



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Facility per la caratterizzazione di componenti solari
per applicazioni di solar cooling

V. Sabatelli, D. Marano, G. Braccio

FACILITY PER LA CARATTERIZZAZIONE DI COMPONENTI SOLARI PER APPLICAZIONI DI SOLAR COOLING

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

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

Responsabile Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
1.1 OBIETTIVI GENERALI.....	3
1.2 ARTICOLAZIONE DELLE ATTIVITÀ RELATIVE ALL'OBIETTIVO B	4
2. ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI OTTENUTI	5
2.1 SPERIMENTAZIONE E QUALIFICAZIONE DI COLLETTORI SOLARI A MEDIA TEMPERATURA	5
2.1.1 <i>Messa a punto della stazione di prova per la caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura</i>	<i>6</i>
2.1.2 <i>Modellazione teorica abbinata ad analisi termo-fluidodinamiche ed ottiche</i>	<i>13</i>
2.1.3 <i>Sperimentazione su collettori commerciali di diversa tipologia.....</i>	<i>17</i>
2.2 ANALISI E CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DEGLI ACCUMULI SOLARI	20
2.2.1 <i>Metodica di prova per la caratterizzazione degli accumuli termici per applicazioni solari</i>	<i>20</i>
2.2.2 <i>Progettazione e realizzazione dell'impianto di prova</i>	<i>24</i>
2.3 REALIZZAZIONE DI UN CIRCUITO DI TEST PER PROVE INDOOR SU COLLETTORI SOLARI	26
3. CONCLUSIONI	29

1. INTRODUZIONE

L'impiego dell'energia solare nella stagione estiva per il condizionamento dell'aria costituisce una soluzione tecnica molto interessante dal punto di vista energetico, vista la coincidenza della domanda con la disponibilità di energia solare. Attualmente esistono diverse componenti tecnologiche per la realizzazione di sistemi di raffrescamento solare, tuttavia non esiste ancora una soluzione tecnologica integrata di facile applicazione, con il risultato che gli impianti di questo tipo sono ancora per lo più di tipo sperimentale e come tali molto costosi e poco competitivi.

In quest'ambito il progetto ha lo scopo di definire e sviluppare un sistema integrato che sia robusto, competitivo e di riferimento per il "sistema Italia", in grado di assolvere l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale. Il progetto consentirà inoltre di comprendere in quali condizioni climatiche, con quali tecnologie e con quale politica di supporto possa essere avviata un'azione che porti ad una diffusione di massa di sistemi di climatizzazione basati sull'energia solare o comunque assistiti da fonti rinnovabili.

Lo scopo principale del progetto è dunque quello di favorire una crescita nel ricorso a queste tecnologie avanzate di climatizzazione degli edifici. Tale obiettivo richiede parallelamente lo sviluppo di:

- a. componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti;
- b. una varietà di soluzioni tecnologiche che consenta la scelta ottimale per ogni situazione climatica presente nel territorio nazionale.

1.1 Obiettivi generali

In generale l'attività sulla climatizzazione innovativa si sviluppa su due linee di attività fondamentali, concentrando gli sforzi e le risorse verso la realizzazione di laboratori e lo sviluppo di componenti innovativi:

- la prima linea è quella dello **sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo**. In particolare vengono studiate pompe di calore ad assorbimento, pompe elettriche elio-assistite, heat pipe, pompe di calore a CO₂, sistemi desiccant, pompe geotermiche. A questo scopo si realizzeranno impianti prototipali, laboratori di qualificazione e si assicurerà la partecipazione a network di ricerca internazionali (IEA);
- la seconda linea di attività riguarda **l'integrazione del sistema di climatizzazione**, cioè la costruzione di sistemi integrati che possano essere robusti e competitivi assolvendo l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale. In questo contesto si svilupperanno:

sistemi integrati pilota e dimostratori dove tali sistemi sono integrati nell'edificio; sistemi di controllo ed ottimizzazione in linea della integrazione tra sistema di climatizzazione ed edificio e telediagnostica con sistemi di monitoraggio remoto.

Nell'ambito delle attività finalizzate allo sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo, rientra anche la linea di attività oggetto del presente report che specificatamente si focalizza sullo "*Sviluppo di facility per la caratterizzazione di componenti e sistemi destinati ad applicazioni di climatizzazione estiva ed invernale elio-assistite*".

1.2 Articolazione delle attività relative all'obiettivo B

Per il raggiungimento degli obiettivi generali del presente linea di attività, sono state previste 3 sub-linee di attività che hanno come obiettivi:

- B1. La sperimentazione e qualificazione di collettori solari a media temperatura utilizzando diversi sistemi ottici per la concentrazione della radiazione solare (CPC, parabolici lineari, parabolici puntuali, a specchi di Fresnel). A tale scopo si utilizzerà la stazione sperimentale di test già allestita presso il Laboratorio solare del CR ENEA Trisaia. In particolare le attività di sperimentazione riguarderanno analisi termo-fluidodinamiche ed ottiche abbinate a verifiche sperimentali su componenti commerciali e/o prototipi.
- B2. L'analisi e la caratterizzazione energetica degli accumuli (secondo la normativa europea vigente). Relativamente a tale attività, si prevede l'ampliamento del Laboratorio con la realizzazione delle facility necessarie alla caratterizzazione degli accumuli solari. In particolare, verranno implementate le infrastrutture necessarie allo svolgimento delle attività sperimentali (circuiti termoidraulico, apparato di acquisizione e controllo, ecc.) e si procederà al relativo collaudo funzionale.
- B3. Lo studio, l'implementazione e l'ottimizzazione di sistemi avanzati di controllo. Relativamente a tale attività, si realizzerà un impianto pilota di solar-cooling di piccola taglia dotato della necessaria modularità e flessibilità tale da consentire l'attività di sperimentazione relativa alle diverse strategie di controllo che si andranno ad implementare.

Relativamente all'obiettivo B3, in considerazione del fatto che l'analisi delle problematiche riguardanti i sistemi di controllo rientrano tra gli obiettivi realizzativi previsti nella linea di attività C, si è convenuto di rimodulare l'ultimo obiettivo optando per l'utilizzazione delle risorse previste per la realizzazione della parte termo-idraulica di un stazione di prova indoor basata su un simulatore solare.

2. ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI OTTENUTI

Nel corso del 2011, coerentemente con il piano di attività previsto e in considerazione delle varianti introdotte ed illustrate in precedenza, sono state condotte e portate a termine le seguenti attività:

- Sperimentazione e qualificazione di collettori solari a media temperatura;
- Progettazione e realizzazione di una facility di test per l'analisi e la caratterizzazione energetica degli accumuli solari;
- Progettazione e realizzazione del circuito termo-idraulico per la caratterizzazione energetica di collettori solari in vista dell'allestimento di una stazione di test per prove indoor mediante simulatore solare.

I paragrafi successivi illustrano in dettaglio i contenuti di tali attività, evidenziandone i principali risultati ottenuti.

2.1 Sperimentazione e qualificazione di collettori solari a media temperatura

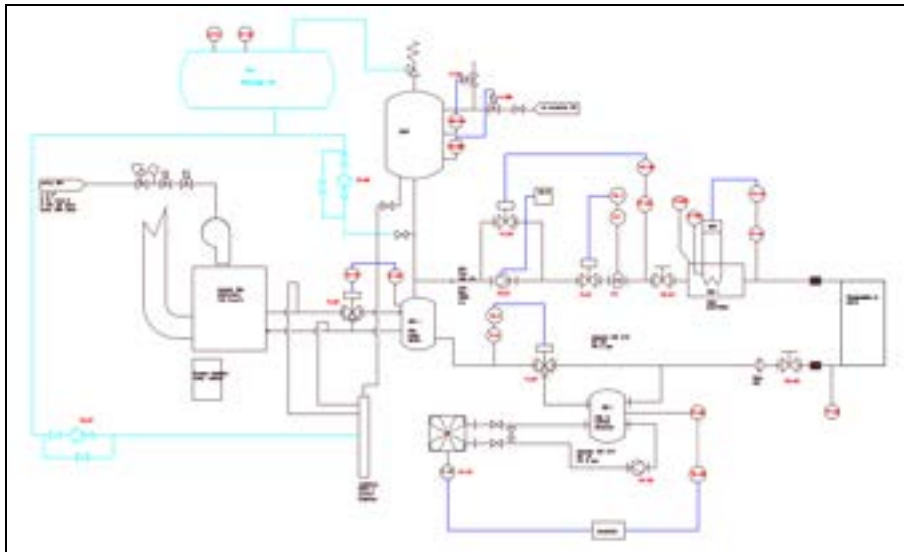
Scopo della presente task è stato quello di sperimentare e qualificare differenti tipologie di collettori solari a media temperatura utilizzando diversi sistemi ottici per la concentrazione della radiazione solare (sistemi a CPC, concentratori parabolici lineari, concentratori parabolici puntuali, concentratori a specchi di Fresnel). A tale scopo è stata utilizzata la stazione sperimentale di test allestita presso il Laboratorio solare del Centro Ricerche ENEA di Trisaia, la cui progettazione, realizzazione e verifica funzionale è stata oggetto delle attività svolte nella precedente annualità dell'Accordo di Programma.

In particolare le attività per l'annualità in corso hanno riguardato:

- la messa a punto dell'impianto di prova, attraverso il tuning fine dei parametri di controllo e la verifica degli stessi in condizioni operative reali
- la modellizzazione teorica delle diverse tipologie di concentratori abbinata ad analisi termo-fluidodinamiche (mediante software agli elementi finiti) ed ottiche (mediante software di ray-tracing)
- la verifica sperimentale su componenti commerciali e/o prototipi in fase di sviluppo anche in collaborazione con aziende operanti nel settore delle applicazioni solari a media temperatura.

2.1.1 Messa a punto della stazione di prova per la caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura

L'attività descritta in questo paragrafo riguarda la messa a punto dell'impianto di prova, del quale si riporta lo schema di funzionamento, attraverso il tuning fine dei parametri di controllo e la verifica degli stessi in condizioni operative reali. Scopo dell'impianto è quello di alimentare il collettore esposto alla radiazione solare con una portata fissa di olio diatermico mantenuto a temperatura costante.



P&I dell'impianto ad olio diatermico

Per il raggiungimento di tale scopo l'impianto in questione è composto dei seguenti principali sottosistemi di cui si dà una breve descrizione funzionale:

- Serbatoio inerziale dell'olio diatermico caldo alimentato da caldaia a GPL tramite una valvola deviatrice a tre vie. La caldaia serve a portare alla temperatura desiderata l'impianto e a mantenerla costante durante la prova.
- Pompa di circolazione la cui portata è regolata da due valvole di regolazione a due vie. Essa ha lo scopo di fornire la portata richiesta per la prova e di mantenerla costante.
- Resistenza elettrica scaldante all'ingresso del collettore il cui scopo è quello di effettuare il controllo fine di temperatura all'ingresso del collettore
- Serbatoio inerziale del fluido freddo raffreddato ad aria mediante ventilatore mosso da un inverter a frequenza variabile, il quale ha lo scopo di estrarre dal fluido proveniente dal collettore la potenza termica conferitagli dal collettore per portarlo a una temperatura inferiore a quella del fluido nel serbatoio inerziale dell'olio diatermico caldo, permettendo in questo modo di mantenere quest'ultimo a una temperatura costante mediante l'intervento della caldaia.



Area esterna del laboratorio solare a media temperatura



Sala controllo



Vista frontale del circuito di prova ad olio diatermico



Vista laterale del circuito di prova ad olio diatermico



Strumentazione di misura dei parametri meteorologici



Dettaglio del sistema ad inseguimento biassiale per il monitoraggio della radiazione solare diretta

L'impianto è dotato di un sistema SCADA per la supervisione e il controllo, che effettua la regolazione della portata e delle temperature mediante controllori PID indipendenti che possono funzionare nelle due classiche modalità: automatica e manuale. Per entrambe le modalità l'operatività dell'impianto ha richiesto che fossero determinati i parametri di funzionamento. In particolare per la modalità di funzionamento in automatico si è dovuto determinare la banda proporzionale, e i tempi integrale e derivativo dei PID in modo da soddisfare i requisiti di stabilità delle grandezze controllate richiesti dalla normativa tecnica di riferimento (EN 12975-2).

Poiché i suddetti requisiti di stabilità sono molto stringenti (in particolare: portata stabile entro 1% del valore di setpoint e temperatura in ingresso al collettore stabile entro 0.1°C), si è reso necessario approfondire in dettaglio le diverse problematiche relative al controllo dell'impianto. A tal fine si è proceduto alla stesura di opportuni script in ambiente MatLab con lo scopo di simulare l'intero impianto in diverse condizioni operative che riproducono le diverse fasi di test del collettore. Dai risultati delle simulazioni si sono ottenuti i parametri dei PID da implementare nel sistema di controllo. Stante l'ovvia diversità tra i fenomeni reali e quelli simulati tali parametri sono stati assunti come parametri di partenza che sono stati affinati mediante prove sperimentali condotte sull'impianto.

Di seguito viene brevemente descritta la struttura degli script in MATLAB e sono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione assieme a un loro commento. Per tutti i componenti in grado di accumulare energia (caldaia, serbatoi inerziali, resistenza scaldante) si è imposto il principio di conservazione dell'energia nella forma seguente:

$$C \frac{dT}{dt} = \sum \Gamma_i c_{pi} T_i - \sum \Gamma_u c_{pu} T + Q_r$$

dove:

- T : temperatura del componente (°C)
- C : capacità termica del componente (J/°C)
- c_p : calore specifico (J/kg °C)
- Γ : portata (kg/sec)
- Q_r : potenza termica prodotta (W)

Il pedice i sta per ingresso e quello u per uscita. Il componente è stato considerato completamente miscelato alla temperatura T ; i calori specifici e la capacità termica sono funzioni della temperatura. Q_r è la potenza prodotta diversa da 0 solo per la caldaia e la resistenza scaldante. Per le valvole a tre vie imponendo la conservazione della massa e dell'energia si hanno le seguenti due equazioni:

$$\sum \Gamma_{iv} = \sum \Gamma_{uv}$$

$$\sum \Gamma_{iv} c p_{iv} T_{iv} = \sum \Gamma_{uv} c p_{uv} T_{uv}$$

Dove *i* ed *u* stanno rispettivamente per ingresso ed uscita dalla valvola indicata con il pedice *v*.

La potenza termica scambiata dagli scambiatori di calore è stata calcolata mediante la seguente formula:

$$Q_{sc} = \epsilon C_{min} (T_{ci} - T_{fi})$$

dove:

- Q_{sc} : potenza scambiata (W)
- ϵ : efficienza dello scambiatore
- C_{min} : la capacità termica minore tra fluido caldo e fluido freddo (J/°C)
- T_{ci} : temperatura del fluido caldo in ingresso allo scambiatore
- T_{fi} : temperatura del fluido freddo in ingresso allo scambiatore

La relazione tra segnale di errore e uscita del PID è stata espressa mediante la formula seguente:

$$u_{PID}(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

dove:

- $e(t)$: è il segnale di errore dato dalla differenza tra il valore di set – point e quello effettivo della grandezza controllata
- $u_{PID}(t)$: è l'uscita del PID
- t : tempo (sec)
- K_p : costante proporzionale del PID
- τ_I : costante di tempo integrale del PID
- τ_D : costante di tempo derivativa del PID

Infine il collettore è stato simulato mediante la sua curva di efficienza, data da:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T^* - a_2 G T^{*2}$$

dove:

η_0, a_1, a_2 : costanti caratteristiche del collettore

G : radianza (W/m^2)

T^* : temperatura ridotta ($\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$)

La temperatura ridotta T^* è a sua volta data dalla seguente espressione:

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

dove:

T_m : temperatura media del fluido all'interno del collettore ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

La potenza termica utile Q_u estratta dal collettore è data da:

$$Q_u = \eta A_c G$$

dove:

A_c : superficie di apertura del collettore (m^2)

La temperatura in uscita dal collettore è data semplicemente risolvendo la:

$$Q_u = \Gamma_c c p_c (T_{uc} - T_{ic})$$

dove:

Γ_c : portata di olio diatermico in ingresso al collettore (kg/sec)

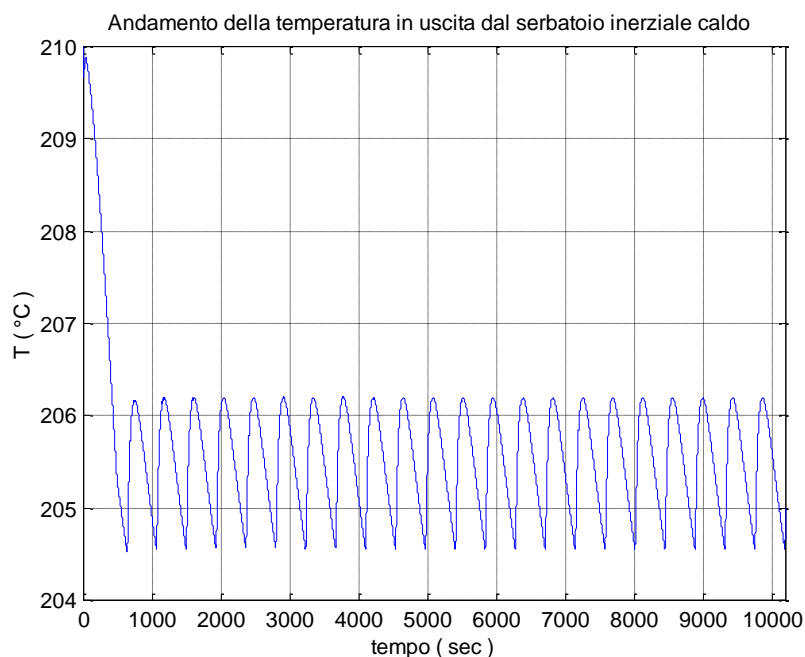
$c p_c$: calore specifico medio del fluido nel collettore ($\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$)

T_{uc} : temperatura dell'olio diatermico in uscita dal collettore ($^{\circ}\text{C}$)

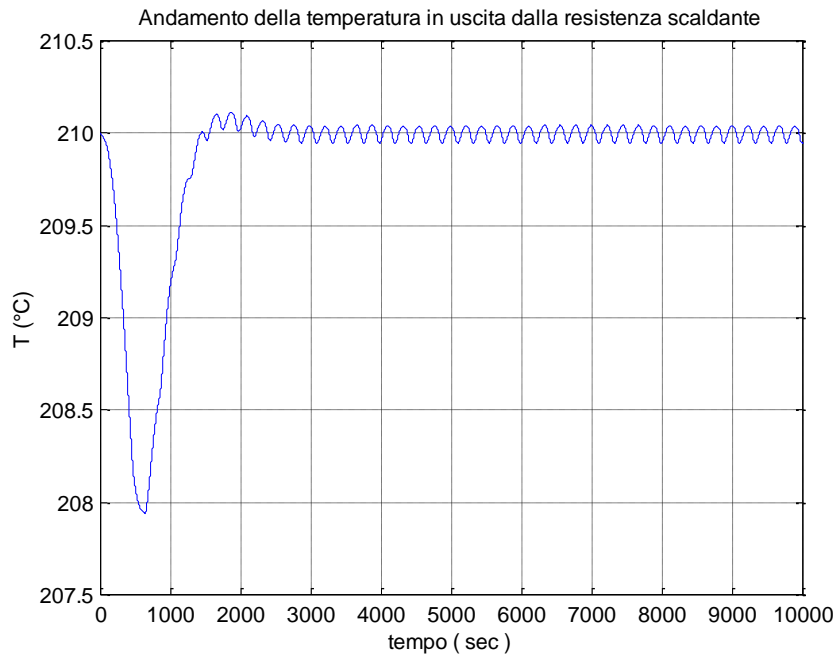
T_{ic} : temperatura dell'olio diatermico in ingresso al collettore ($^{\circ}\text{C}$)

La caldaia è controllata on-off: dato un valore $T_{caldaia}$ di set – point la caldaia si spegne quando il valore della temperatura effettiva supera di un ΔT fissato la temperatura di set – point e si accende quando il valore di questa scende di ΔT rispetto al set – point. Il controllo di temperatura del serbatoio inerziale caldo è effettuata mediante una valvola deviatrice a tre vie comandata da un controllore PID con la seguente logica di controllo: quando la temperatura nel serbatoio inerziale caldo tende a scendere la valvola apre di più la via verso il serbatoio, il contrario avviene quando la

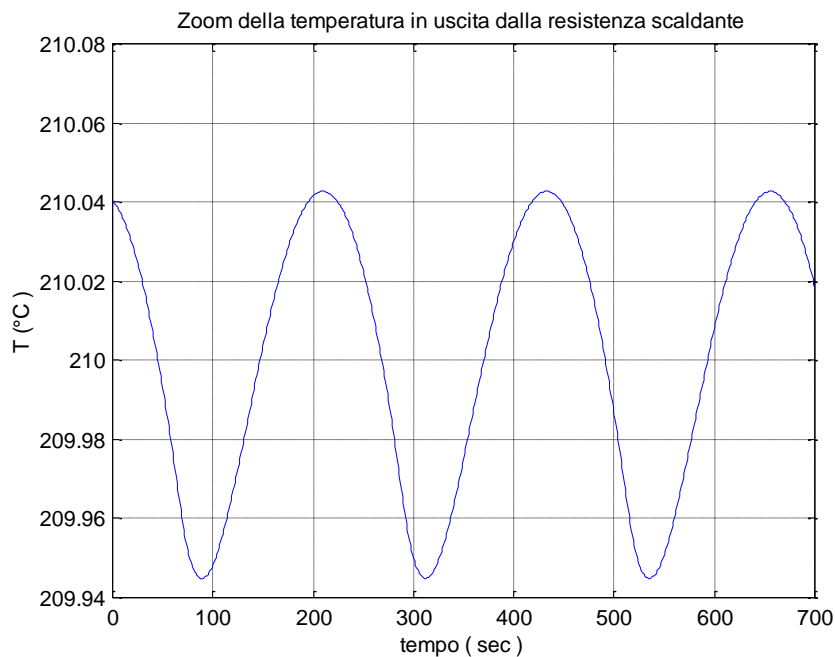
temperatura tende a salire. Un parametro che si è dimostrato critico per il buon funzionamento dell'impianto è il ΔT impostato: un valore troppo elevato evita cicli eccessivi di accensione-spegnimento che sono dannosi per la vita utile della caldaia ma peggiora la regolazione, mentre un valore troppo piccolo migliora la regolazione ma per contro è pregiudizievole nei confronti del ciclo di vita della caldaia. Il costruttore di quest'ultima raccomanda un ΔT di 5°C . Nella simulazione si sono determinati i parametri del PID che controlla la valvola deviatrice a tre vie seguendo le regole di Ziegler e Nichols. Siccome le pendolazioni dovute al controllo on-off della caldaia sono dei disturbi nel tuning del PID li si è eliminati imponendo un ΔT teorico di soli 0.1°C . Si è poi variata la banda proporzionale fino ad ottenere oscillazioni persistenti. Dal periodo di tali oscillazioni e dal relativo valore della banda proporzionale si sono poi ricavati i parametri del PID. Lo stesso metodo lo si è applicato ai PID che regolano la portata, a quello della resistenza scaldante, e ai PID del ventilatore e della valvola miscelatrice all'uscita del serbatoio freddo. Il risultato della simulazione per una temperatura di test di 210°C e con un ΔT della caldaia di 5°C senza fare intervenire la resistenza scaldante è riportato in figura:



Da essa si evince una oscillazione di circa 1.5°C dovuta a un controllo on off della caldaia con un ΔT di 5°C e il fatto che il sistema si porta all'equilibrio a una temperatura leggermente inferiore a quella di set point. Utilizzando la resistenza scaldante come regolatore fine si è riusciti a limitare l'oscillazione intorno 0.1°C , e a fare in modo che in stazionario il sistema raggiunga la temperatura di set point, come si evince dalla figura seguente.

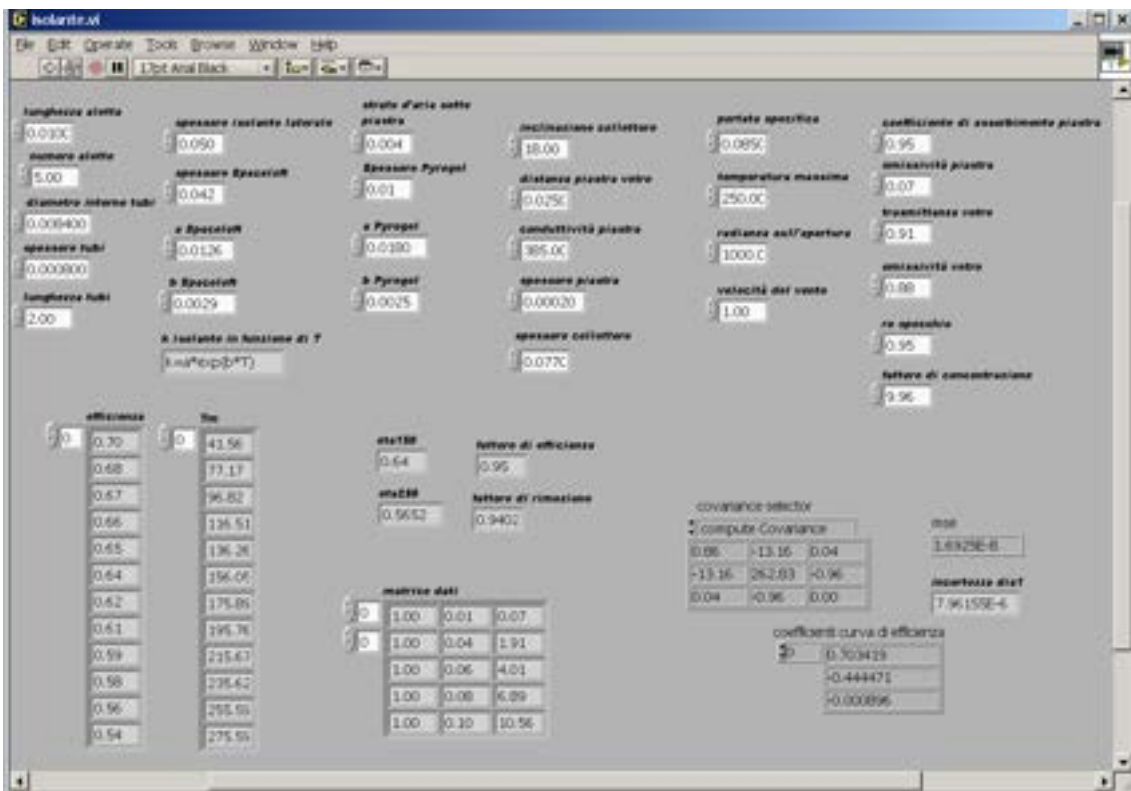


La valutazione delle oscillazioni si apprezza meglio nella figura seguente che è uno zoom di quella precedente: Le oscillazioni rimanenti sono dovute al controllo on off della portata. In definitiva dalle simulazioni è emerso che il controllo on off della portata, utilizzato da solo introduce, anche in presenza di un PID ottimizzato, oscillazioni della portata assai ampie che possono venire drasticamente ridotte ma non eliminate ricorrendo alla resistenza scaldante utilizzata come regolatore fine.



2.1.2 Modellazione teorica abbinata ad analisi termo-fluidodinamiche ed ottiche

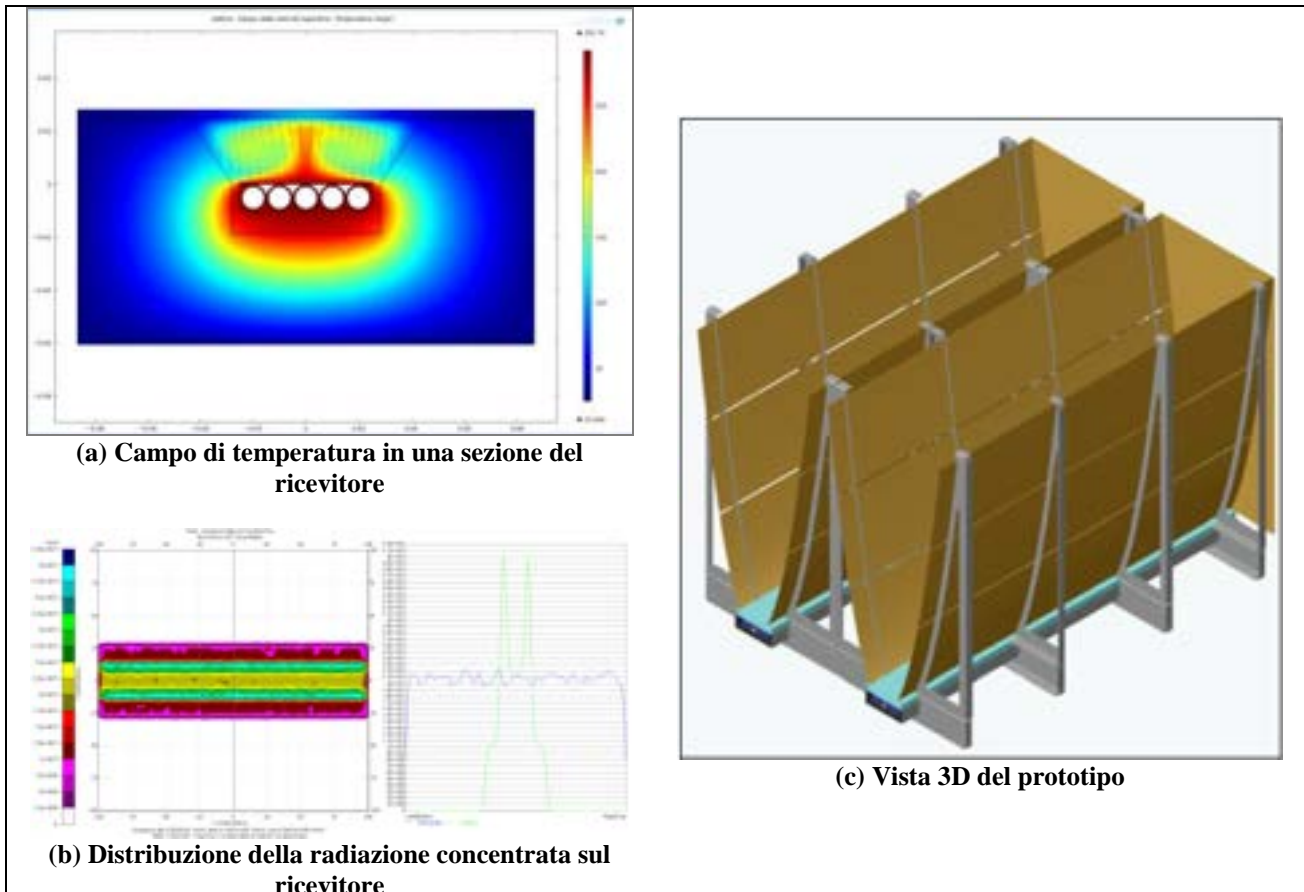
Parallelamente alle attività di sperimentazione su collettori solari a concentrazione per applicazioni a media temperatura, sono state condotte attività di modellazione teorica su prototipi in fase di sviluppo presso aziende con cui il laboratorio solare del CR ENEA Trisaia collabora attraverso attività di supporto tecnico-scientifico. In particolare le attività hanno riguardato la definizione di modelli numerici (sviluppati in ambiente Matlab) per l'analisi e successiva previsione del comportamento ottico e termico di tali tipologie di concentratori solari, a cui sono state abbinata sia analisi di dettaglio dei fenomeni ottici (mediante software di ray-tracing) sia analisi termo-fluidodinamiche agli elementi finiti (mediante l'uso del software COMSOL) al fine di ottimizzare gli scambi termici tra ricevitore e fluido termo-vettore.



Esempio di schermata di input/output di un modello Matlab sviluppato per simulare il comportamento ottico e termo-fluidodinamico di uno dei collettori oggetto dell'attività teorico-sperimentale

La figura seguente mostra una vista 3D di un prototipo di concentratore solare sviluppato ed ottimizzato in collaborazione con l'azienda Costruzioni Solari Srl, con annessi alcuni esempi di simulazioni ottiche e termo-fluidodinamiche condotte al fine di ottimizzare gli scambi energetici tra sistema di captazione della radiazione solare, ricevitore termico e fluido termo-vettore. In particolare una delle immagini mostra il campo di temperatura relativo ad una sezione del ricevitore termico a cui si sovrappone l'andamento del campo di velocità dell'aria racchiusa nell'intercapedine

tra piastra captante e vetro di copertura. La seconda immagine mostra invece la distribuzione della radiazione concentrata sull'assorbitore, evidenziando le peculiarità introdotte del sistema ottico a CPC utilizzato per la concentrazione della radiazione solare.



Vista 3D del prototipo della ditta Costruzioni Solari e esempi di analisi ottiche e termo-fluidodinamiche

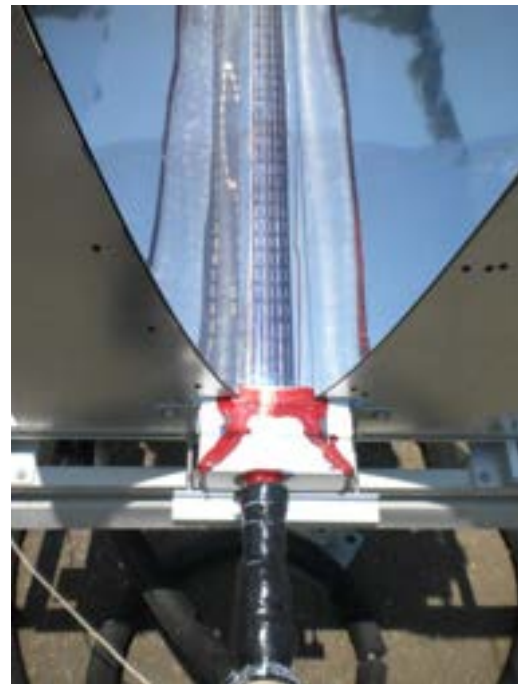
Sulla base delle analisi teoriche condotte con l'ausilio dei modelli matematici sviluppati è stato possibile introdurre una serie di miglioramenti finalizzati all'ottimizzazione ottica e termo-fluidodinamica del prototipo della Costruzioni Solari Srl. Tali elementi di miglioramento hanno riguardato sia il sistema ottico di concentrazione sia la configurazione del ricevitore termico. Sempre mediante il ricorso ai diversi software di simulazione a disposizione, sono state effettuate analisi di dettaglio, dal punto di vista ottico e termo-fluidodinamico, della soluzione adottata al fine di determinare per via teorica le prestazioni energetiche. Contemporaneamente sono state effettuate campagne sperimentali su differenti prototipi del concentratore che si differenziavano per alcuni dettagli costruttivi del ricevitore termico. Il confronto tra i risultati delle analisi teoriche e le relative prove sperimentali hanno evidenziato un sostanziale accordo, dimostrando la bontà delle scelte

progettuali implementate nonché l'affidabilità degli strumenti di calcolo sviluppati in vista di un loro utilizzo futuro per effettuare ulteriori miglioramenti ed ottimizzazioni.

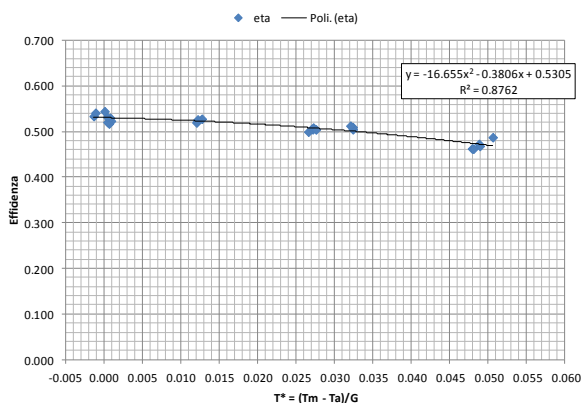
Le foto seguenti mostrano il set-up sperimentale con il relativo dettaglio del ricevitore termico. Il tutto è stato installato su un sistema ad inseguimento azimutale programmato per spostamenti a intervalli del minuto in modo da garantire l'uniformità e la costanza nel tempo del flusso radiativo sul ricevitore.



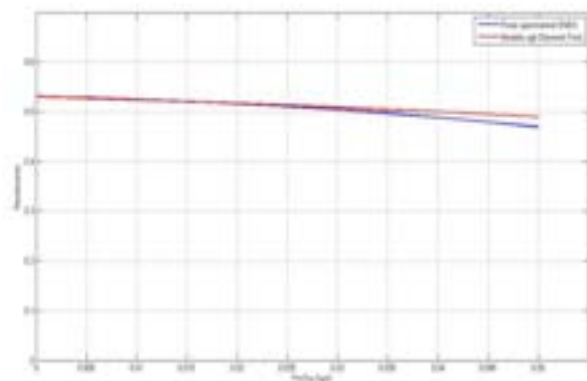
Foto del set-up sperimentale



Dettaglio del prototipo sotto test



(a) Dati ottenuti nella campagna sperimentale

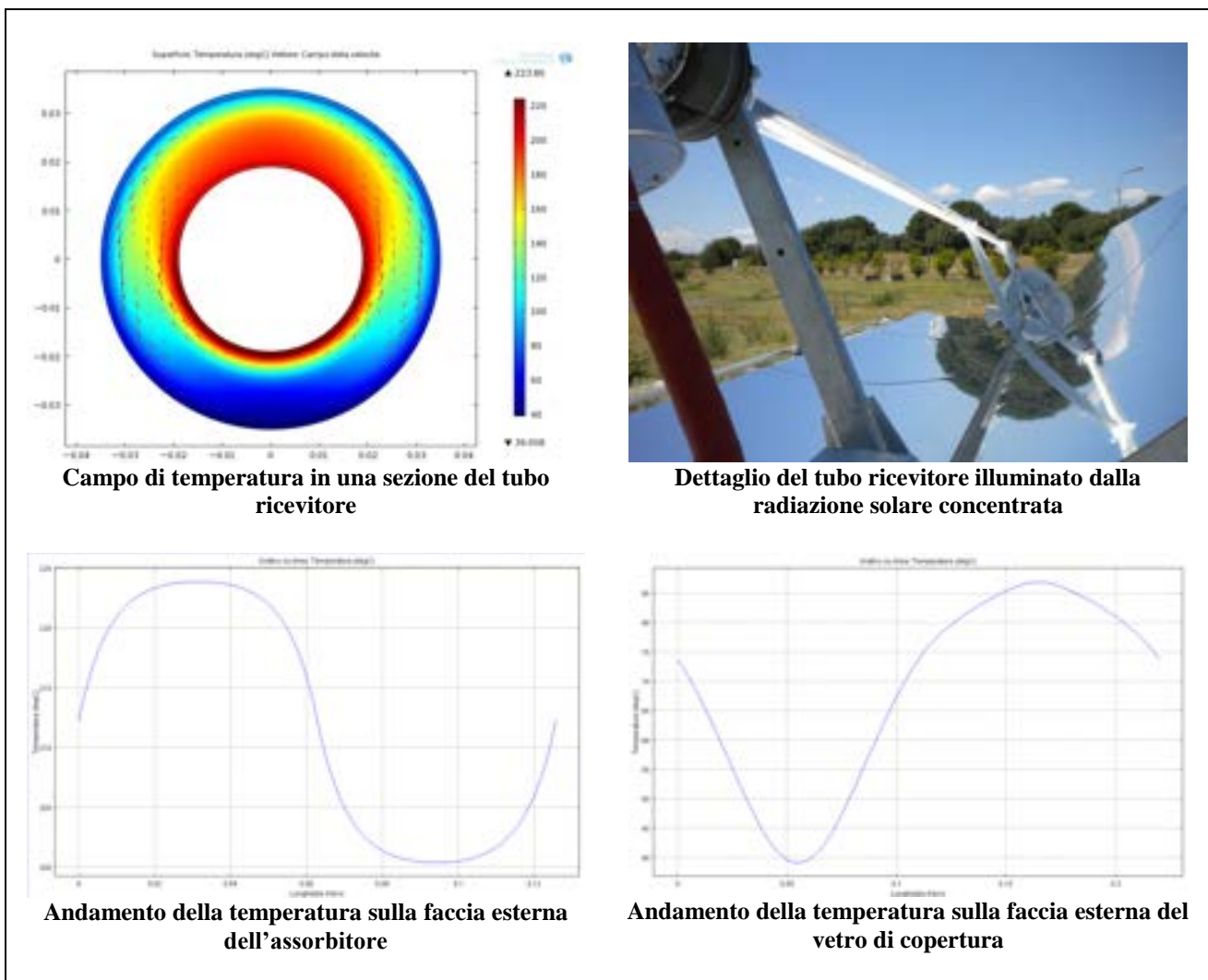


(b) Confronto tra dati sperimentali e risultati ottenuti dalle analisi agli elementi finiti

Set-up sperimentale e confronto tra dati sperimentali e risultati teorici relativi al componente della ditta Costruzioni Solari

Analogamente alla parte teorica sviluppata per l'ottimizzazione del concentratore della ditta Costruzioni Solari, sono state svolte analisi agli elementi finiti relative al tubo ricevitore del collettore parabolico lineare della società Soltigua.

La figura seguente illustra il campo di temperatura ed il campo delle velocità nel gap d'aria tra tubo in acciaio, entro cui fluisce il fluido termo-vettore, e il vetro di copertura. Tale figura si riferisce ad un'analisi stazionaria eseguita su una sezione del tubo ricevitore in cui parte dell'assorbitore cilindrico è illuminata dalla radiazione solare concentrata dallo specchio parabolico e il fluido (nella fattispecie olio diatermico) che scorre all'interno del tubo si trova a una temperatura di 200°C.



Vista del prototipo della ditta Soltigua in fase operativa ed esempio di analisi termo-fluidodinamica applicata ad una sezione del ricevitore

L'analisi evidenzia l'instaurarsi di moti convettivi naturali all'interno del gap d'aria tra assorbitore e vetro, di modo che la parte superiore del vetro raggiunge una temperatura più elevata della parte inferiore dove i moti convettivi sono del tutto assenti. I due successivi grafici mostrano l'andamento della temperatura sia sulla superficie esterna dell'assorbitore sia sulla superficie esterna del vetro.

2.1.3 Sperimentazione su collettori commerciali di diversa tipologia

Coerentemente con gli obiettivi della presente linea di attività, sono state condotte una serie di sperimentazioni su differenti tipologie di collettori a concentrazione per applicazioni a media temperatura con lo scopo ultimo di qualificare i suddetti componenti in conformità alla normativa tecnica di settore (EN 12975-1:2006 e successive modificazioni in fase di approvazione dal comitato tecnico europeo CEN/TC 312).

La figura seguente mostra il set-up sperimentale allestito per l'esecuzione dei test di efficienza termica su un collettore parabolico lineare della ditta SOLTIGUA. Il collettore è stato connesso alla stazione di prova ad olio diatermico e sono state condotte diverse campagne sperimentali con l'obiettivo di determinare l'efficienza termica in diverse condizioni operative sia dal punto di vista termo-fluido dinamico (temperatura e portata dell'olio diatermico) sia dal punto di vista meteorologico (diversi livelli della DNI – *Direct Normal Irradiance*).

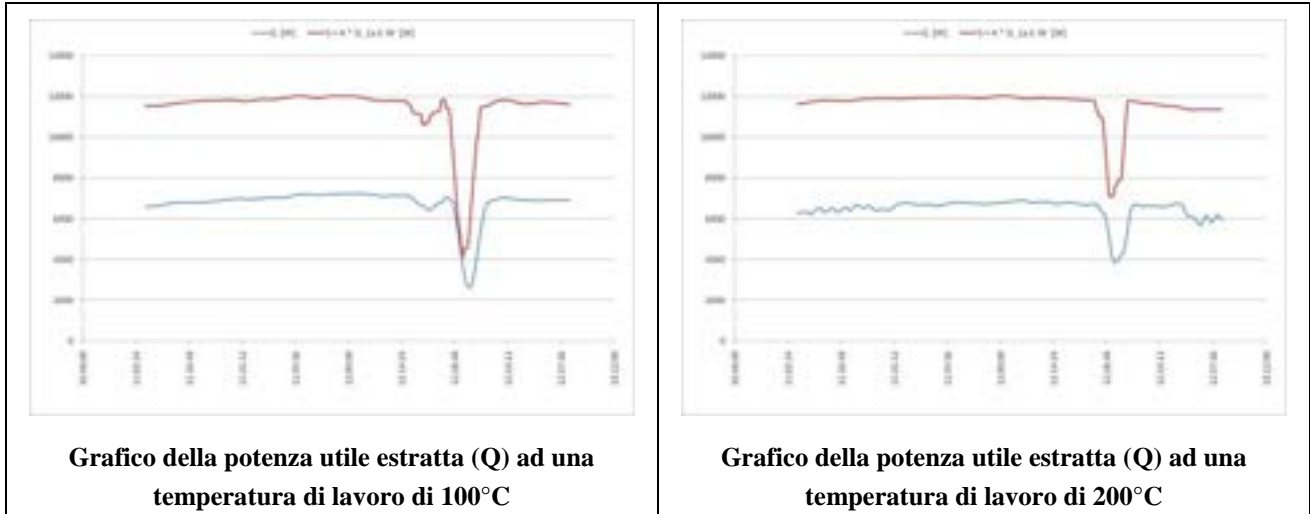


Foto del concentratore parabolico lineare della ditta SOLTIGUA in fase di test

Il collettore è stato testato con inseguimento continuo in direzione E-W alimentando l'ingresso del collettore con olio diatermico a temperature via via crescenti e comprese in un range tra 100 ed 250°C. La tabella seguente mostra alcuni dati ottenuti durante la campagna sperimentale.

T _{in}	T _{out}	ΔT	DNI	T _a	m	Q
[°C]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[°C]	[kg/h]	[W]
98.8	108.0	9.2	850.3	32.2	1550.4	7284.1
126.4	133.8	7.4	738.8	33.2	1578.4	6296.5
152.5	159.9	7.5	767.0	31.5	1501.9	6351.0
175.6	183.1	7.5	872.7	29.2	1555.8	6842.9
195.2	202.6	7.3	853.2	33.9	1558.5	6944.5
229.0	235.1	6.2	856.9	31.1	1622.8	6420.1

I grafici seguenti mostrano invece gli andamenti della potenza estratta dal collettore e della radiazione solare raccolta dalla superficie di apertura, durante 2 ore di acquisizione continuativa e per due diverse temperature di lavoro del collettore (100°C e 200°C).



Analogamente a quanto fatto con il sistema parabolico lineare, nel corso della presente annualità si è proceduto alla sperimentazione di un'altra tipologia di concentratore solare per applicazioni a media temperatura, basata su un sistema di concentrazione a specchi di Fresnel.

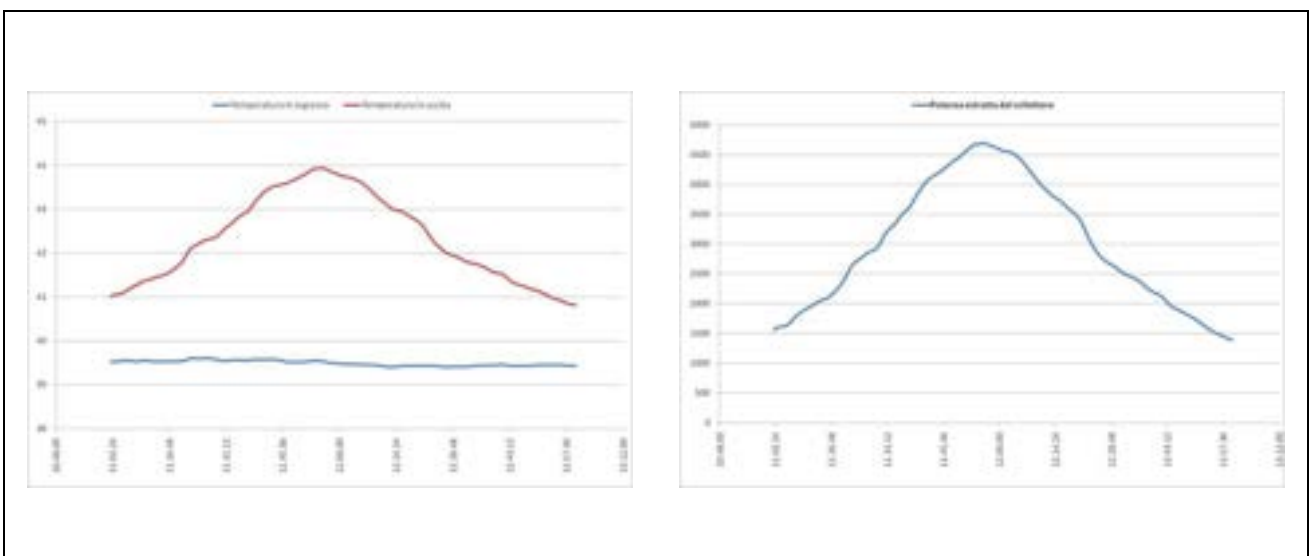
Le immagini seguenti illustrano il set-up sperimentale allestito per l'esecuzione dei test di efficienza sul collettore a specchi di Fresnel della ditta DWA. In particolare, la seconda delle due immagini, riporta il dettaglio operativo del collettore con la foto del tubo ricevitore (identico a quello utilizzato

per il progetto Archimede e fornito dalla ditta Angelantoni) quasi totalmente illuminato dalla radiazione riflessa e concentrata dagli specchi sottostanti. Anche in questo caso per esigenze di sperimentazione si è preferito l'orientamento E-W a quello N-S più comunemente utilizzato.



Foto del concentratore a specchi di Fresnel della ditta DWA in fase di test

A titolo di esempio dell'attività di prova condotta su tale tipologia di concentratore, nei grafici seguenti sono evidenziati gli andamenti delle temperature in ingresso ed uscita dal collettore e della potenza utile estratta durante due ore di acquisizione continuativa.



Andamento delle temperature e della potenza estratta dal collettore durante alcune fasi di test del concentratore a specchi di Fresnel della ditta DWA

2.2 Analisi e caratterizzazione energetica degli accumuli solari

Relativamente a tale task, è stato previsto un'ulteriore ampliamento delle attività svolte dal Laboratorio solare del CR ENEA Trisaia nel settore delle applicazioni a bassa e media temperatura, con la realizzazione delle facility necessarie alla caratterizzazione degli accumuli solari in accordo alla normativa tecnica europea EN 12977-3. In particolare, sono state implementate le infrastrutture necessarie allo svolgimento delle attività sperimentali (circuiti termoidraulico, apparato di acquisizione e controllo, ecc.) e si è proceduto alla relativa verifica funzionale.

2.2.1 Metodica di prova per la caratterizzazione degli accumuli termici per applicazioni solari

La norma europea EN 12977-3:2008 definisce le procedure di prova degli accumuli degli impianti Custom-Built nel range di volume compreso tra 50 e 3000 litri. Scopo principale delle prove è la determinazione dei principali parametri termo-fluidodinamici degli accumuli da utilizzare in modelli matematici dettagliati degli impianti che ne simulino il comportamento in maniera quanto più possibile vicina al caso reale.

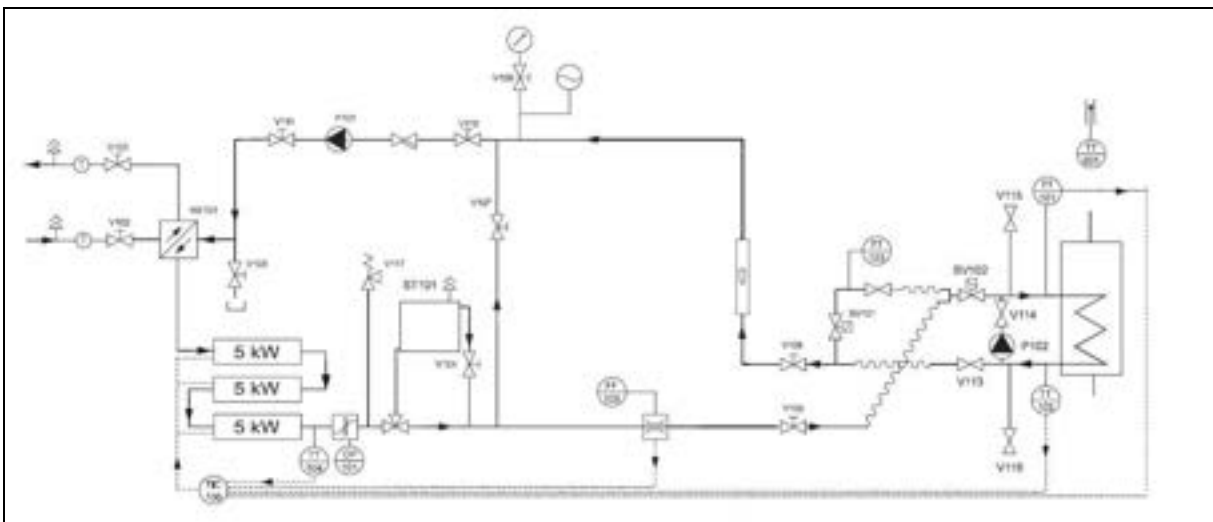
I principali parametri da determinare sono la capacità termica effettiva degli accumuli, il coefficiente che quantifica le perdite termiche complessive (in W/K), un parametro che descrive la degradazione del grado di stratificazione durante lo stand-by, la determinazione del grado di stratificazione durante il processo di scarica a portata elevata, il coefficiente di scambio termico globale dello scambiatore (esterno, a mantello o a serpentino immerso) in funzione della temperatura (in W/K), la determinazione dello stesso parametro per l'eventuale scambiatore ausiliario.

I test da eseguire sono del tipo a scatola nera con misure dei principali parametri termo-fluidodinamici di ingresso e di uscita senza la necessità di effettuare misure dirette all'interno dell'accumulo. In particolare le principali grandezze monitorate sono le portate e le temperature di ingresso e di uscita nonché la temperatura ambiente. Gli accumuli sono testati indoor in condizioni di temperatura ambiente controllata. In generale i test prevedono una fase di condizionamento durante la quale vengono fissati alcuni parametri come ad esempio la temperatura iniziale dell'accumulo, un processo di carica che in generale può essere effettuato a temperatura o potenza termica costante, un eventuale periodo di stand-by e un processo di scarica durante il quale viene sottratta potenza termica all'accumulo inviando al suo interno fluido freddo a una temperatura prefissata (in generale 20°C). I dati ottenuti relativi alle grandezze soggette a misura vengono poi opportunamente processati per ottenere i dati relativi alla caratterizzazione termo-fluidodinamica dell'accumulo.

Circuito di carica del boiler solare

Scopo del circuito termo-idraulico di carica è quello di condizionare la temperatura e la portata d'acqua in ingresso allo scambiatore del boiler solare e di mantenere tali grandezze stabili per tutto il periodo di test (condizioni di stabilità richieste: $< 1\%$ per quanto riguarda la portata; $< 0.1^{\circ}\text{C}$ per quanto riguarda la temperatura). Il circuito è provvisto di resistenze scaldanti della potenza complessiva di 15 kW in grado di portare la temperatura dell'acqua alle condizioni operative richieste. Per garantire la stabilità di temperatura richiesta, il circuito è inoltre provvisto di un serbatoio inerziale che smorza le fluttuazioni di temperatura in uscita dal riscaldatore elettrico e di uno scambiatore che consente sia di ridurre di $5\text{-}10^{\circ}\text{C}$ la temperatura dell'acqua in ingresso alle resistenze scaldanti (al fine di garantire una maggiore stabilità della temperatura nell'anello di ricircolo) sia di raffreddare il boiler solare quando necessario.

La figura seguente mostra lo schema funzionale di tale circuito.



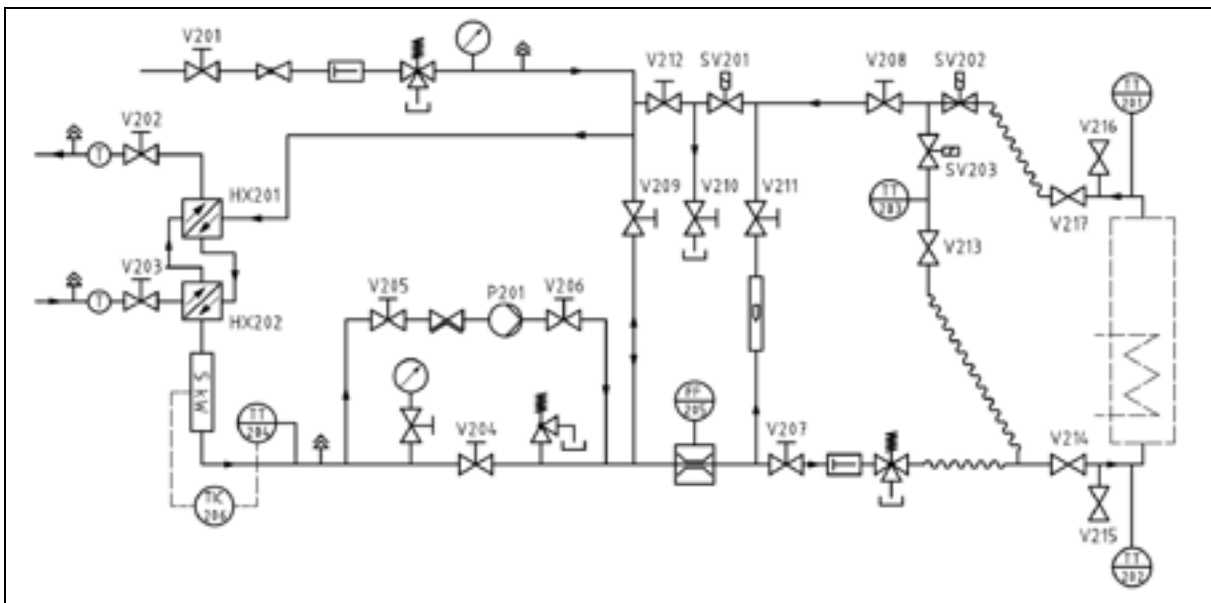
Schema funzionale del circuito termo-idraulico di carica del boiler solare (lato campo solare)

Circuito di scarica del boiler solare

Scopo del circuito termo-idraulico di scarica è quello di condizionare la temperatura e la portata d'acqua in ingresso al boiler solare e di mantenere tali grandezze stabili per tutto il periodo di monitoraggio (condizioni di stabilità richieste: $< 1\%$ per quanto riguarda la portata; $< 0.1^{\circ}\text{C}$ per quanto riguarda la temperatura). Anche in questo caso il circuito è provvisto di resistenze scaldanti della potenza complessiva di 5 kW in grado di portare la temperatura dell'acqua alle condizioni operative richieste. Il circuito è provvisto anche di un sistema di raffreddamento costituito da 2 scambiatori connessi in serie della potenza minima di 5 kW ad una temperatura dell'acqua di processo di 20°C . L'impianto è progettato per funzionare sia a circuito aperto, con alimentazione

diretta ad acqua di rete, sia a circuito chiuso. In entrambi i casi un opportuno anello di ricircolo consente di generare un flusso d'acqua a temperatura e portata controllata secondo le richieste del metodo di prova. La commutazione tra le due configurazioni a circuito aperto e a circuito chiuso, è garantita da un opportuno sistema di elettrovalvole che permette di gestire le operazioni di prova in maniera totalmente automatica.

La figura seguente mostra lo schema funzionale di tale circuito.



Schema funzionale del circuito termo-idraulico di scarica del boiler solare (lato utenza)

Articolazione dei test

I test sono raggruppati in sei sezioni per ognuna delle quali sono previste più prove. Di seguito si da una descrizione sommaria degli scopi dei test delle varie sezioni e se ne descrivono per sommi capi le sequenze operative che vengono realizzate utilizzando opportunamente i due circuiti di carica e scarica connessi, rispettivamente, allo scambiatore solare con lo scopo di fornire energia termica all'accumulo, e all'ingresso e all'uscita dell'accumulo per simulare il prelievo da parte dell'utenza.

- **SEZIONE 1** (*Test indicati con la lettera C*). Scopo dell'insieme dei test che costituiscono tale gruppo è la determinazione del volume dell'accumulo, del coefficiente di scambio termico dello scambiatore posto nella parte inferiore dell'accumulo e connesso al campo solare, della stratificazione durante la scarica, cioè quando viene prelevato fluido caldo dall'accumulo da parte dell'utente che viene rimpiazzato con acqua di rete.

Di seguito a scopo esplicativo viene riportata la descrizione di uno dei test che fanno parte di tale sezione. Tale test ha lo scopo di determinare volume, coefficiente di scambio termico e

stratificazione in condizioni di portata relativamente bassa. Innanzitutto si effettua il condizionamento del sistema mediante il circuito di scarica inviando all'accumulo acqua a 20°C con una portata dipendente dalle dimensioni dell'accumulo fino al raggiungimento dello stato stazionario. In seguito mediante il circuito di carica si fa fluire attraverso lo scambiatore acqua a temperatura variabile e potenza termica costante fino a raggiungere una temperatura in uscita dallo scambiatore di 60°C. Si scarica poi l'accumulo inviando attraverso il circuito di scarica acqua a 20°C fino al raggiungimento dello stato stazionario.

- **SEZIONE 2** (*Test indicati con la lettera S*). Scopo di tale gruppo di test è la determinazione del grado di stratificazione durante un processo di scarica a portata elevata. In questo caso è prevista un'unica prova uguale nella struttura a quella precedentemente descritta tranne che per il valore della portata che è il doppio di quello precedentemente considerato e comunque non inferiore a 600 l/h.
- **SEZIONE 3** (*Test indicati con la lettera L*). Tale gruppo di test ha lo scopo di determinare il coefficiente di perdita termica durante lo stand-by dell'accumulo. Anche in questo caso è necessario eseguire più test per poter stimare correttamente i valori del parametro da determinare. In questo caso al processo di condizionamento già descritto nelle sezioni precedenti, segue un processo di carica a temperatura o potenza termica costante. L'accumulo viene poi lasciato in stand – by per un periodo di 48 ore alla fine del quale si procede alla scarica con acqua a 20 C e portata fissata in base alle dimensioni dell'accumulo.
- **SEZIONI 4-6** (*Test identificati con le sigle NiA, NiB, EiA ed EiB*). I test relativi a tali sezioni hanno lo scopo di determinare il coefficiente di scambio termico dell'ausiliario e la sua posizione, la determinazione della posizione e lunghezza di eventuali resistenze scaldanti, la determinazione per tale parte dell'accumulo della degradazione della stratificazione durante lo stand – by. Le procedure di test sono simili a quelle descritte in precedenza, vi sono poi tre parti specifiche che riguardano la caratterizzazione del sistema ausiliario. Ad esempio, la determinazione del coefficiente di scambio termico dell'ausiliario e della sua posizione prevede i seguenti passi: condizionamento del sistema fino a raggiungere lo stato stazionario; carica a potenza costante fino a quando il sensore dell'ausiliario non segna 60°C, scarica con acqua a 20°C fino al raggiungimento dello stato stazionario.

L'insieme dei dati acquisiti durante i test descritti in precedenza, vengono poi utilizzati per l'identificazione dei parametri caratteristici del boiler solare attraverso il ricorso ad un modello alle differenze finite che risponde a precisi requisiti che peraltro devono essere verificati attraverso un'opportuna procedura di validazione.

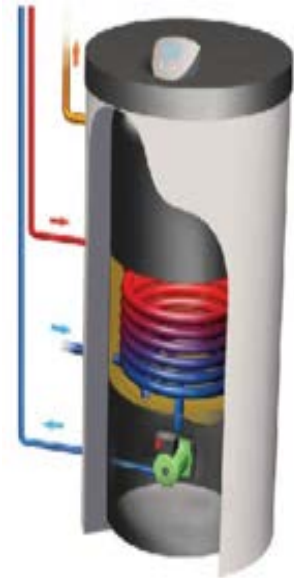
Il box successivo illustra sinteticamente le principali caratteristiche del modello matematico da implementare per l'identificazione parametrica del boiler solare.

Modello matematico del boiler solare

Il modello matematico del boiler solare è basato sul metodo alle differenze finite applicato agli n segmenti (o nodi) in cui viene suddiviso l'intero serbatoio solare. L'equazione seguente descrive la variazione di energia interna di ogni singolo nodo, ciascuno caratterizzato dallo stesso valore della capacità termica.

$$\frac{C_S}{N} \times \frac{dT_{S,i}}{dt} = \sum_p m_{dp} \times c_{p,S} \times [S_1 \times (T_{S,i-1} - T_{S,i}) + S_2 \times (T_{S,i} - T_{S,i+1})] + \frac{Q_{aux}}{n_{aux}} + S_{hx,S} \times \frac{(UA)_{hx,S}}{n_{hx}} \times (T_{hx,i} - T_{S,i}) + \lambda_{eff} \times \frac{A}{Z} \times N \times [(T_{S,i+1} - T_{S,i}) + (T_{S,i-1} - T_{S,i})] - \frac{(UA)_{s,a,k}}{n_{s,a,k}} \times (T_{S,i} - T_{amb})$$

I termini riportati a destra rappresentano rispettivamente: il trasporto di calore dovuto allo scambio di energia tra nodi adiacenti; l'energia fornita dal riscaldatore ausiliario (Q_{aux}) considerato come sorgente termica interna; il calore scambiato tra i diversi nodi e lo scambiatore di calore (caratterizzato da un coefficiente di scambio termico $(UA)_{hx,S}$); gli effetti dovuti alla conducibilità termica tra i diversi nodi; un termine che tiene conto delle perdite termiche verso l'ambiente esterno (attraverso un opportuno coefficiente di perdita $(UA)_{s,a,k}$).



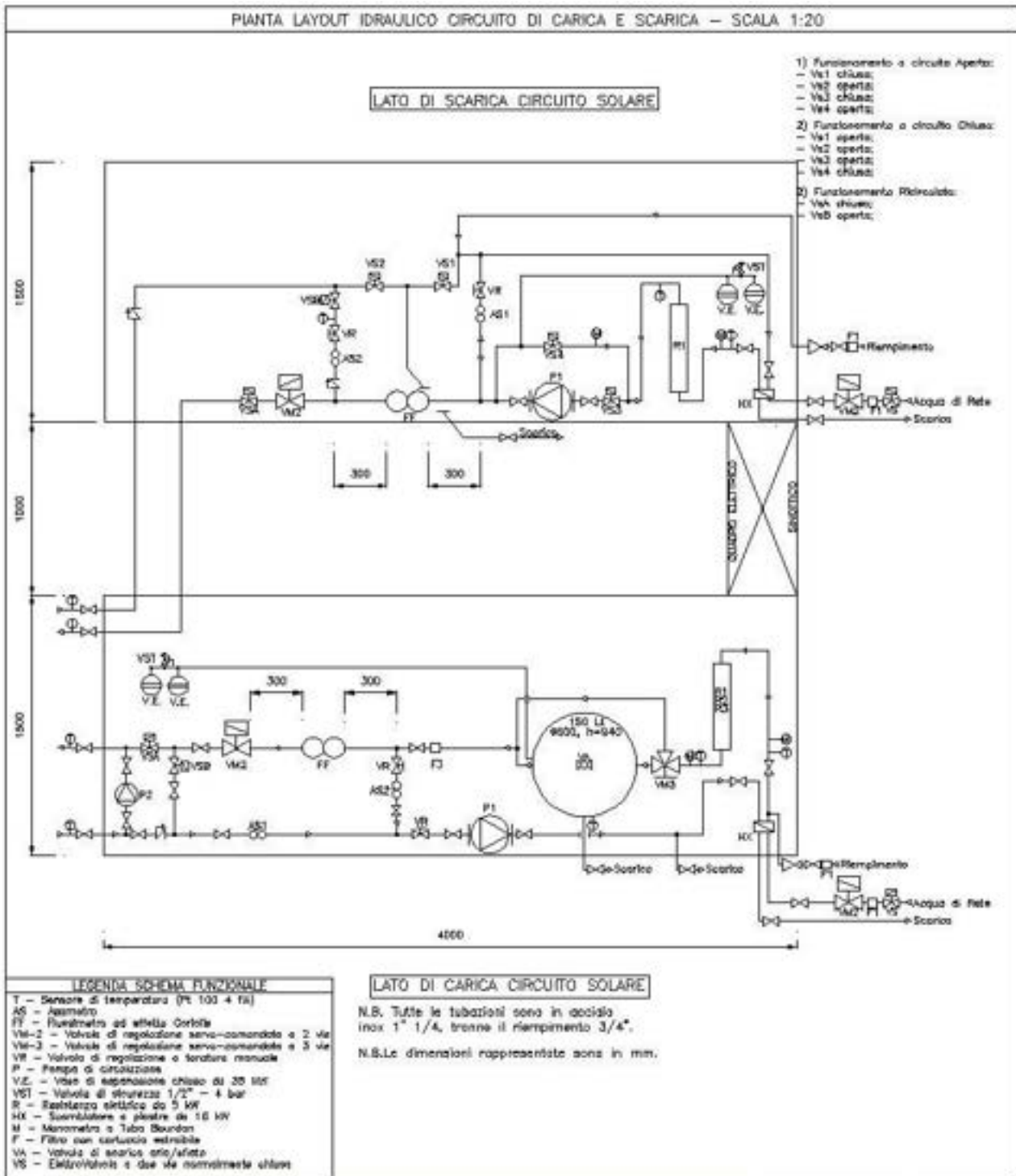
Esempio di tipologia di boiler solare soggetto a test secondo la norma EN 12977-3

Schema tipo del boiler solare e descrizione del modello matematico utilizzato per l'identificazione dei parametri caratteristici dello stesso.

2.2.2 Progettazione e realizzazione dell'impianto di prova

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.

La figura seguente mostra lo schema funzionale dei due circuiti di prova da utilizzarsi per l'effettuazione dei test di carica e scarica del serbatoio solare. Tale schema riproduce la pianta del layout idraulico dell'intero sistema di prova così come è stato realizzato, con l'indicazione dei vari strumenti di misura e dei relativi componenti fluidistici. L'impianto è stato assemblato su apposito skid in modo da consentirne un facile posizionamento nell'area predisposta per l'esecuzione dei test.



P&I del circuito termo-idraulico per l'effettuazione delle procedure di carica e scarica del boiler solare

Contestualmente alla progettazione e realizzazione del circuito termo-idraulico, si è proceduto ad implementare un sistema di acquisizione dati (basato su un sistema NI-CompactDAQ della National Instruments) munito di moduli per l'input e l'output sia analogico che digitale. Tale sistema

consente di acquisire le diverse grandezze fisiche richieste dal metodo di prova, nonché di controllare in modo totalmente automatico le diverse fasi di prova. Di seguito sono riportate le principali caratteristiche:

- Chassis in grado di alloggiare moduli di Input/Output analogico o digitale;
- Modulo di acquisizione e controllo con risoluzione a 16 bit, dotato di connettività Ethernet per il collegamento ad un PC dedicato;
- Modulo per l'acquisizione di segnali analogici, sia in tensione che corrente, con canali indipendenti dotati di amplificatori a controllo di guadagno e filtri passa basso a 2 Hz;
- Modulo per l'acquisizione di RTD a 4 fili con canali indipendenti dotati di amplificatori a controllo di guadagno e filtri passa basso a 5 Hz;
- Modulo per l'acquisizione di segnali in tensione con canali multiplexati su singolo amplificatore da utilizzare per misure differenziali di temperatura con alto livello di accuratezza;
- Scheda PCI per l'interfacciamento del sistema di acquisizione dati con il PC dedicato.



Immagine del sistema NI-CompactDAQ della National Instruments utilizzato per l'acquisizione dei dati sul circuito di prova degli accumuli

2.3 Realizzazione di un circuito di test per prove indoor su collettori solari

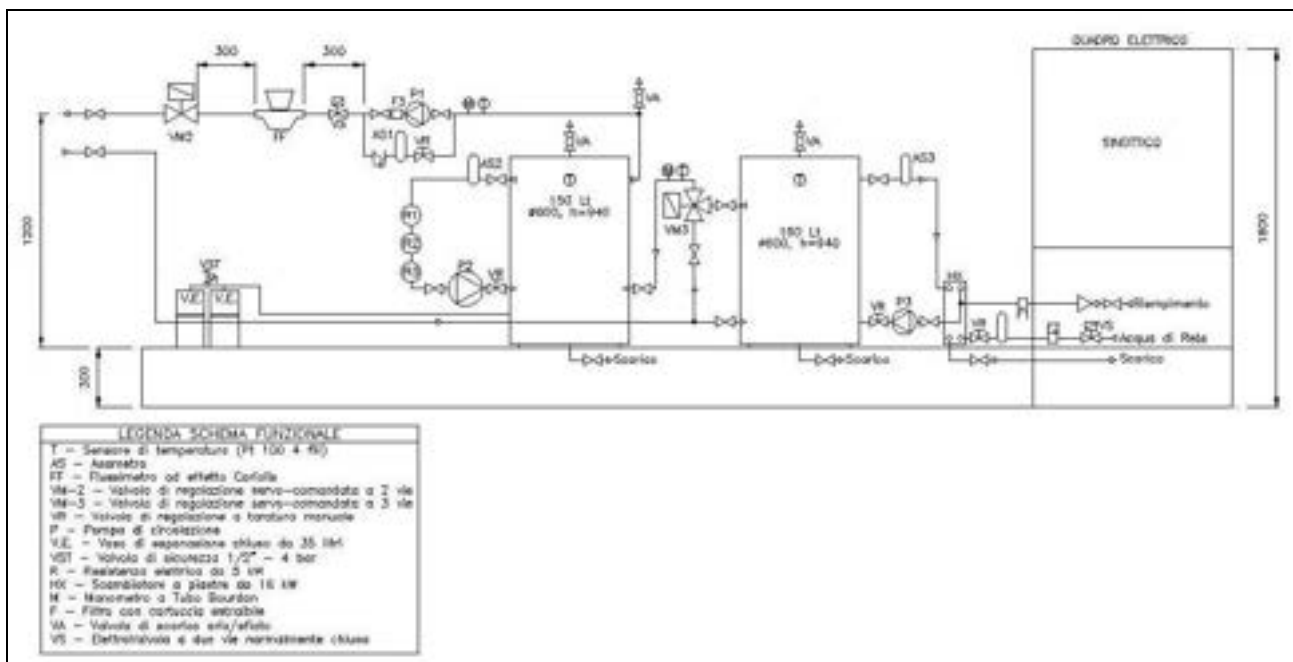
Gli obiettivi di tale task si collocano nell'ottica di dotare il laboratorio solare del CR ENEA Trisaia di una stazione sperimentale per l'esecuzione di test indoor in condizioni controllate. Tale esigenza è stata motivata dalle problematiche emerse durante le attività sperimentali condotte su prototipi di collettori solari oggetto di sviluppo ed ottimizzazione delle prestazioni termiche. Infatti, l'influenza di fattori quali la non perfetta stabilità di parametri meteo-climatici quali l'irraggiamento solare, ha portato a notevoli complicazioni nella misura degli effetti prodotti dall'introduzione di modifiche nei materiali e nella struttura dei componenti sotto test. Per superare tali difficoltà si è deciso di implementare un opportuno apparato sperimentale che ricorrerà all'utilizzo di un simulatore solare

che si prevede di realizzare nella prossima annualità. Pertanto l'attività oggetto della presente task si è principalmente articolata nelle fasi di dimensionamento e successiva realizzazione del circuito termoidraulico di prova che consente di testare collettori di piccola sia commerciali che allo stato di prototipo.

Analogamente a quanto già fatto per l'impianto ad olio diatermico, dovendo anche in questo caso rispettare dei criteri stringenti di stabilità per ciò che riguarda la temperatura in ingresso al collettore si è optato per un circuito in cui fossero presenti serbatoi inerziali per lo smorzamento delle fluttuazioni di tale grandezza. In particolare (vedi schema funzionale riportato nella figura seguente) nel circuito è presente un serbatoio per l'accumulo del fluido caldo riscaldato da resistenze elettriche e da un serbatoio per l'accumulo del fluido freddo raffreddato con acqua di rete. Per entrambi i serbatoi è previsto un rimescolamento mediante pompe onde evitare fenomeni di stratificazione. Il controllo delle temperature e della portata è effettuato mediante controllori PID. La supervisione dell'intero impianto è affidata invece ad un quadro di controllo a PLC che controlla e automatizza le diverse fasi operative dell'impianto.

Per la progettazione e il dimensionamento dei vari componenti il circuito di test si è fatto ricorso alla simulazione dell'impianto in ambiente Matlab, dai cui risultati è stato possibile ricavare i valori dei diversi parametri di processo nonché verificare che gli stessi rientrassero nelle specifiche di progetto.

La figura seguente mostra in dettaglio lo schema del circuito di test così come è stato realizzato.



Schema funzionale del circuito di test per prove indoor su collettori solari

Analogamente a quanto fatto per l'impianto di prova per gli accumuli solari, si è proceduto ad implementare un sistema di acquisizione dati (basato su un sistema Compact RIO della National Instruments) munito di moduli per l'input e l'output sia analogico che digitale. Tale sistema consente di rilevare da remoto tutti i parametri termo-fluidodinamici e quelli dell'ambiente controllato (temperatura, flusso radiativo al collettore in prova, ecc.).



Immagine del sistema NI-CompactRIO della National Instruments utilizzato per l'acquisizione dei dati sul circuito d'essai per prove indoor su collettori solari

Inoltre, al fine di poter implementare in futuro sistemi avanzati di controllo, l'HW implementato è stato dotato di un sistema PAC (Programmable Automation Controller) di monitoraggio e controllo completamente riconfigurabile, basato su tecnologia FPGA, e dotato di apparecchiature dalle seguenti caratteristiche:

- Chassis riconfigurabile all'interno del quale è alloggiato un chip FPGA interamente programmabile dall'utente;
- Moduli di I/O estraibili a caldo in grado sia di acquisire le diverse grandezze fisiche oggetto di misura (temperature, portate, pressioni, ecc.) sia di generare segnali analogici per controllare le variabili di processo;
- Moduli di I/O digitale per il controllo del processo da ottimizzare;
- Controller real-time per la comunicazione e l'elaborazione deterministica dei dati, in grado anche di supportare algoritmi di calcolo sviluppati in ambienti software di elaborazione quali MatLab, MatScript, ecc.

Infine, le immagini seguenti riportano le foto dell'impianto di prova durante alcune fasi dell'assemblaggio idraulico.



Foto dell'impianto di prova durante alcune fasi dell'assemblaggio idraulico

3. CONCLUSIONI

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

- Dopo un'iniziale fase di messa a punto dell'impianto ad olio diatermico per le prove di efficienza su collettori a concentrazione, sono state condotte diverse campagne sperimentali su diverse tipologie di concentratori in un campo di temperature fino a 250°C. Accanto all'attività di sperimentazione è stata portata avanti un'attività di modellizzazione teorica e di analisi dei processi termo-fluidodinamici ed ottici che caratterizzano tali tipologie di componenti solari.
- Si è proceduto alla progettazione e realizzazione dei circuiti di prova per la caratterizzazione degli accumuli solari, conformemente ai requisiti richiesti dalla normativa tecnica di settore (EN 12977-3).
- Infine, in sostituzione della task relativa allo "Studio, l'implementazione e l'ottimizzazione di sistemi avanzati di controllo per applicazioni di solar-cooling", si è optato per l'utilizzazione delle risorse previste per la realizzazione della parte termo-idraulica di un stazione di prova indoor basata su un simulatore solare. Tale cambiamento è stata motivato dal fatto che l'analisi delle problematiche riguardanti i sistemi di controllo rientrano tra gli obiettivi realizzativi previsti nella linea di attività C.