



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione
energetica di collettori a media temperatura e realizzazione delle
facility necessarie alla qualificazione e sperimentazione di
componenti solari a media temperatura

V. Sabatelli, D. Marano, G. Braccio

ANALISI DELLE PROBLEMATICHE CONNESSE ALLA CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DI COLLETTORI A MEDIA TEMPERATURA E REALIZZAZIONE DELLE FACILITY NECESSARIE ALLA QUALIFICAZIONE E SPERIMENTAZIONE DI COMPONENTI SOLARI A MEDIA TEMPERATURA

V. Sabatelli, D. Marano, G. Braccio (ENEA)

Settembre 2010

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi Finali

Tema: Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili

Responsabile Tema: Nicolandrea Calabrese, ENEA



**ACCORDO DI PROGRAMMA
MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO - ENEA**

Tema di ricerca 5.4.1.3

Sviluppo di componenti e impianti innovativi per la razionalizzazione dei consumi elettrici negli edifici con particolare riferimento al condizionamento estivo

Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili

Linea di attività C:

Realizzazione di Laboratori per la qualificazione di componenti e sistemi

RAPPORTO FINALE

Analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori a media temperatura e realizzazione delle facility necessarie alla qualificazione e sperimentazione di componenti solari a media temperatura

Vincenzo Sabatelli, Domenico Marano, Giacobbe Braccio

Settembre 2010

INDICE

1. INTRODUZIONE	5
1.1 Obiettivi generali della linea di attività	5
1.2 Attività previste	5
2. ATTIVITÀ SVOLTA E RISULTATI OTTENUTI	6
2.1 Analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori solari a concentrazione per applicazioni a media temperatura	6
2.1.1 Analisi delle diverse tipologie di concentratori solari	6
2.1.2 Studio delle metodiche di prova da adottare per la caratterizzazione energetica dei collettori a media temperatura	7
2.1.3 Attività preliminare di sperimentazione su collettori a media temperatura	12
2.2 Studio delle soluzioni tecniche da adottare nel dimensionamento del circuito di prova e del sistema di acquisizione dati	14
2.3 Realizzazione di una piattaforma sperimentale di caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura	21
3. CONCLUSIONI.....	25

1. INTRODUZIONE

Lo scopo principale del progetto a cui afferisce il presente rapporto è quello di favorire uno sviluppo esteso del ricorso a tecnologie avanzate di climatizzazione degli edifici.

Tale obiettivo richiede parallelamente:

- a) lo sviluppo di componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti;
- b) lo sviluppo di soluzioni tecnologiche ottimali per ciascuna condizione climatica del territorio nazionale: è infatti assodato che non tutte le tecnologie di Solar Cooling, ma anche di geotermia, possono essere applicate indifferentemente al territorio nazionale.

E' quindi opportuno analizzarne il reale funzionamento sia dei singoli componenti che degli impianti installati negli edifici "dimostratori", in modo da essere in grado di validare i modelli di ottimizzazione multi-parametrica sviluppati per poter realmente conoscere il tempo di pay-back di questi impianti di climatizzazione innovativa.

Per raggiungere tale obiettivo le attività sono state articolate in quattro linee. Il presente rapporto illustra i contenuti ed i risultati ottenuti nell'ambito della *Linea C: "Realizzazione di Laboratori per la qualificazione di componenti e sistemi"* che si è focalizzata sulla realizzazione di laboratori per la qualificazione di componenti e sistemi.

1.1 Obiettivi generali della linea di attività

Scopo principale della presente linea di attività è la realizzazione di Laboratori per la qualificazione di componenti e sistemi destinati alla climatizzazione estiva ed invernale degli edifici e basati su tecnologie innovative che utilizzano l'energia solare (sistemi di solar heating & cooling).

Data la varietà di soluzioni impiantistiche destinate alle applicazioni di solar heating & cooling che richiedono, tra l'altro, l'adozione di soluzioni tecnologiche innovative per quanto attiene la parte solare (sistemi del tipo heat-pipe di nuova generazione, sistemi a concentrazione basati su ottiche focalizzanti e non focalizzanti), risulta di particolare importanza la conduzione di attività di ricerca e sperimentazione (attraverso analisi termo-fluidodinamiche abbinate a verifiche sperimentali) su componenti commerciali e/o prototipi.

Sulla base di quanto detto, la presente linea di attività ha tra i suoi obiettivi principali la realizzazione, presso il centro ENEA di Trisaia, di un laboratorio per la caratterizzazione energetica di collettori solari a concentrazione, che costituirà una estensione di quello già esistente (accreditato ACCREDIA) che opera, da oltre 10 anni, nel campo delle applicazioni a bassa temperatura.

1.2 Attività previste

L'attività prevede una prima fase di analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori a media temperatura. Durante questa fase si procederà allo studio delle problematiche tecniche inerenti la caratterizzazione energetica di tali tipologie di collettori, definendo le metodiche di prova ed individuando le apparecchiature e strumentazioni necessarie per lo svolgimento della successiva attività di sperimentazione. Si provvederà, quindi, alla realizzazione

delle facility necessarie alla qualificazione e sperimentazione di componenti solari a media temperatura: in particolare verranno implementate le infrastrutture necessarie allo svolgimento delle attività sperimentali (circuiti termoidraulici, apparato di acquisizione e controllo, centralina meteo, ecc.) e relativo collaudo funzionale.

2. ATTIVITÀ SVOLTA E RISULTATI OTTENUTI

Nel corso del 2010, coerentemente con il piano di attività previsto, è stata realizzata presso il centro ENEA della Trisaia una piattaforma sperimentale per la caratterizzazione di collettori solari a media temperatura destinati sia alle applicazioni di climatizzazione solare elio-assistita sia per la produzione di calore di processo da utilizzare in applicazioni industriali.

Nel corso dello stesso anno si è inoltre partecipato alle attività degli organismi di normazione europea in ambito CEN per la definizione delle specifiche metodiche di prova riguardanti tale tipo di componenti solari.

Si sono inoltre svolte specifiche prove in supporto ad aziende europee e nazionali impegnate nella produzione di sistemi solari a media temperatura.

In particolare sono state condotte le seguenti attività:

- Analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori solari a concentrazione per applicazioni a media temperatura;
- Studio delle soluzioni tecniche da adottare nel dimensionamento del circuito di prova e del sistema di acquisizione dati;
- Realizzazione di una piattaforma sperimentale di caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura.

2.1 Analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori solari a concentrazione per applicazioni a media temperatura

L'analisi ha riguardato principalmente i seguenti aspetti:

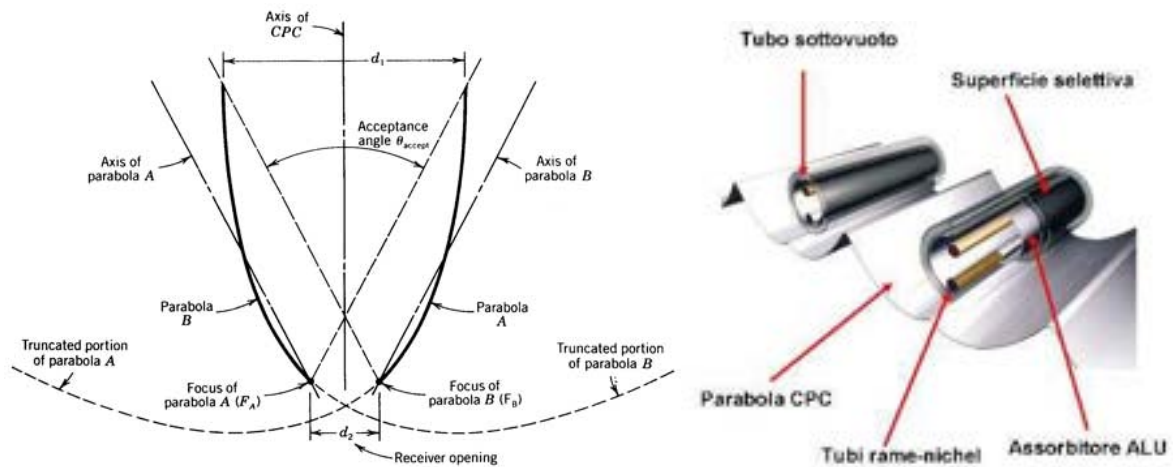
- Analisi delle diverse tipologie di concentratori solari;
- Studio delle metodiche di prova da adottare per la caratterizzazione energetica dei collettori a media temperatura;
- Attività preliminare di sperimentazione su collettori a media temperatura.

2.1.1 Analisi delle diverse tipologie di concentratori solari

La prima fase delle attività ha riguardato l'analisi delle diverse tipologie di collettori per applicazioni a media temperatura che possono suddividersi in:

- concentratori solari utilizzando sistemi ottici focalizzanti (concentratori parabolici lineari, concentratori parabolici puntuali, concentratori a specchi di Fresnel, ecc.)

- concentratori solari non focalizzanti il cui esempio più rappresentativo è il CPC (Compound Parabolic Concentrator).



Compound Parabolic Concentrator (CPC): schema + esempio di applicazione con tubi evacuati.

Da tale attività di analisi è emersa l'estrema variabilità di soluzioni componentistiche disponibili sia a livello commerciale che prototipale che si differenziano non solo per la tecnologia utilizzata per concentrare la radiazione solare ma anche per taglia e caratteristiche dei materiali utilizzati sia per il sistema ottico che per il ricevitore. Da ciò è emersa la necessità di una ampia *rangeability* in termini di portata e temperatura di lavoro che una stazione sperimentale di prova deve avere per garantire la sperimentazione sia delle diverse tecnologie commerciali attualmente disponibili sia per sperimentare prototipi attualmente in fase di sviluppo ed ottimizzazione da parte di aziende operanti nel settore, con alcune delle quali sono già in essere attività di collaborazione e supporto tecnico-scientifico allo sviluppo di nuovi prototipi.

2.1.2 Studio delle metodiche di prova da adottare per la caratterizzazione energetica dei collettori a media temperatura

L'attività ha riguardato l'analisi delle metodiche attualmente in uso per la caratterizzazione di collettori a bassa temperatura che prevedono la misura delle performance termiche sia in stato stazionario sia in regime transitorio (metodo QDT – Quasi Dynamic Test).

In particolare sono state valutate le possibili varianti da apportare a tali metodi per tener conto degli effetti introdotti dalla concentrazione della radiazione solare.

Metodo di prova in stazionario

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

\dot{Q} si calcola come:

$$\dot{Q} = mc_f \Delta T$$

L'efficienza è data dalla seguente formula:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{AG}$$

L'efficienza viene calcolata in funzione dell'area lorda, dell'area di apertura e 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:

$$T_m = T_{in} + \frac{\Delta T}{2}$$

La differenza di temperatura ridotta si calcola come:

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G}$$

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

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

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.

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 80-90°C. Se possibile il primo valore di temperatura deve essere scelto con uno scostamento massimo di $\pm 3K$ 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 pre-condizionamento 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 riportata di seguito si discosti dal suo valore medio durante il test più dei limiti indicati di seguito

Parametri sperimentali	Scarto ammesso
Radiazione solare globale	$\pm 50 \text{ W/m}^2$

Temperatura dell'aria	±1 K
Portata massica del fluido termo-vettore	±1 %
Temperatura del fluido termo-vettore in ingresso	±0.1 K

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 segue:

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

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 effettiva del collettore, denotata in seguito c_5 oppure $(mC)_e$.

Il parametro $(mC)_e$ può essere misurato o calcolato come media pesata delle capacità termiche dei componenti il collettore. Ne segue che l'equazione che descrive il comportamento dinamico del collettore basata sul metodo di prova in stato stazionario può essere scritta nel modo seguente (occorrono come detto due prove aggiuntive per implementare il modello: una per la determinazione della capacità termica, parametro c_5 , e una per la determinazione di $K_{\vartheta}(\vartheta)$):

$$Q = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\vartheta}(\vartheta)G - c_1(t_m - t_a) - c_2(t_m - t_a)^2 - c_5 dt_m / dt \quad (1)$$

Chiaramente questo modello è applicabile, a rigore, in condizioni meteo con cielo sereno 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, un separato termine correttivo, per tener conto degli effetti dell'angolo di incidenza, deve essere introdotto per la radiazione diffusa. Nella procedura del test in condizioni stazionarie, infine, per ogni punto di misura sono richieste condizioni climatiche estremamente stabili di 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.

Metodo di prova in transitorio (ODT – Quasi-dynamic test)

Nell'approccio quasi dinamico il primo termine nell'equazione (1) è diviso in due parti, l'efficienza a perdita zero ($t_m=t_a$) per la radiazione diretta e quella per la radiazione diffusa e quindi

$F'(\tau\alpha)_{en} K_{\vartheta}(\vartheta)$ è sostituito dalla somma $F'(\tau\alpha)_{en} K_{\vartheta b}(\vartheta)G_b$ e $F'(\tau\alpha)_{en} K_{\vartheta d}(\vartheta)G_d$.

Inoltre, la dipendenza della velocità del vento è modellata mediante due termini correttivi aggiunti all'equazione (1). Il primo termine tiene conto degli effetti della velocità del vento sull'efficienza a perdite nulle ($-c_6uG$).

Tale effetto è significativo per i collettori in plastica. Il secondo termine tiene conto degli effetti della velocità del vento sulle perdite termiche ($-c_3u(t_m-t_a)$).

Dopo l'aggiunta della dipendenza delle perdite termiche dalla radianza "termica" a elevata lunghezza d'onda $c_4(E_L - \sigma T_a^4)$, il modello del collettore è completo ed è riassunto dalla seguente equazione:

$$Q = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\vartheta b}(\vartheta)G_b + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\vartheta d}(\vartheta)G_d - c_6uG - c_1(t_m - t_a) + \\ - c_2(t_m - t_a)^2 - c_3u(t_m - t_a) + c_4(E_L - \sigma T_a^4) - c_5 dt_m / dt \quad (2)$$

Il significato dei coefficienti che compaiono nell'equazione (2) viene di seguito riportata:

- c_1 = coefficiente di perdita termica
- c_2 = coefficiente di perdita termica dipendente dalla temperatura
- c_3 = coefficiente di perdita termica che tiene conto della velocità del vento
- c_4 = coefficiente di perdita termica per irraggiamento ad elevata lunghezza d'onda
- c_5 = capacità termica effettiva uguale a $(mC)_e$
- c_6 = termine che tiene conto degli effetti della velocità del vento sull'efficienza a perdite nulle
- $K_{\vartheta d}$ = modificatore dell'angolo di incidenza della radiazione diffusa che è una costante del collettore
- $K_{\vartheta b}$ = modificatore dell'angolo di incidenza (IAM) per la radiazione diretta, per la cui espressione è utilizzata la relazione seguente:

$$K_{\vartheta b}(\vartheta) = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \vartheta} - 1 \right)$$

Il modello descritto nell'equazione (2) copre la maggior parte dei collettori presenti sul mercato attuale ad eccezione dei collettori integrati, collettore-accumulo (ICS).

Le condizioni di prova e le deviazioni permesse per i parametri misurati nel test in condizioni stazionarie e quello in condizioni quasi dinamiche sono elencate nella tabella seguente.

Parametri	Stazionario		Non stazionario	
	valore	variazione	valore	variazione
Radiazione solare globale G	$>700 \text{ W/m}^2$	$\pm 50 \text{ W/m}^2$	$300 < G < 1100 \text{ W/m}^2$	-
Angolo di incidenza della radiazione θ	$< 20^\circ$	-	-	-
Frazione diffusa G_d/G	$< 30\%$	-	-	-
Variazione della temperatura dell'aria t_a	-	$\pm 1 \text{ K}$	-	-
Variazione della velocità del vento u	$3 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$	-	-	-
Temperatura di ingresso nel collettore	-	$\pm 0, 1 \text{ K}$	-	$\pm 1 \text{ K}$

Fondamentalmente la necessità di dati utili è la stessa per i due tipi di approccio e perciò la sequenza raccomandata di prova può essere utilizzata anche per l'identificazione dei parametri in stato stazionario estrapolando i dati che soddisfino le limitazioni del metodo stazionario. D'altra parte il data-base della prova occorre che contenga informazioni aggiuntive per rendere possibile l'identificazione dei parametri addizionali introdotti nel modello. Facendo un confronto con la prova in stato stazionario il numero di giorni per le prove outdoor sarà lo stesso, vale a dire 4-5 giorni (dovendo effettuare la prova per quattro differenti temperature di ingresso). D'altra parte, però, in dipendenza del clima e del periodo dell'anno in cui si effettua la prova il test in stato stazionario, in generale, richiede una quantità assai maggiore di giorni soprattutto perché l'imposizione di avere un cielo sereno simmetrico rispetto al mezzogiorno rappresenta una condizione assai limitativa. In effetti la differenza maggiore tra i due metodi è che i dati, per il QDT, possono essere acquisiti nell'intera giornata come rappresentato in figura 1 mentre, nel caso stazionario, occorrono valori istantanei da raccogliere centrati rispetto al mezzogiorno solare con cielo sereno. Mediante le misure sull'intero giorno si possono inoltre ottenere informazioni sull'IAM. Al contrario della prova in stato stazionario è prescritto di acquisire dati con cielo variabile e parzialmente nuvoloso in modo da poter identificare con precisione la dipendenza della radiazione diffusa e la capacità termica del collettore. Le figure seguenti mostrano le differenze tra il metodo in stazionario e quello in transitorio sia per il periodo di tempo utile per l'acquisizione dati sia per le condizioni di prova.

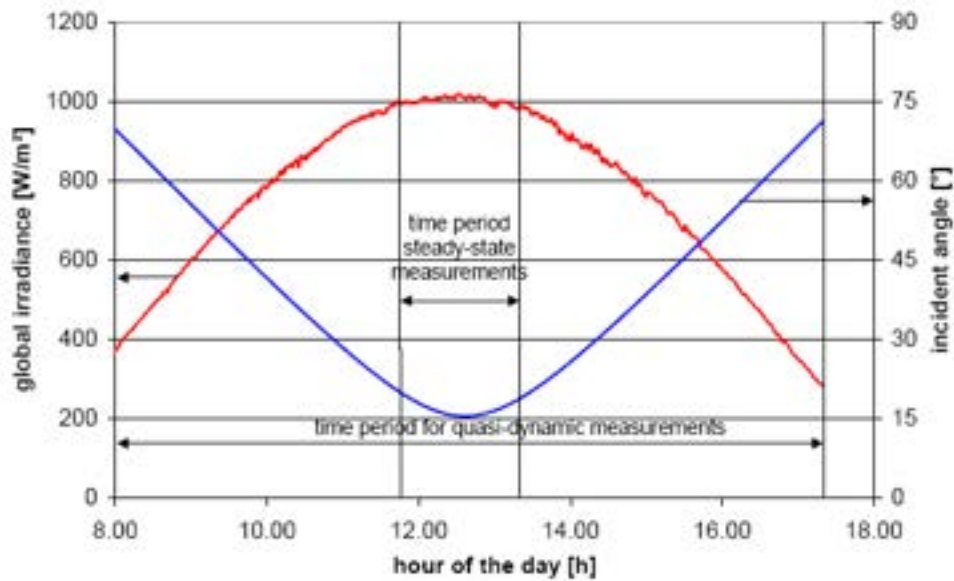


Figure 1: Acceptable time periods for steady-state and quasi-dynamic measurements on a clear day

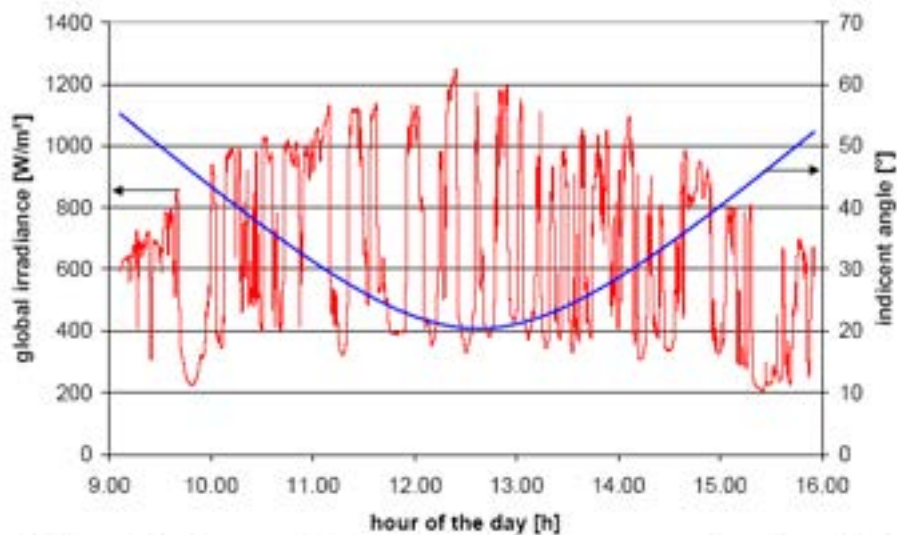


Figure 2: Time period only acceptable for quasi-dynamic measurements on a day with variable irradiance

2.1.3 Attività preliminare di sperimentazione su collettori a media temperatura

Con l'ausilio dei circuiti di prova utilizzati per la caratterizzazione di collettori a bassa temperatura e utilizzando acqua come fluido termo-vettore, si è proceduto ad eseguire un'attività di sperimentazione (parte della quale è tuttora in corso) su alcune tipologie di collettori a concentrazione per applicazioni a media temperatura.

Le foto seguenti mostrano le diverse tipologie di concentratori attualmente sotto test presso il Laboratorio solare del CR ENEA di Trisaia.



Fig. 3 – Concentratore parabolico lineare (ABSOLICON)



Fig. 4 – Concentratore lineare a specchi di Fresnel (DWA)



Fig. 5 – Concentratore parabolico puntuale (COMEX)

Tali prove preliminari hanno lo scopo di verificare e mettere a punto le metodiche di prova descritte al paragrafo precedente, in vista della caratterizzazione energetica a temperature fino a 300°C mediante l'uso di fluidi diatermici.

2.2 Studio delle soluzioni tecniche da adottare nel dimensionamento del circuito di prova e del sistema di acquisizione dati

Al fine di individuare i valori ottimali per il dimensionamento dei componenti il circuito di prova, sono state effettuate simulazioni dinamiche, mediante algoritmi sviluppati in ambiente MatLab, dei principali sottosistemi (circuito di riscaldamento, circuito di raffreddamento, ecc.) che compongono il circuito termo-idraulico.

In particolare sono state condotte simulazioni di diverse possibili configurazioni di impianto al fine sia di determinare quella che meglio rispondesse ai requisiti di stabilità, precisione a regime e basso consumo di combustibile sia per avere utili indicazioni per il dimensionamento dei vari componenti il sistema. Le simulazioni hanno riguardato sia il raffreddamento ed il riscaldamento in linea sia quello in cui si sono introdotti serbatoi di accumulo termico per smorzare le fluttuazioni delle grandezze regolate. Tale seconda opzione in termini di stabilità e precisione della regolazione si è mostrata nettamente migliore. Le simulazioni sono state effettuate scrivendo le equazioni di bilancio energetico e di massa in transitorio per i vari componenti del circuito e simulando il sistema di regolazione con controllori PID indipendenti per ogni loop di regolazione.

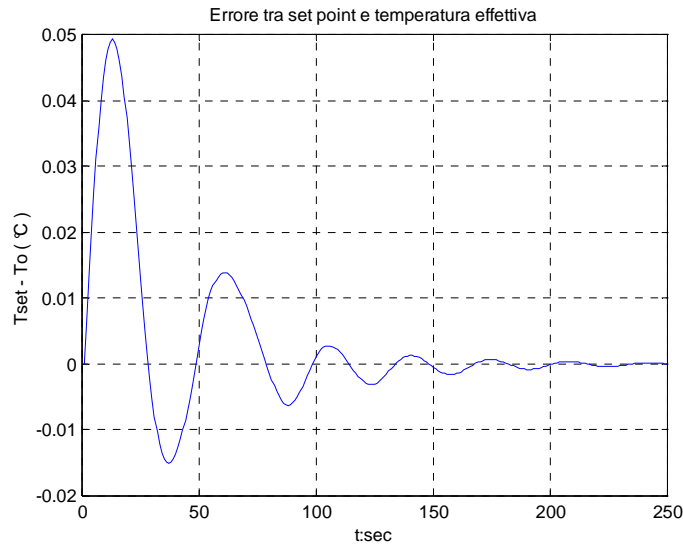


Fig. 6 – Simulazione della precisione di regolazione con controllo PID. Esempio di andamento dello scarto tra temperatura di mandata olio diatermico e valore di set-point.

Il fine principale della simulazione è stato quello di verificare i tempi di risposta del sistema nel suo complesso per portarsi in condizioni di regime una volta impostati i valori di set-point delle grandezze da controllare e la verifica, una volta raggiunto lo stato stazionario, della rispondenza entro i limiti richiesti dalla metodica di prova adottata (stabilità di temperatura entro 0.1°C , stabilità di portata entro l'1% del valore di set-point) dei valori di regime delle grandezze controllate con i valori di set-point impostati. Introducendo, inoltre, perturbazioni di tipo random si è verificata la capacità del sistema di regolazione di annullare gli effetti di tali perturbazioni.

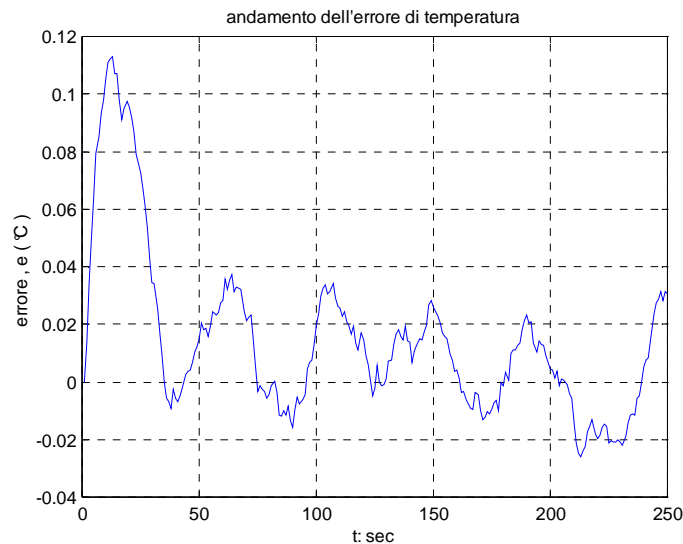


Fig. 7 – Esempio di regolazione in presenza di disturbi.

Poiché, per quanto detto sopra, per rendere maggiormente stabili le regolazioni di temperatura si sono introdotti nel circuito serbatoi fungenti da sistema di accumulo termico si è svolta una analisi

parametrica con lo scopo di determinare il volume minimo di tali serbatoi in grado di assicurare la stabilità e la precisione di regolazione richiesta.

Con le simulazioni effettuate si è inoltre verificata la capacità del sistema di adattarsi, in termini di requisiti di stabilità e precisione, alle varie condizioni di funzionamento, tenuto conto del fatto che esso dovrà lavorare con una *rangeability* estremamente elevata (temperature di lavoro comprese tra 80 e 350°C; portate di prova comprese tra 100 e 3000 kg/h). Inoltre si è verificata la capacità del sotto-sistema di raffreddamento di introdurre un abbattimento contenuto della temperatura in uscita dai collettori compatibile con la potenza termica della caldaia in quanto un raffreddamento eccessivo richiederebbe una potenza della caldaia elevata con maggiori costi sia di impianto che di esercizio (elevato consumo di combustibile) e possibili pendolazioni del sistema di regolazione. Da tale punto di vista il raffreddamento in linea con un semplice scambiatore con fluido diatermico raffreddato ad aria o acqua, si è rivelata non praticabile in quanto, specie ad elevate temperature di funzionamento, tale sistema di raffreddamento introduce una diminuzione troppo elevata della temperatura del fluido diatermico. Pertanto si è scelta l'opzione di introdurre un serbatoio inerziale e una valvola miscelatrice a tre vie in modo da raffreddare solo una parte del fluido e mediante il serbatoio livellare le fluttuazioni di temperatura. Le simulazioni condotte hanno confermato la bontà di tale scelta.

Infine, allo scopo di verificare quanto ottenuto mediante gli script di MatLab, si è proceduto alla simulazione dell'intero impianto di prova, compreso il collettore a concentrazione, mediante TRNSYS, ottenendo risultati confrontabili con quelli precedentemente illustrati.

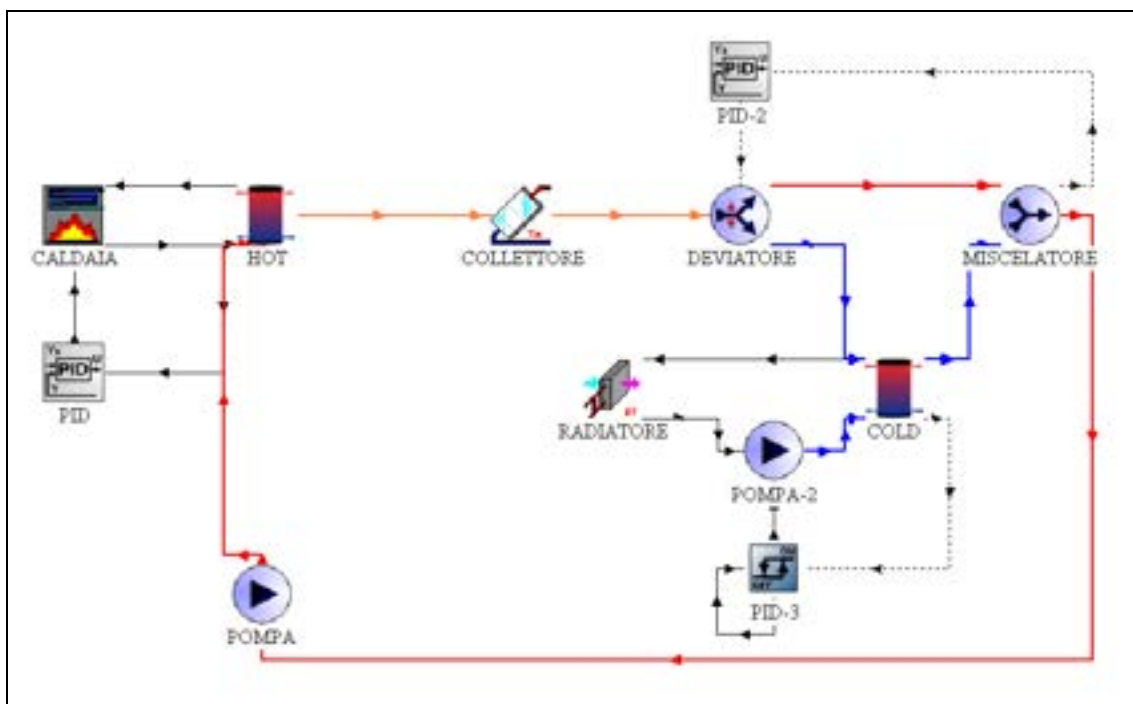


Fig. 8 – Modello TRNSYS del circuito di prova.

In base ai risultati delle simulazioni sia in ambiente MatLab che TRNSYS, si è proceduto al dimensionamento dei vari componenti il circuito termo-idraulico:

- generatore ad olio diatermico con bruciatore a GPL;
- circuito di riscaldamento del fluido termo-vettore;
- circuito di raffreddamento del fluido termo-vettore;
- componentistica termo-idraulica;
- piping e coibentazione.

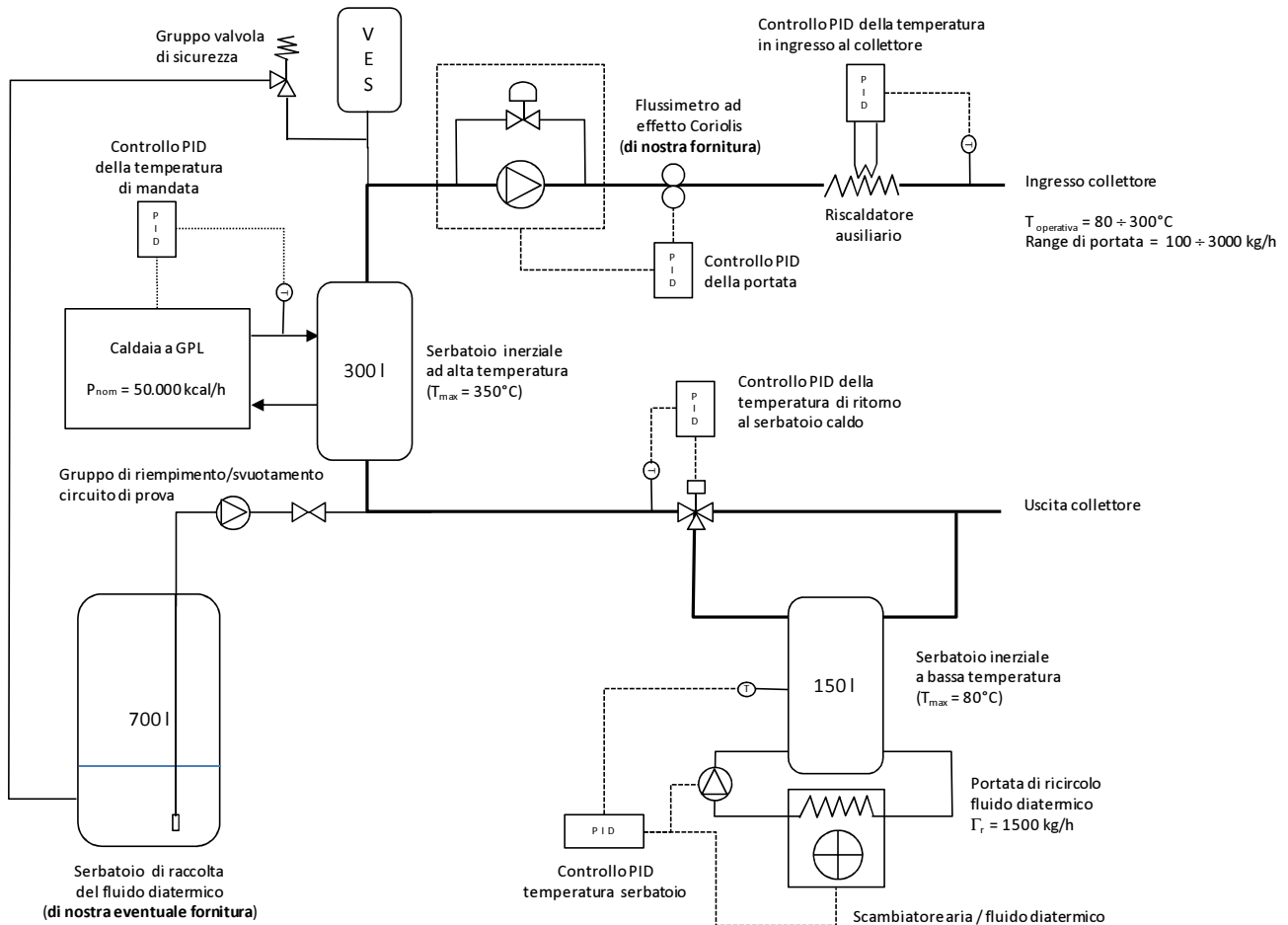


Fig. 9 - Schema a blocchi del circuito di prova

Con riferimento alla figura riportata sopra, che indica schematicamente i vari elementi che costituiscono il circuito di prova, si sono dimensionati i componenti come segue:

- per il riscaldamento del fluido diatermico nelle condizioni più gravose è risultata necessaria una caldaia della potenza di 50 kW e si è optato per una riscaldatore alimentato a GPL;
- si è scelto un serbatoio inerziale della capacità di 300 litri in grado di garantire uno smorzamento adeguato delle fluttuazioni della temperatura di mandata del fluido diatermico;
- per il sistema di raffreddamento, come accennato in precedenza, si è individuata una configurazione comprendente come componenti principali:

- uno scambiatore fluido diatermico-aria in grado di mantenere, mediante opportuna regolazione della portata d'aria allo scambiatore, una temperatura di 80-90°C in un serbatoio inerziale di 150 litri
- una valvola miscelatrice con lo scopo di raffreddare solo una parte del fluido diatermico in modo da evitare un raffreddamento eccessivo di quest'ultimo con conseguente incapacità della caldaia di assicurare il set-point desiderato della temperatura di mandata del fluido diatermico al serbatoio inerziale ad alta temperatura
- allo scopo di ottenere una regolazione fine della temperatura in ingresso al collettore e per compensare le perdite lungo la tubazione di mandata, si è inserito un sistema ausiliario di riscaldamento del fluido diatermico costituito da una resistenza scaldante della potenza di 5 kW, posizionata a ridosso dell'ingresso del collettore e munita anch'essa di controllo PID;
- per quanto riguarda, invece, la scelta del fluido-termovettore si è optato per un fluido diatermico sintetico ad alta stabilità termica (TERMINOL 66) in grado di lavorare a temperature fino a 350°C con basse pressioni di funzionamento;
- infine, per la supervisione ed il controllo dei vari parametri di processo (temperatura di mandata del fluido termo-vettore, portata di processo, temperatura di ritorno al sistema di riscaldamento, temperature dei serbatoi inerziali ad alta e bassa temperatura) si è optato per un sistema SCADA che implementa una regolazione PID indipendente per ogni grandezza controllata e che consente di controllare, attraverso un'interfaccia grafica *user-friendly* (vedi figura seguente), ogni fase del processo di prova.

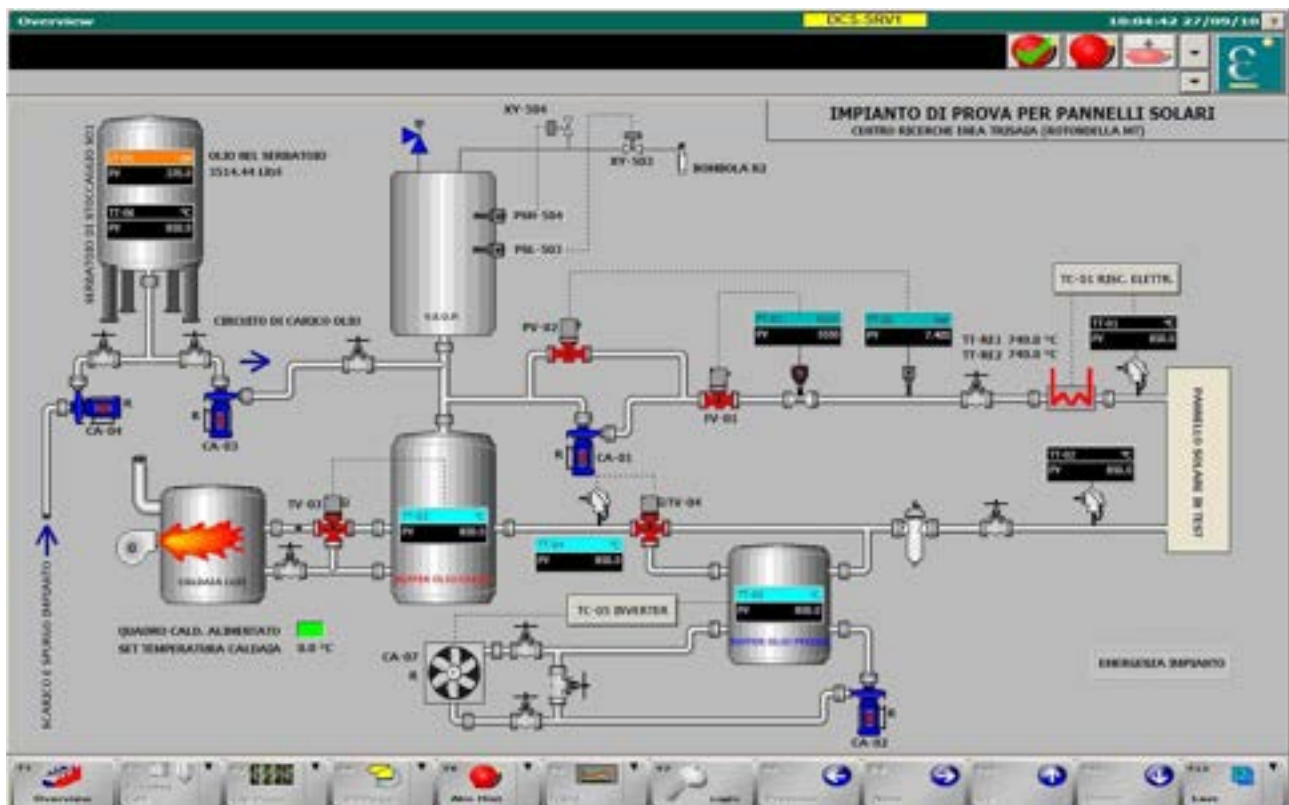


Fig. 10 - Interfaccia grafica del DCS

L'intero circuito di test è stato progettato per consentire la determinazione sperimentale dell'efficienza termica del collettore in diverse condizioni operative sia dal punto di vista meteo-climatico (per diversi angoli di incidenza della radiazione solare, per diversi valori del rapporto diffusa/globale) sia termo-fluidodinamico (differenti prove sull'intero campo operativo del collettore in termini di temperatura e portata), il tutto sotto la supervisione di un sistema di acquisizione dati dedicato, che ha la funzione di acquisire le diverse grandezze fisiche necessarie per la caratterizzazione delle performance energetiche dei collettori solari a media temperatura.

In particolare, le grandezze fisiche da monitorare sono:

- temperatura del fluido termo-vettore in ingresso al collettore in prova;
- temperatura del fluido termo-vettore in uscita al collettore in prova;
- differenza di temperatura tra uscita ed ingresso al collettore;
- portata massica del fluido termo-vettore;
- parametri meteo-climatici: radiazione solare globale, radiazione diffusa, radiazione diretta, temperatura ed umidità ambiente, velocità del vento, ecc.

Data l'accuratezza richiesta dalla metodica di prova, e sulla base dell'esperienza acquisita nella conduzione di prove su collettori a bassa temperatura, si è optato per la seguente strumentazione di misura:

- Termoresistenze Pt100 di classe A secondo IEC-751, che consentono la misura delle temperature di processo con accuratezze inferiori al 0.1°C;
- Flussimetro ad effetto Coriolis con trasmettitore 4-20 mA (Micro Motion – mod. F050), adatto per applicazioni ad alta temperatura in grado di lavorare con fluidi diatermici, e caratterizzato da alti livelli di accuratezza ($\pm 0.1\%$ del valore letto) nella misura della portata massica;
- Sensori per la misura della radiazione solare, costituiti da un piranometro (Kipp&Zonen – mod. CMP11 - classe “secondary standard” secondo ISO 9060) per la misura della radiazione globale e da un pireliometro (Kipp&Zonen – mod. CHP1 - classe I secondo ISO 9060) per la misura della radiazione diretta;
- Sensori per il monitoraggio dei parametri meteo-climatici (termo-igrometro, anemometro, pluviometro).

Le figure seguenti mostrano le foto di parte della strumentazione acquisita.



(a) – Flissimetro ad effetto Coriolis per alte temperature (Micro Motion – mod. F050)



(b) - Piranometro Kipp&Zonen – mod. CMP11



(c) - Pireliometro Kipp&Zonen – mod. CHP1



(d) – Sensore di temperatura – mod. Pt100 a 4 fili



(e) – Sensore termo-igrometrico (VAISALA)

Fig. 11 – Immagini di alcuni degli strumenti in dotazione

Infine, al fine di acquisire i vari dati di processo con i livelli di accuratezza richiesti dal metodo di prova, è stato dimensionato un sistema di acquisizione dati (della National Instruments – mod. SCXI-1001) munito di moduli di acquisizione, controllo e condizionamento dei segnali dalle seguenti caratteristiche principali:

- modulo di acquisizione e controllo con risoluzione a 16 bit, dotato di connettività USB per il collegamento ad un PC dedicato;

- modulo per l'acquisizione di segnali analogici, sia in tensione che corrente, dotati di amplificatori a controllo di guadagno e filtri passa basso a 2 Hz;
- modulo per l'acquisizione di RTD a 4 fili con 16 canali indipendenti dotati di amplificatori a controllo di guadagno e filtri passa basso a 5 Hz;
- modulo per la generazione di segnali analogici (tensione, corrente) con risoluzione a 12 bit;
- modulo per l'acquisizione e generazione di segnali digitali (TTL, CMOS).



Fig. 12 – Foto del sistema di acquisizione dati

2.3 Realizzazione di una piattaforma sperimentale di caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura

Definite le specifiche di progetto si è proceduto alla realizzazione della piattaforma sperimentale da ubicarsi in un'apposita area localizzata nei pressi del Laboratorio di qualificazione dei collettori e sistemi solari del C.R. ENEA – Trisaia. Le figure seguenti mostrano il P&I la vista 3D del circuito di prova nella sua configurazione definitiva.

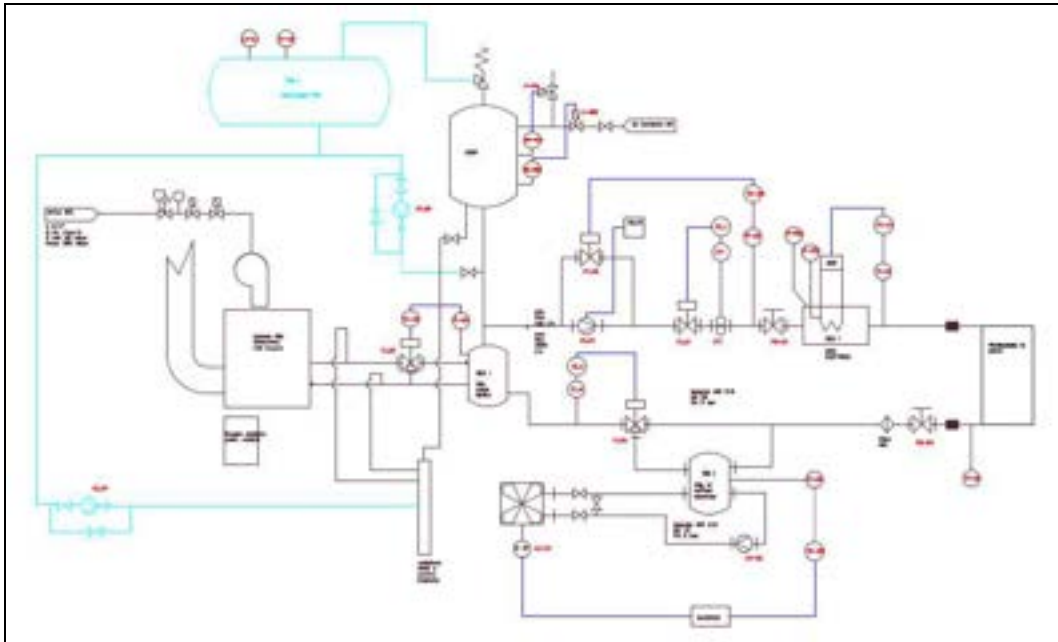


Fig. 13 – P&I Impianto ad olio diatermico

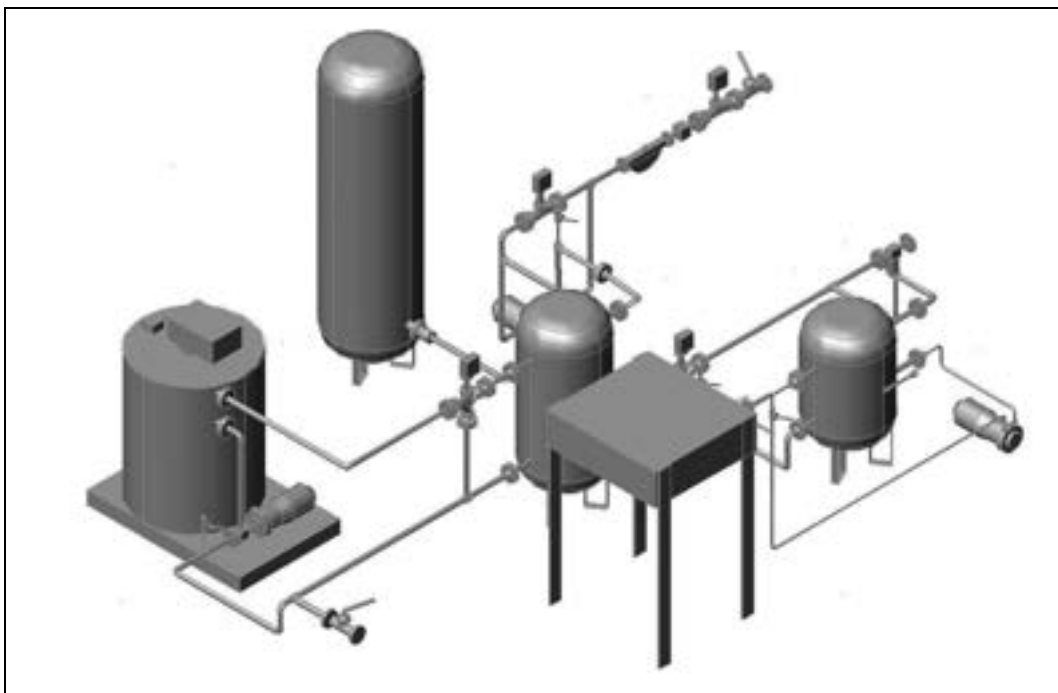


Fig. 14 – Vista 3D del circuito di prova

Le immagini seguenti mostrano alcune delle fasi di lavorazione e assemblaggio dei componenti del circuito di prova.



Fig. 15 – Foto durante le fasi di lavorazione



Fig. 16 – Foto durante le fasi di lavorazione



Fig. 17 – Foto durante la fase di assemblaggio

La foto seguente mostra, invece, l'intero impianto totalmente assemblato su skid nella sua configurazione definitiva.



Fig. 18 – Foto del circuito di prova totalmente assemblato su skid

3. CONCLUSIONI

Sulla base degli obiettivi realizzativi della presente linea di attività, sono state portate a termine tutte le attività previste per l'annualità in corso. In particolare:

- sono state esaminate ed approfondite le diverse problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura;
- sono state affrontate le problematiche connesse al dimensionamento ottimale dei diversi componenti il circuito di termo-idraulico di prova per i collettori a media temperatura. Ciò ha consentito di progettare una stazione sperimentale con la quale il Laboratorio solare del CR ENEA Trisaia sarà in grado di analizzare e caratterizzare un vasta gamma di sistemi solari a concentrazione da destinare ad applicazioni avanzate del solare termico;
- si è proceduto alla fase realizzativa della stazione sperimentale, allestendo: il circuito termo-idraulico per il condizionamento dei collettori in prova, gli apparati strumentali per la misura delle diverse grandezze fisiche da monitorare, gli apparati di acquisizione e controllo necessari al corretto funzionamento di tutta stazione sperimentale;
- si è infine proceduto alla verifica funzionale dei diversi componenti l'impianto al fine di testare il suo corretto funzionamento in fase operativa.