (E_L - \sigma T_a^4)}{G^*} - c_5 (dt_m / dt) \quad (2.12)$$

usando una irradianza globale $G^* = 800 \text{ Wm}^{-2}$ ed una frazione di diffusa del 15%. La derivata dt_m/dt è posta pari a 0 e l'angolo di incidenza $\theta=15^\circ$ per adattarsi alle condizioni stazionarie di funzionamento attorno al mezzogiorno solare. Se si vuole tener conto dell'influenza della velocità del vento sulle perdite termiche e sul rendimento ottico ($c_3 > 0$ e $c_6 > 0$), per i collettori vetrati, la velocità del vento u deve essere posta pari a 3 ms^{-1} . Se infine si vuole tener conto anche dello scambio termico infrarosso ($c_4 > 0$), nel modello deve essere posto $(E_L - \sigma T_a^4) = -100 \text{ Wm}^{-2}$. Le definizioni delle aree di riferimento per diversi collettori sono date nell'allegato I. La presentazione grafica dei risultati della prova per i collettori non vetrati è invece descritta nell'allegato F.

Con le ipotesi fatte sopra la curva di efficienza potrebbe avere la seguente equazione:

$$\eta = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta) 0,85 + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta d} 0,15 - c_6 3 - c_1 (t_m - t_a) +$$

$$- c_2 (t_m - t_a)^2 - c_3 3 (t_m - t_a) - \frac{c_4 100}{800} \quad (2.13)$$

2.8.5 CAPACITÀ TERMICA EFFETTIVA

La capacità termica effettiva $(mc)_e$ e la costante di tempo del collettore sono parametri importanti che determinano le sue prestazioni nel transitorio. Un collettore può opportunamente essere considerato come una combinazione di masse, ciascuna ad una differente temperatura. Quando un collettore è in funzione, ciascun suo componente risponde differentemente ad un cambiamento nelle condizioni di funzionamento, così risulta comodo considerare una capacità termica effettiva per tutto il collettore.

La determinazione di c_5 (vedi equazione modello collettore) richiede una variazione abbastanza ampia del termine dt_m/dt . Nella prova, tenuto conto che la temperatura d'ingresso risulta fissata a causa della richiesta di compatibilità con le specifiche, ciò può solo essere raggiunto grazie a variazioni nel livello di radiazione.

La capacità termica effettiva, modellata come c_5 ed uguale a $(mc)_e$, rappresenta una parte obbligatoria del “modello collettore”, e deve essere identificata simultaneamente insieme a tutti gli altri parametri del collettore. E' essenziale avere una variabilità della radiazione solare abbastanza ampia durante la prova così che gli effetti della capacità termica siano significativi. I giorni di prova caratterizzati da condizioni di cielo parzialmente nuvoloso indurranno sufficiente variabilità al termine dt_m/dt indispensabile per la determinazione di c_5 (dt_m/dt dovrebbe superare ± 0.005 K/s durante il giorno parzialmente nuvoloso). Se ciò non avvenisse durante il periodo di prova, un ulteriore giorno di tipo 2, con condizioni di cielo parzialmente nuvoloso, dovrebbe essere aggiunto ai dati usati per l'identificazione.

2.8.6 ANGOLO DI INCIDENZA NON NORMALE DEL COLLETTORE

Gli angoli di incidenza non normali del collettore (IAM), modellati come $K_{\theta_b}(\theta)$ per la radiazione diretta e come K_{θ_d} per la radiazione diffusa, sono parti obbligatorie del modello collettore. Questi sono identificati simultaneamente insieme con tutti gli altri parametri del collettore.

La dipendenza dell'*Incidence Angle Modifier* della componente diretta dall'angolo di incidenza θ è espresso dalla relazione:

$$K_{\theta_b}(\theta) = 1 - b_0((1/\cos \theta) - 1) \quad (2.14)$$

Come e.g. suggerito in ASHRAE 93-2003.

2.8.7 PERDITA DI PRESSIONE ATTRAVERSO IL COLLETTORE

Il fluido usato nel collettore per la prova dov'essere acqua o una miscela acqua-glicole (60:40), o una miscela raccomandata dal produttore. La temperatura del fluido dov'essere pari a 20 ± 2 °C.

Il fluido termovettore dove fluire dal basso verso l'alto.

Il fluido dov'essere controllato per assicurarsi che sia pulito. Il collettore dov'essere spurgato dall'aria per mezzo di una valvola di spillamento-aria o mediante altri mezzi idonei, come, ad esempio, quello di aumentare la portata per un breve periodo di tempo per forzare l'aria ad uscire dal collettore.

La caduta di pressione tra le connessioni di ingresso e di uscita del collettore dov'essere determinata per portate che coprono un intervallo verosimile del reale funzionamento. In assenza di specifiche portate raccomandate dal produttore, la misura della caduta di pressione dovrà essere fatta sull'intervallo di portate da 0.005 Kgs^{-1} a 0.03 Kgs^{-1} per metro quadrato di area del collettore.

Devono essere effettuate almeno cinque misurazioni per valori di portata uniformemente distanziati sull'intervallo considerato.

Devono essere misurate le seguenti grandezze:

- a) la temperatura del fluido all'ingresso collettore;
- b) la portata di fluido;
- c) la perdita di pressione del fluido termovettore tra le connessioni di ingresso e di uscita collettore.

Durante l'esecuzione della prova la portata di fluido dov'essere mantenuta costante entro ± 1 % del valore nominale e la temperatura del fluido termovettore entro ± 5 K dal valore nominale. La prova dev'essere condotta con il collettore che si trova ad una temperatura compresa entro ± 10 K da quella dell'aria circostante. Prove a diverse temperature possono essere eseguite quando viene utilizzato olio come fluido termovettore.

La perdita di pressione dovrà essere rappresentata graficamente come una funzione della portata, per ciascuna delle prove effettuate, usando fogli nel formato dato nell'allegato D della norma.

2.8.8 IL MODELLO QDT SEMPLIFICATO

Per i collettori privi di copertura è obbligatorio l'utilizzo del modello nella sua completezza; per gli altri tipi di collettori devono essere invece utilizzati e presentati tutti quei parametri il cui "T-ratio", ovvero il rapporto tra valore del parametro e la deviazione standard del valore del parametro stesso, è più grande di 2. In base a tale considerazione, nel caso di collettore vetrato, trascurando gli effetti delle velocità del vento e delle perdite per irraggiamento ad elevata lunghezza d'onda, possono essere determinati ed utilizzati i seguenti parametri:

- $F'(\tau\alpha)_{en}$
- $K_{\theta b}$
- $K_{\theta d}$
- c_1
- c_2
- c_5

Si noti che la determinazione di questi parametri è obbligatoria per tutti i tipi di collettore. In tal caso il collettore viene descritto dalla seguente equazione semplificata:

$$q_u = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta) G_b + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta d} G_d + c_1(t_m - t_a) - c_2(t_m - t_a)^2 - c_5 (dt_m / dt) \quad (2.15)$$

2.9 METODO ASHRAE

La norma ASHRAE fornisce indicazioni dettagliate per le procedure di rilevazione della costante di tempo, dell'efficienza e dell'*Incidence Angle Modifier*.

La prima edizione (ASHRAE standard 93-77) è stata approvata ed adottata nel 1977 dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) e rappresenta tuttora uno standard di riferimento. Tale standard ha subito una prima revisione nel 1986 (ASHRAE standard 93-86) ed una seconda revisione con alcune modifiche nel 2003 (ASHRAE 93-2003).

2.9.1 DETERMINAZIONE DELLA COSTANTE DI TEMPO

Per la determinazione della costante di tempo, lo standard propone due modalità. Nella prima metodologia si mantiene la temperatura del fluido all'ingresso del collettore costante entro $\pm 1^\circ\text{C}$ della temperatura ambiente, adottando una portata di $0,02 \text{ kgs}^{-1}\text{m}^{-2}$. È richiesto il raggiungimento di condizioni semistazionarie con una irradianza solare incidente di almeno 790 Wm^{-2} . Si riduce poi improvvisamente a zero la radiazione solare incidente, orientando il collettore verso Nord, o schermandolo. Deve essere registrata la temperatura del fluido all'uscita del collettore finché:

$$\frac{t_{f,u(T)} - t_{f,i}}{t_{f,u(0)} - t_{f,i}} < 0,30 \quad (2.16)$$

In base alla seconda metodologia la prova si esegue invece con collettore schermato (o di notte), inviando il fluido nel collettore ad una temperatura più alta di 30°C rispetto alla temperatura ambiente. Il fluido viene fatto circolare con la portata sopra specificata fino a quando viene registrata all'uscita una temperatura costante. A questo punto si porta improvvisamente la temperatura all'ingresso entro $\pm 1^\circ\text{C}$ della temperatura ambiente. Si registra la temperatura d'uscita fino a quando non risulta verificata la (2.16).

In entrambi i metodi, la *costante di tempo* è rappresentata dall'intervallo di tempo τ necessario affinché sia verificata la condizione:

$$\frac{t_{f,e(\tau)} - t_{f,i}}{t_{f,e(0)} - t_{f,i}} = 0,368 \quad (2.17)$$

La seconda metodologia è più complicata, ma ovvia all'inconveniente della prima metodologia di richiedere flussi solari piuttosto elevati.

2.9.2 TEST DI EFFICIENZA

L'efficienza del collettore viene determinata ad incidenza normale: l'angolo di incidenza deve essere mantenuto in un range che comporti una variazione dell'IAM inferiore al $\pm 2\%$. La radiazione solare deve essere sempre maggiore di 790 Wm^{-2} ($\pm 32 \text{ Wm}^{-2}$) con una frazione di diffusa inferiore al 20% della globale. I test vanno eseguiti per

quattro diverse temperature di ingresso del fluido nel collettore: i valori di $t_{f,i}$ vanno determinati ponendo $(t_{f,i} - t_a)$ pari a 0%, 30%, 60% e 90% di $(t_{f,i(\max)} - t_a)$, dove $t_{f,i(\max)}$ rappresenta la temperatura massima compatibile imposta dal costruttore. Per ognuna di queste temperature di ingresso vanno realizzate quattro misure di efficienza: due al mattino e due al pomeriggio in posizione simmetrica rispetto al mezzogiorno solare.

La valutazione dell'efficienza per ogni punto va ottenuta integrando i risultati per un periodo pari alla costante di tempo del collettore o a 5 minuti, se tale costante è inferiore a questo valore. Prima di ogni rilevazione è importante accertarsi che il collettore si trovi in condizioni quasi-stazionarie. In particolare la temperatura d'ingresso al collettore deve restare ad un valore costante per un periodo di 15 minuti prima di ogni rilevazione; durante tale periodo la temperatura esterna non deve variare di oltre $\pm 1,5$ °C.

La portata consigliata nei sistemi a liquido è di $0,02 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e di $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ per i sistemi ad aria. Nel caso in cui il costruttore indichi portate diverse come ottimali per il collettore in prova, è opportuno fare le rilevazioni con tali portate. Per ogni punto ottenuto vanno trascritti tutti i valori significativi: temperature di ingresso e di uscita del fluido, portata, caduta di pressione nel collettore, velocità e direzione del vento, radiazione solare totale incidente e frazione di radiazione diffusa. La temperatura ambiente durante la prova non deve superare i 30°C e la velocità del vento deve essere compresa tra 2,2 e 4,5 m s^{-1} .

L'efficienza, punto per punto, è calcolata mediante la relazione:

$$\eta_g = \frac{\dot{m} c_p \int_{T_1}^{T_2} (t_{f,e} - t_{f,i}) dT}{A_g \int_{T_1}^{T_2} G_t dT} = \left(\frac{A_a}{A_g} \right) F_R \left[(\tau\alpha)_e - U_L \frac{(t_{f,i} - t_a)}{G_t} \right] \quad (2.18)$$

Nella (2.18) A_a rappresenta l'area di apertura del collettore (vetrata), A_g l'area lorda, U_L il coefficiente di perdita totale e G_t l'irradiazione solare totale sul piano di apertura. La curva di efficienza è calcolata dalla retta dei minimi quadrati per i 16 o più punti sperimentali. Per collettori a concentrazione può essere preferibile tracciare una parabola dei minimi quadrati.

2.9.3 RILEVAZIONE DELLA VARIAZIONE CON L'ANGOLO DI INCIDENZA

Oltre all'efficienza ad incidenza normale è opportuno eseguire le misure con angoli di incidenza di 30°, 45°, e 60°, in modo da conoscere il comportamento del collettore nelle varie ore del giorno, soprattutto quando questo è difficilmente prevedibile come nei collettori a tubi evacuati o con riflettore.

Si tratta di ottenere con i metodi specificati al paragrafo precedente ulteriori punti di funzionamento con angoli di incidenza prossimi a quelli appena elencati.

Tre punti sono sufficienti se è possibile modificare l'angolo azimutale del collettore fino ad ottenere a piacere gli angoli di incidenza voluti. Se il collettore è rivolto necessariamente verso l'equatore sono richieste tre coppie di valori in posizione simmetrica rispetto al mezzogiorno solare con gli angoli medi di incidenza desiderati: il punto di funzionamento è la media aritmetica di ciascuna coppia. Per ogni punto la temperatura all'ingresso del collettore deve essere mantenuta entro ± 1.0 °C della temperatura ambiente. Utilizzando la definizione di *incidence angle modifier*, la (2.18) può essere scritta come:

$$\eta_g = \left(\frac{A_a}{A_g} \right) F_R \left[K_{\tau\alpha} (\tau\alpha)_{e,n} - U_L \frac{(t_{f,i} - t_a)}{G_t} \right] \quad (2.19)$$

Tenendo conto che, nel caso specifico, $t_{f,i} \approx t_a$, si ha:

$$K_{\tau\alpha} = \frac{\eta_g}{\frac{A_a}{A_g} F_R (\tau\alpha)_{e,n}} = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \quad (2.20)$$

Utilizzando l'eq. (2.20) è possibile stimare la costante b_0 con i metodi dei minimi quadrati. Per i dettagli della procedura si rinvia al paragrafo 1.2.5 del capitolo 1.

2.10 PROVE INDOOR

Le prove fin qui descritte si devono realizzare all'aperto. Esse richiedono buona uniformità delle condizioni meteorologiche con livelli di insolazione abbastanza alti e costanti nel tempo per i periodi di prova. Alle nostre latitudini ciò comporta l'impossibilità di svolgere le prove per gran parte dei mesi invernali, con difficoltà non trascurabili anche

nelle mezze stagioni. In più il fatto di dover raggiungere e mantenere condizioni di regime porta il tempo richiesto per eseguire tutte le prove anche con discrete condizioni meteorologiche attorno a 40 h con un'incidenza sensibile di costo di manodopera. E' prevista anche la possibilità di svolgere prove *indoor*. In queste prove si deve impiegare un simulatore solare da cui si richiede uno spettro di radiazione abbastanza vicino a quello del sole.

La radiazione deve raggiungere il campione di prova con un angolo di vista inferiore a 12° ed illuminarlo uniformemente. Il simulatore è attualmente ottenuto impiegando lampade ad arco allo *xenon*. Un tale simulatore costa attorno a 70.000 \$ con una vita utile delle lampade di circa 1000 ore.

Un ventilatore deve essere in grado di creare una velocità dell'aria di almeno 3,5 m s⁻¹ sulla superficie del collettore.

Le prove vengono eseguite con le stesse modalità viste per le prove all'esterno, ma, data la costanza della radiazione incidente, una volta raggiunte condizioni di regime, la misura dell'efficienza può avvenire con rilievi istantanei.

Il tempo necessario a condurre una prova completa su collettori può scendere a sole 10 ore. Una volta ridotti i costi del simulatore solare, risulterà preferibile il test indoor, vista la maggiore rapidità, oltre alla possibilità di una migliore conservazione della strumentazione e maggiore comfort per l'operatore.

2.11 PROVE DI DURATA

Oltre alle prove descritte nei paragrafi precedenti, esistono delle ulteriori prove di resistenza che necessariamente devono essere eseguite all'aperto e sono rivolte a valutare la resistenza del collettore solare agli agenti atmosferici e la conservazione nel tempo delle proprietà ottiche dei materiali impiegati.

La metodologia di prova più semplice è l'esposizione del collettore o dei materiali agli agenti atmosferici. Le proprietà ottiche dei materiali possono essere alterate dalla radiazione ultravioletta del sole. Sulla durata del collettore possono influire, altresì, la radiazione solare, la temperatura, il vento, l'umidità, le precipitazioni e le impurità dell'aria.