



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Realizzazione di una test facility per pompe di calore con evaporatore elioassistito

G. Corallo, A. Simonetti, A. Franchi, R. Latini, R. Trinchieri

REALIZZAZIONE DI UNA TEST FACILITY PER POMPE DI CALORE CON EVAPORATORE
ELIOASSISTITO

G. Corallo, A. Simonetti, A. Franchi, R. Latini, R. Trinchieri (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

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
1.1 Obiettivo dell'Attività.....	5
2. LE POMPE DI CALORE ELIOASSISTITE.....	5
3. PROGETTAZIONE FACILITY SPERIMENTALE ENEA.....	13
3.1 Descrizione impianto sperimentale.....	16
3.2 Componenti e strumentazione.....	18
4. SISTEMA ACQUISIZIONE DATI E STRUMENTAZIONE.....	22
5. TEST FUNZIONALI E CONCLUSIONI	24

1. INTRODUZIONE

Obiettivo principale di questa attività è la realizzazione di una facility per la caratterizzazione di pompe di calore elioassistite che ha come finalità la verifica tecnica ed economica della convenienza di questa soluzione impiantistica rispetto a quelle utilizzando altre sorgenti termiche, sia provenienti da combustibili fossili che da fonti rinnovabili (aria o terreno).

Le pompe di calore del tipo a compressione di vapore rappresentano una tecnologia per certi aspetti matura, che viene prevalentemente utilizzata per il raffreddamento e la climatizzazione estiva, mentre per il riscaldamento invernale viene ancora privilegiato nella maggior parte dei casi l'utilizzo di impianti a combustione. La valutazione del possibile utilizzo di pompe di calore elioassistite anche per il riscaldamento invernale va quindi nel senso di una maggiore integrazione e semplificazione (con evidenti vantaggi di carattere economico) degli impianti di climatizzazione estivi ed invernali, consentendo quindi anche un significativo ridimensionamento della quantità di combustibili fossili utilizzati.

La difficoltà principale nell'utilizzo delle pompe di calore anche per il riscaldamento invernale riguarda il reperimento di sorgenti termiche dotate di elevata qualità, intesa come costanza della temperatura ed elevata capacità termica, grandezze che definiscono il grado di inerzia termica della sorgente.

La sorgente termica più comunemente utilizzata nelle macchine a compressione di vapore è l'aria che, pur essendo dotata di una enorme capacità termica, in condizioni invernali ha tuttavia una grande variabilità in termini di temperatura e di umidità tanto da inficiare il COP delle pompe di calore del tipo aria – aria o acqua – aria, sia a causa dell'abbassamento del salto termico disponibile all'evaporatore, sia per la formazione di brina sull'evaporatore stesso. Il limite che sconsiglia l'utilizzo delle pompe di calore per il riscaldamento degli ambienti durante il periodo invernale è quindi legato alla temperatura della sorgente secondaria da cui le macchine traggono energia termica gratuita.

In natura esistono però anche sorgenti di grande capacità termica con una variabilità contenuta della temperatura della sorgente: l'energia termica della terra, ad esempio, può rappresentare una valida alternativa a quella dell'aria in quanto può rappresentare una sorgente a temperatura molto stabile soprattutto se prelevata ad elevate profondità. Pertanto l'utilizzazione dell'energia termica del terreno è realizzata mediante sonde geotermiche installate a profondità notevoli (di norma profondità di circa 80 – 150 metri) con considerevoli costi iniziali di investimento.

Una ulteriore sorgente di energia termica disponibile in natura è quella solare. Il sole fornisce energia ad un livello termico insufficiente per essere sfruttata direttamente negli impianti di distribuzione (radiatori o ventilconvettori). Invece, avvalendosi di pannelli solari termici, è possibile

utilizzare tale sorgente termica in una pompa di calore a scambio acqua-acqua che provvederà ad elevarne il livello termico per consentirne l'utilizzo ad esempio nei ventilconvettori, analogamente a quanto è possibile fare con un sistema che utilizza pompe di calore alimentate da sonde geotermiche.

Il vantaggio della pompa di calore elio assistita rispetto alle pompe di calore alimentate da sonde geotermiche è atteso dal fatto che il costo complessivo dell'impianto, a parità di potenza utile della pompa di calore a scambio acqua-acqua, è notevolmente più contenuto in quanto il campo solare, realizzabile anche con pannelli solari non vetrati, ha un costo di gran lunga più basso rispetto a quello delle sonde geotermiche.

Una temperatura all' evaporatore di 15-20 °C, necessaria per far funzionare al meglio le pompe di calore acqua-acqua, è infatti facilmente ottenibile anche in inverno in un paese ad elevata insolazione come il nostro.

1.1 Obiettivo dell'Attività

Gli obiettivi principali di questa attività riguardano la realizzazione e la messa in servizio di una facility per la caratterizzazione sperimentale di possibili configurazioni di impianti a pompa di calore elio assistita al fine di ottenere dati per un obiettivo confronto tecnico ed economico tra questa soluzione impiantistica ed altre, tradizionali (caldaie a combustibile fossile) o innovative, affini per filosofia energetica (utilizzo di fonti energetiche rinnovabili), ma impiantisticamente più complesse (per es. impianti a pompa di calore geotermica).

2. LE POMPE DI CALORE ELIOASSISTITE

In generale, le pompe di calore sono macchine che in grado di trasferire calore da una sorgente a temperatura più bassa verso una a temperatura maggiore, spendendo dell'energia (fig. 1): questa può essere fornita da un compressore, che richiede un dispendio di energia elettrica (pompe di calore a compressione), oppure da un bruciatore alimentato a gas metano o a GPL (pompe di calore ad assorbimento).



Fig. 1 - Principio di funzionamento di una pompa di calore

La pompa di calore si dice "reversibile" quando è predisposta alla duplice funzionalità di riscaldamento (durante l'inverno) e condizionamento (durante l'estate).

Per stimare l'efficienza di una pompa di calore è utile distinguere tra il funzionamento come riscaldatore e quello come raffrescatore.

Nel funzionamento come riscaldatore (funzionamento invernale), l'effetto utile è il calore ceduto dal condensatore all'ambiente esterno da riscaldare; si definisce quindi il COP (Coefficient of Performance) come rapporto tra questo e l'energia elettrica consumata. In generale, gli ordini di grandezza dei COP ottenibili sono 3,5 per pompe di calore aria-acqua, 4,0 per pompe di calore a sonda geotermica e 4,5 per pompe di calore acqua-acqua.

Nel funzionamento come raffreddatore (condizionamento estivo), l'effetto utile è la quantità di calore assorbita dall'evaporatore della macchina ed estratto dal sistema da climatizzare. In questo caso, come indicatore delle prestazioni viene utilizzato l'EER (Energy efficiency ratio) definito come rapporto tra il calore estratto dalla sorgente a temperatura più bassa sull'energia elettrica consumata.

Viene inoltre utilizzato l'indicatore ESEER (European Seasonal Energy efficiency ratio) definito secondo la tabella e la relazione seguente:

$ESEER = (3 \times EER_{100\%} + 33 \times EER_{75\%} + 41 \times EER_{50\%} + 23 \times EER_{25\%}) / 100$				
Acqua uscita evaporatore				7 °C
ΔT a pieno carico				5 °C
Carico	100%	75%	50%	25%
Temperatura aria esterna	35°C	30°C	25°C	20°C

Tabella 1 – Metodo di calcolo dell'indicatore ESEER

I valori del COP, dell'EER e dell'ESEER dipendono ovviamente dalle temperature effettive delle sorgenti in gioco. Nella figura seguente si riportano i valori delle principali grandezze caratteristiche della pompa di calore AERMEC 015H, che è il modello della prima pompa di calore installata nella facility costruita presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.

RAFFREDDAMENTO		015H
Potenza frigorifera	kW	5,3
Potenza assorbita totale	kW	1,7
Portata acqua evaporatore	l/h	910
Portata acqua condensatore	l/h	1190
Perdita di carico condensatore	kPa	6,3
Consumo acqua condensatore a 16 °C [1]	l/h	320
Perdite di carico condensatore a 16 °C	kPa	1,0

RISCALDAMENTO		
Potenza termica	kW	6,1
Potenza assorbita totale	kW	2,2
Portata acqua condensatore	l/h	1050
Consumo acqua all'evaporatore a 10 °C [1]	l/h	690
Perdite di carico all'evaporatore a 10 °C	kPa	2,0

INDICI ENERGETICI		
EER	W/W	3,12
COP	W/W	2,80
ESEER	W/W	3,78

Tabella 2 – Dati tecnici pompa di calore AERMEC 015H

Questi valori si riferiscono alle condizioni di funzionamento nominali, caratterizzate dai seguenti valori delle temperature delle sorgenti termiche esterne:

In raffreddamento		In riscaldamento	
- Temperatura acqua in uscita	7 °C	- Temperatura acqua in uscita	50 °C
- Temperatura acqua ingresso condensatore	30 °C	- Temperatura acqua ingresso evaporatore	10 °C
- Δt	5 °C	- Δt	5 °C

Tabella 3 - Condizioni di funzionamento nominali

In condizioni diverse da quelle nominali, la potenza termica resa e la potenza elettrica assorbita si ottengono per la pompa moltiplicando i valori nominali (P_t , P_a) per opportuni coefficienti correttivi. In particolare, per la AERMEC 015H le figure seguenti riportano i coefficienti correttivi C_t per la potenza termica resa e C_a per la potenza elettrica assorbita.

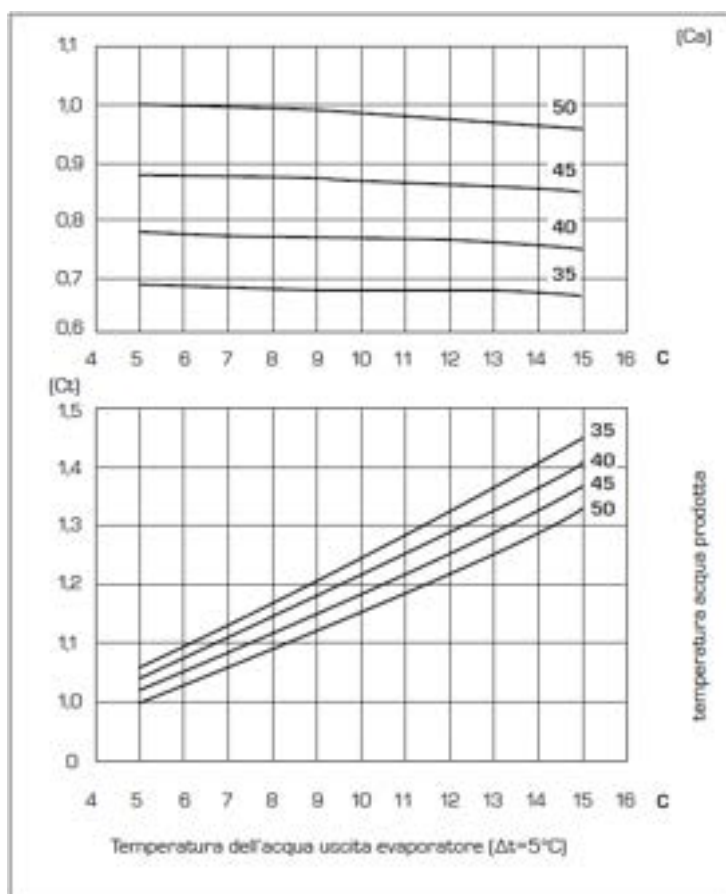


Figura 2 – Fattori correttivi della potenza termica resa (C_t) e della potenza elettrica assorbita (C_a)

EVAPORATORE	3	5	8	10
Fattori di correzione potenza frigorifera	0,99	1	1,02	1,03
Fattori di correzione potenza assorbita	0,99	1	1,01	1,02
Fattori di correzione potenza termica	0,99	1	1,02	1,03
CONDENSATORE		5	8	10
Fattori di correzione potenza frigorifera		1	1,01	1,02
Fattori di correzione potenza assorbita		1	0,99	0,98

Tabella 4 – Fattori correttivi della potenza termica resa e della potenza elettrica assorbita al variare del ΔT all'evaporatore ed al condensatore

Nelle figure è riportato in ascisse il valore della temperatura dell'acqua all'uscita evaporatore mentre ciascuna curva si riferisce ad un diverso valore della temperatura dell'acqua calda prodotta. Si suppone in queste figure che il ΔT tra temperatura dell'acqua tra ingresso e uscita del condensatore sia sempre pari a 5°C.

Dal diagramma del C_t , appare evidente che un aumento della temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore (e gioco forza di quella di ingresso, supponendo costante il ΔT) può consentire un cospicuo incremento della potenza termica resa dalla macchina.

Proprio in virtù dell'ultima considerazione, allo scopo di migliorare l'efficienza (il COP) delle pompe di calore, si può pensare di integrare queste ultime, nel funzionamento invernale, con sistemi di riscaldamento della sorgente a temperatura più bassa, ad esempio di tipo solare.

Questi sistemi sono formati da un sistema di captazione di energia solare, generalmente collettori a bassa efficienza, collegati ad una pompa di calore di tipo acqua-acqua per la produzione di acqua calda, che viene poi mandata al sistema di distribuzione del calore interno all'edificio servito dall'impianto. Un possibile schema di impianto è riportato nella figura seguente. Il tipo di accoppiamento termico proposto in questo schema viene definito accoppiamento "in serie": l'energia solare, accumulata nel serbatoio come calore a bassa temperatura, viene direttamente trasferita all'evaporatore della pompa di calore al fluido che compie il ciclo frigorifero. Viene quindi incrementata la sua entalpia, a favore di una minore somministrazione di energia meccanica da parte del compressore.

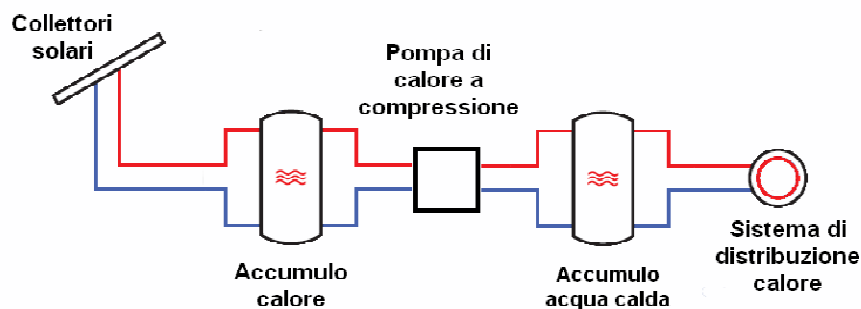


Figura 3 - Schema essenziale di un impianto elio assistito in funzionamento invernale con abbinamento termico in serie

In questo schema di massima non è riportata la parte di impianto eventualmente dedicata al raffrescamento, poiché può essere totalmente staccata dal resto dell'impianto o addirittura assente. L'impianto sperimentale costruito presso il centro ricerche della Casaccia è caratterizzato da questa filosofia impiantistica per il funzionamento invernale, ma prevede anche la possibilità di monitorare e testare il funzionamento delle pompe di calore nel funzionamento estivo (funzione di condizionamento).

La tecnologia descritta presenta notevoli vantaggi rispetto ad altre tecnologie affini (pompe di calore abbinate a sonde geotermiche) in particolare per i bassi costi di investimento iniziale. In effetti se i collettori solari hanno soltanto la funzione di fornire un riscaldamento ausiliario (e non anche di generare acqua calda), è possibile utilizzarne di economici a basso rendimento.

Oltre alla tipologia di impianto sopra descritta, sulla quale si ritornerà nei paragrafi relativi alla descrizione delle fasi di progettazione e realizzazione del nostro impianto sperimentale, ne esistono altre di seguito descritte.

Una possibile tipologia di impianto è stata proposta da Robert A. Wood per la realizzazione di una pompa di calore elio assistita e reversibile (*Reversible solar assisted heat pump*), che prevede l'uso di collettori scoperti che in inverno vengono usati per riscaldare la sorgente della pompa di calore e in estate diventano degli scambiatori di calore per raffreddare il fluido termovettore e dissipare l'energia estratta dall'edificio.

Esiste un altro tipo di impianto di riscaldamento elio assistito chiamato *integral type solar-assisted heat pump* (ISAHP) che prevede un funzionamento più articolato rispetto a quello appena descritto, nel quale i collettori solari vanno a far parte direttamente della pompa di calore, costituendone l'evaporatore.

Fra i primi sistemi realizzati del genere si segnala l'impianto del 1950 progettato dai pionieri del settore P. Sporn e E. Ambrose, autori di un articolo scientifico a riguardo nel 1955. L'impianto non ha però avuto successivi sviluppi a causa degli elevati costi che ne condizionavano l'impiego e ne compromettevano il vantaggio economico nel periodo di pre-crisi energetica. Questi sistemi sono però recentemente studiati da diversi ricercatori fra i quali citiamo Chaturvedi, Hino e Ito. Ai quali se ne aggiungono molti altri negli ultimi dieci anni.

Un sistema ISAHP è composto da un ciclo di refrigerazione Rankine accoppiato con un collettore solare che funziona da evaporatore. Il refrigerante espande direttamente dentro l'evaporatore assorbendo l'energia solare.

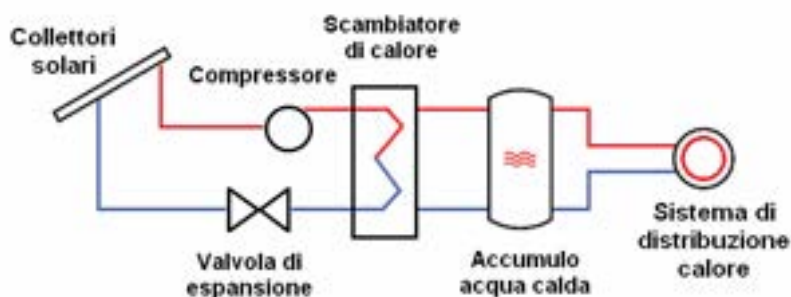


Figura 4 - Schema di un impianto ISAHP

Nello schema di figura 4 si può identificare il circuito del ciclo frigorifero, composto dai collettori solari, il compressore, la valvola di espansione e lo scambiatore di calore.

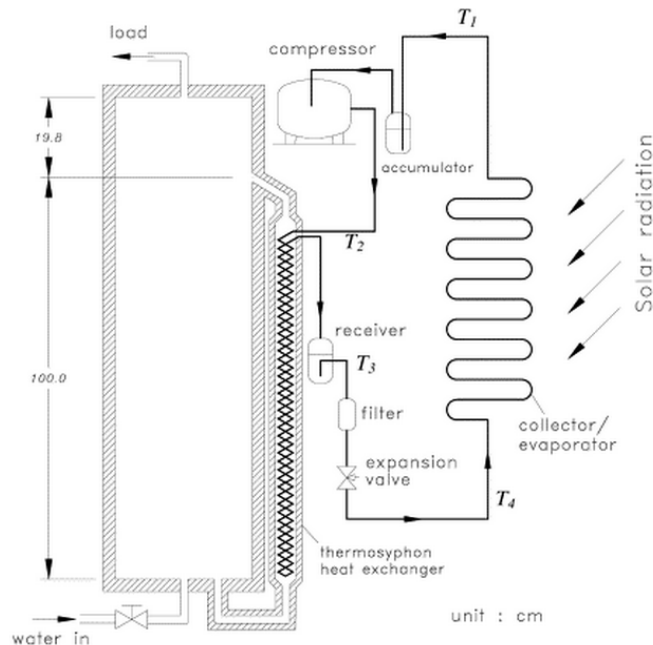


Figura 5 - diagramma schematico della pompa di calore. Fonte: Huang e Chyng (2001)

In figura 5 FIGURA è rappresentato lo schema costruttivo della pompa di calore di un ISAHP in formato compatto, disegnata da Huang e Chyng. Nello schema è rappresentato anche il serbatoio di accumulo.

A seconda delle condizioni operative dell'ISAHP si hanno due situazioni diverse: il calore può essere dissipato verso l'ambiente dalla superficie dei collettori se la temperatura ambiente è più bassa della temperatura dei collettori. Con un appropriato progetto del ciclo di refrigerazione e dei collettori per specifiche condizioni operative, il calore può essere fornito sia dall'ambiente per convezione che dalla radiazione solare, favorendo l'evaporazione.

Chaturvedi et al. nel 1980 hanno presentato un'analisi teorica delle prestazioni istantanee di un ISAHP e hanno mostrato come la temperatura di evaporazione dipenda dalla radiazione solare e dalla temperatura ambiente. Quindi può essere maggiore o minore della temperatura ambiente a seconda delle condizioni operative. Lo stesso Chaturvedi, nel 1998, ha presentato uno studio teorico e sperimentale delle prestazioni di un ISAHP utilizzando un collettore scoperto e un compressore a frequenza variabile. Dai suoi risultati emerge come la temperatura ottimale di evaporazione del collettore sia di 5-10 °C sopra la temperatura ambiente. Nel 1999 Ito ha presentato un sistema simile utilizzando sempre una temperatura di evaporazione superiore alla temperatura ambiente. Da un punto di vista ingegneristico, oltre all'efficienza, è importante valutare l'affidabilità del sistema. In questo senso una temperatura di evaporazione troppo alta costringe il compressore stesso a lavorare a temperature più alte, soprattutto in uscita, che potrebbero superare il limite consentito dal compressore. A questo proposito Huang e Chyng (2001) hanno presentato sperimentalmente un sistema ISAHP nel quale la temperatura di evaporazione fosse inferiore alla

temperatura ambiente, in modo da mettere al sicuro il compressore e utilizzare l'apporto energetico dell'ambiente esterno.

Kuang e Wang (2005) hanno presentato in un articolo più recente un sistema ISAHP che funziona anche nel periodo estivo in raffrescamento. Durante il raffrescamento il sistema viene utilizzato solamente durante le ore notturne, per sfruttare la minore temperatura esterna e non avere l'apporto solare negativo. A tale scopo il sistema dispone di un accumulo giornaliero.

Axaopoulos et al. (1998) hanno monitorato dal 1993 al 1997 un sistema ISAHP e un sistema solare convenzionale a termosifone per confrontare i due sistemi: dai loro risultati emerge come sia impossibile stabilire un singolo parametro di confronto poiché i due sistemi usano diverse sorgenti energetiche. A seconda delle applicazioni alcuni parametri possono quindi diventare più o meno importanti.

I vari studi fatti hanno evidenziato valori del COP quasi mai superiori a 4: i valori medi si aggirano intorno a 3 a seconda degli studi considerati. Quasi tutti i ricercatori concordano comunque sull'importanza di avere un sistema regolabile per poter inseguire le condizioni ottimali di funzionamento: infatti rispetto ad una pompa di calore tradizionale, il rendimento del sistema è molto più sensibile alle condizioni operative. In questo contesto, lo sviluppo di compressori regolabili può contribuire notevolmente al miglioramento e allo sviluppo di questi sistemi.

Sul mercato questa tecnologia non trova attualmente molto spazio. Da segnalare la Solar PST, una casa spagnola fondata nel 2008, che produce sistemi ISAHP per il riscaldamento e raffrescamento di ambienti e produzione di ACS.

Esistono altre varianti di questo sistema presentate in letteratura, quasi tutte con applicazioni solamente sperimentali. Fra queste le più innovative prevedono l'integrazione del sistema elioassistito con sistemi geotermici o fotovoltaici.

L'integrazione con un sistema fotovoltaico consiste nello sfruttare il riscaldamento prodotto dai pannelli fotovoltaici per fornire calore al fluido frigorifero favorendone l'evaporazione. L'effetto frigorifero prodotto dai collettori favorisce inoltre il raffreddamento dei moduli fotovoltaici migliorandone il rendimento. Badescu (2003) ha simulato un sistema composto da moduli fotovoltaici e collettori solari per l'impianto ISAHP. Dai suoi risultati emerge come tale sistema, dotato di opportune batterie, possa funzionare stand alone con l'energia elettrica richiesta della pompa di calore fornita dai moduli fotovoltaici.

Yumrutas et al. (2003) e Kuang et al. (2003) hanno studiato sistemi di riscaldamento solari elioassistiti dotati di accumuli stagionali sotterranei geotermici. Secondo i risultati di Yumrutas sistemi di questo tipo sono concorrenziali e rappresentano una alternativa realistica alle fonti fossili. Allo stesso modo Kuang sostiene come l'accumulo stagionale sia un elemento fondamentale per un

sistema di riscaldamento elioassistito. Kuang, nel sistema da lui studiato, considera una temperatura di accumulo molto vicina alla temperatura ambiente, per questo motivo le dispersioni termiche del serbatoio hanno un peso secondario. Inoltre Kuang evidenzia come un sistema ausiliario sia indispensabile per ottenere le condizioni di confort, ma mentre un sistema ausiliario interno al sistema di accumulo porta notevoli perdite, l'ausiliario posto in prossimità del carico è economicamente sostenibile.

Un'altra configurazione possibile che integra un impianto geotermico ad un elio assistito, prevede di disporre i collettori solari in serie alle sonde geotermiche. O. Ozgener e A. Hepbasli (2005) hanno presentato diversi articoli su un sistema simile con sonde geotermiche profonde 50 metri. Il sistema da loro studiato presenta COP variabili fra 2 e 3.125. Sempre secondo gli autori questo sistema trova un clima ideale in zone mediterranee, specialmente se si ha la possibilità di regolare l'impianto per gestire picchi di irraggiamento solare. Uno schema tipico è presentato in figura 6.

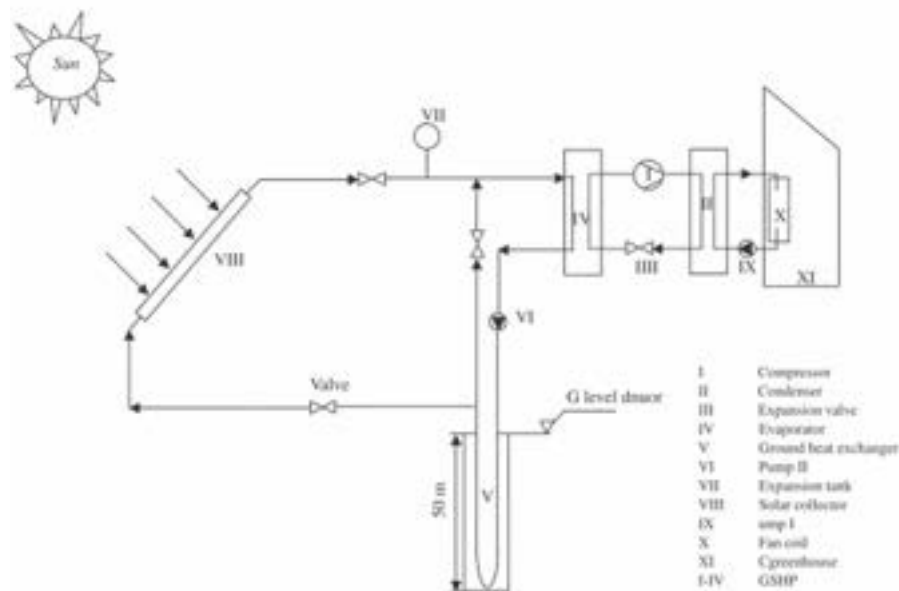


Figura 6 - Schema di un impianto geotermico con integrazione solare. Fonte: Ozgener e Hepbasli (2005)

3. PROGETTAZIONE FACILITY SPERIMENTALE ENEA

Un sistema di climatizzazione a pompa di calore elioassistita consiste in un normale impianto a pompa di calore ad acqua, nel quale l'acqua a monte della pompa di calore è preriscaldata tramite dei collettori solari (fig. 3). Per garantire la continuità di esercizio anche in condizioni di assenza di irraggiamento solare è necessario prevedere anche l'istallazione di una batteria di riscaldamento esterna ad aria. Questa stessa batteria può essere utilizzata con funzioni di raffreddamento durante l'estate se le temperature superano quelle massime ammissibili per l'evaporatore della pompa di calore.

La batteria di raffreddamento/riscaldamento può essere montata in configurazione “parallelo” (fig. 7) o “serie” (fig. 8).

La configurazione in parallelo FIGURA 7, prevede l'utilizzo della batteria o dei collettori solari a seconda della temperatura in uscita dai due elementi, in modo tale da usare la batteria aletta non appena il contributo dei collettori solari non sia migliore della temperatura ambiente. In presenza di irraggiamento il fluido viene bypassato dalla batteria.

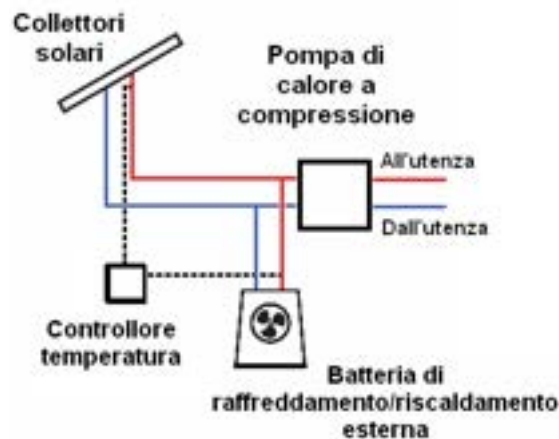


Figura 7 - Schema di un impianto elioassistito con batteria di raffreddamento/riscaldamento in parallelo

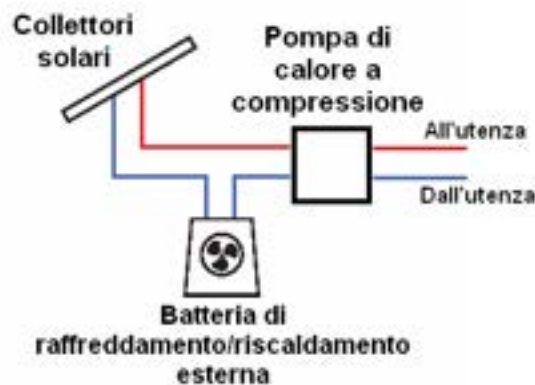


Figura 8 - Schema di un impianto elioassistito con batteria di raffreddamento/riscaldamento in serie

Nell'altra configurazione di fig. 8 vengono sempre usati sia la batteria che i collettori, che sono impiantisticamente disposti in serie. In questo modo si ottiene un primo riscaldamento del fluido termovettore per convezione e un successivo ulteriore riscaldamento grazie all'irraggiamento solare. In caso di assenza di irraggiamento solare i collettori forniscono comunque un minimo apporto energetico per convezione, poiché il fluido in uscita dalla batteria avrà una temperatura comunque minore di quella ambiente. In ogni caso nel periodo estivo i collettori sono bypassati.

Per dimensionare correttamente i vari elementi del circuito di prova, è stata condotta una simulazione dinamica dello stesso mediante il codice TRNSYS, nelle condizioni meteo della zona di Roma (Fig. 9).

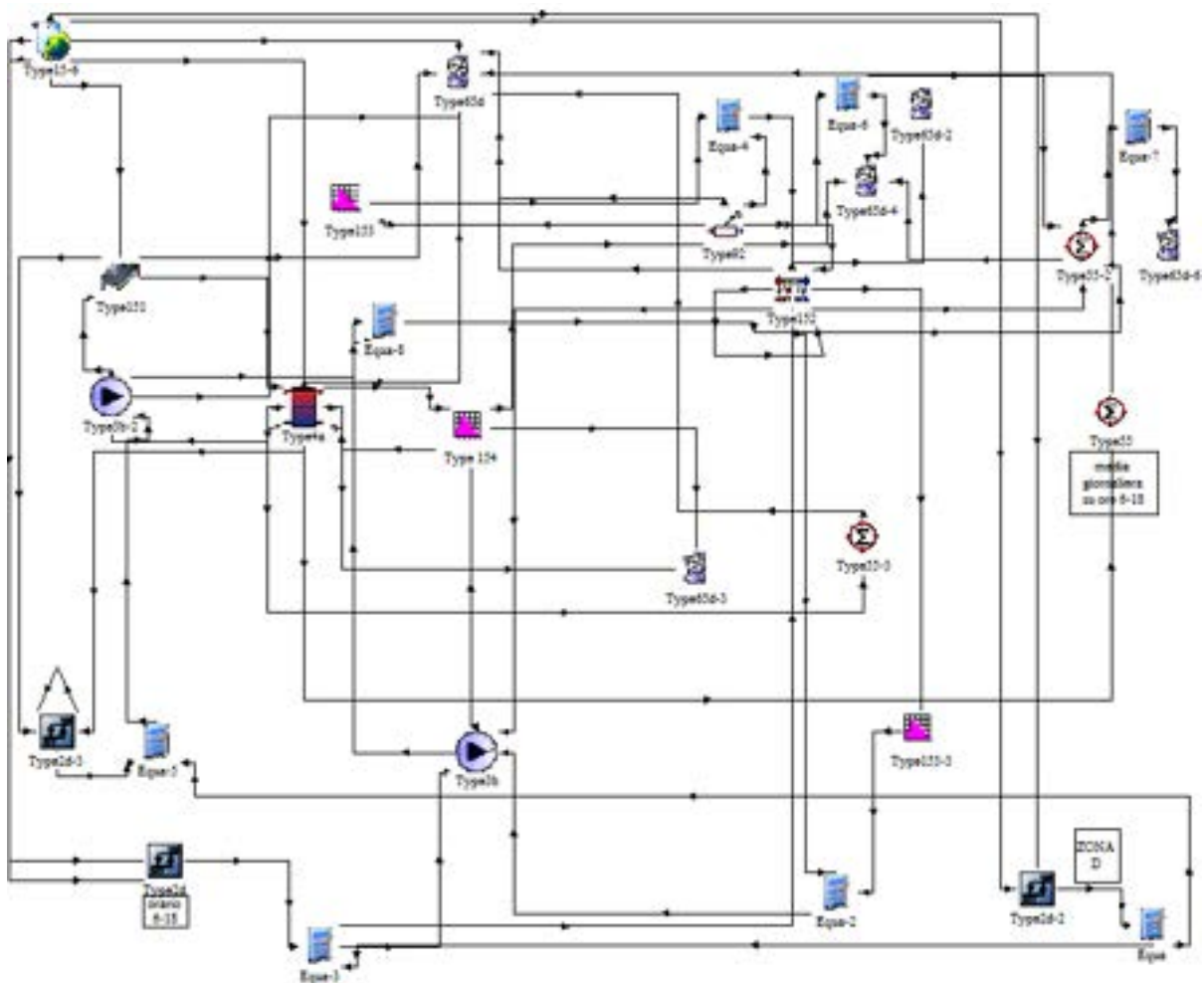


Fig. 9- Schema TRNSYS per facility elioassistito

La simulazione ha richiesto lo sviluppo di alcuni componenti speciali, chiamati Types, il primo Type 151, per descrivere il comportamento di un pannello in materiale sintetico senza copertura vetrata, secondo il metodo di H. Soltau (1992), il secondo, Type 152 per replicare in modo virtuale il comportamento della pompa di calore prescelta (AERMEC-VENICE 015H), a seguire la Type 153 per descrivere il comportamento della miscela anticongelante acqua-glicole etilenico, adoperata nel circuito, ed infine la Type 154 che descrive il comportamento di una speciale valvola a tre vie con controllo tipo Feed Forward, sul serbatoio di accumulo solare, per fare in modo che la temperatura di ingresso all' evaporatore della macchina non superi quella massima consentita dal fabbricante.

I risultati della simulazione mostrano che col clima di Roma è necessario installare almeno 40 m^2 di pannelli solari non vetrati ed un accumulo da circa 2 m^3 per avere sempre temperature invernali

adeguate all'evaporatore, con COP risultanti compresi tra 2.5 e 4.1 con una media stagionale di 3.98 (Fig.10), un valore molto elevato considerando le prestazioni nominali delle macchine di piccola taglia.

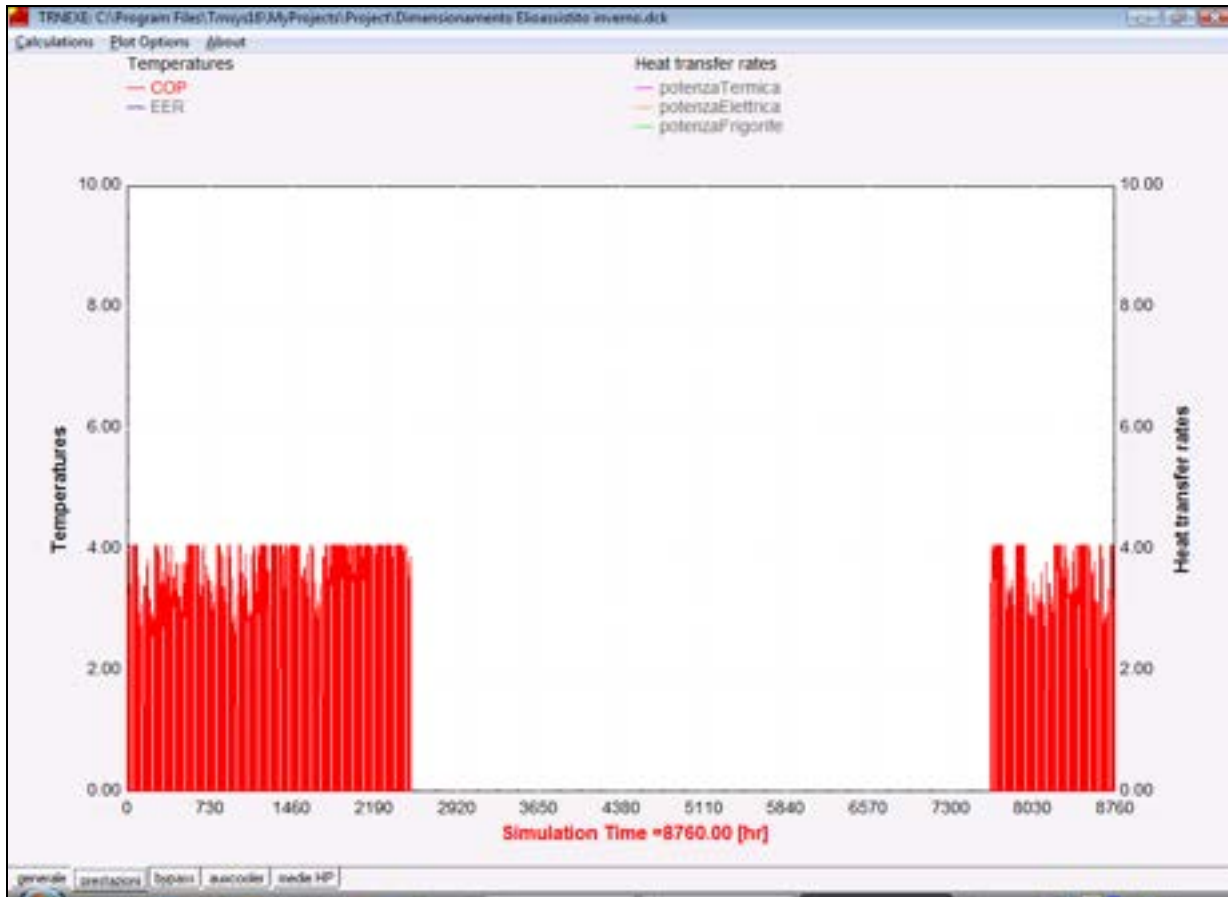


Fig. 10-Proiezione del COP invernale

3.1 Descrizione impianto sperimentale

La definizione del layout definitivo del laboratorio per il test delle pompe di calore elio assistite ha tenuto conto della necessità di ottenere una notevole continuità di funzionamento, sia nella configurazione estiva che, soprattutto, in quella invernale: lo schema funzionale dell'impianto che ne è scaturito è mostrato in figura 11.

Nel funzionamento invernale, la pompa di calore produce al condensatore un incremento di temperatura dell'acqua destinata all'utenza di 5°C, portandola a circa 50°C. L'acqua uscente dall'evaporatore viene inviata, tramite la pompa PC02, al serbatoio VES01 della capacità di 2000 litri, dopo essere passato attraverso la valvola miscelatrice a tre vie. L'acqua, prelevata dal serbatoio per mezzo della pompa di circolazione P01, viene mandata ai collettori solari ed ivi riscaldata. Quando la temperatura all'interno del serbatoio raggiunge il valore di set, viene chiuso il flusso d'acqua verso i collettori per mezzo di un sistema di regolazione che agisce sulla pompa P01.

L'acqua è infine prelevata dal serbatoio per essere inviata alla mandata dell'evaporatore della pompa di calore. Nel caso in cui la temperatura dell'acqua proveniente dal serbatoio risulti troppo elevata, con il rischio di ottenere per il fluido refrigerante un valore di temperatura superiore a quella massima ammissibile all'evaporatore ($\sim 20^{\circ}\text{C}$), questa viene miscelata con acqua fredda uscente dall'evaporatore azionando opportunamente la valvola a tre vie: è inoltre possibile raffreddare ulteriormente l'acqua deviando la valvola e facendo passare il fluido attraverso l'air-cooler AC01.

Nel funzionamento estivo, l'acqua inviata all'utenza viene raffreddata di 5°C all'evaporatore, fino a temperature dell'ordine dei 7°C . L'acqua uscente dal condensatore viene avviata attraverso la valvola a tre vie VR1 ed attraverso la valvola on-off VR2 all'air-cooler AC-01 dove viene raffreddata per convezione forzata prima di essere rinviata all'ingresso del condensatore.

Ovviamente in questa tipologia di funzionamento, i collettori solari non vengono utilizzati.

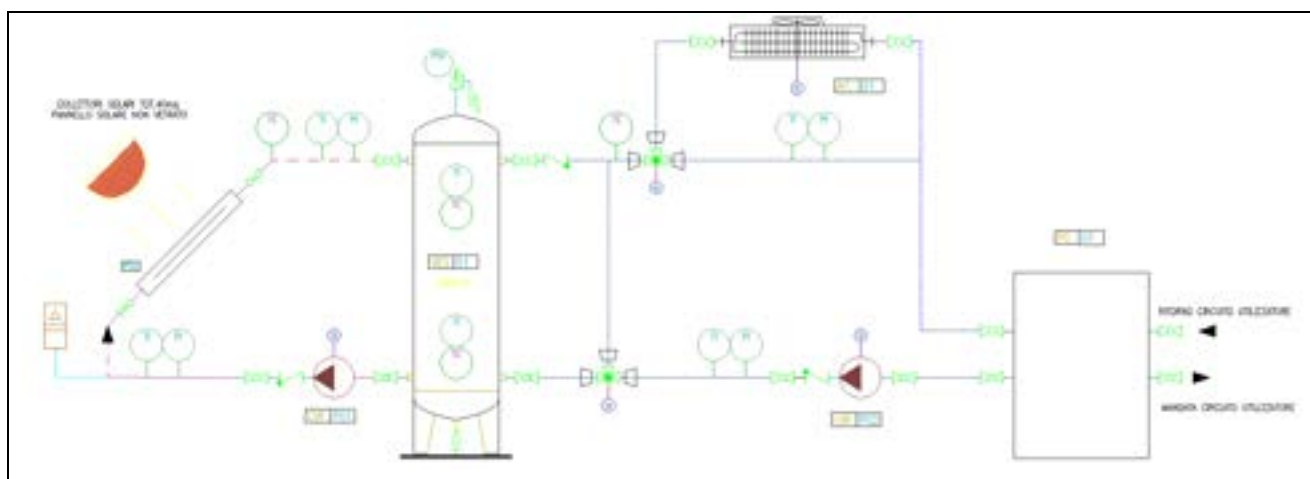
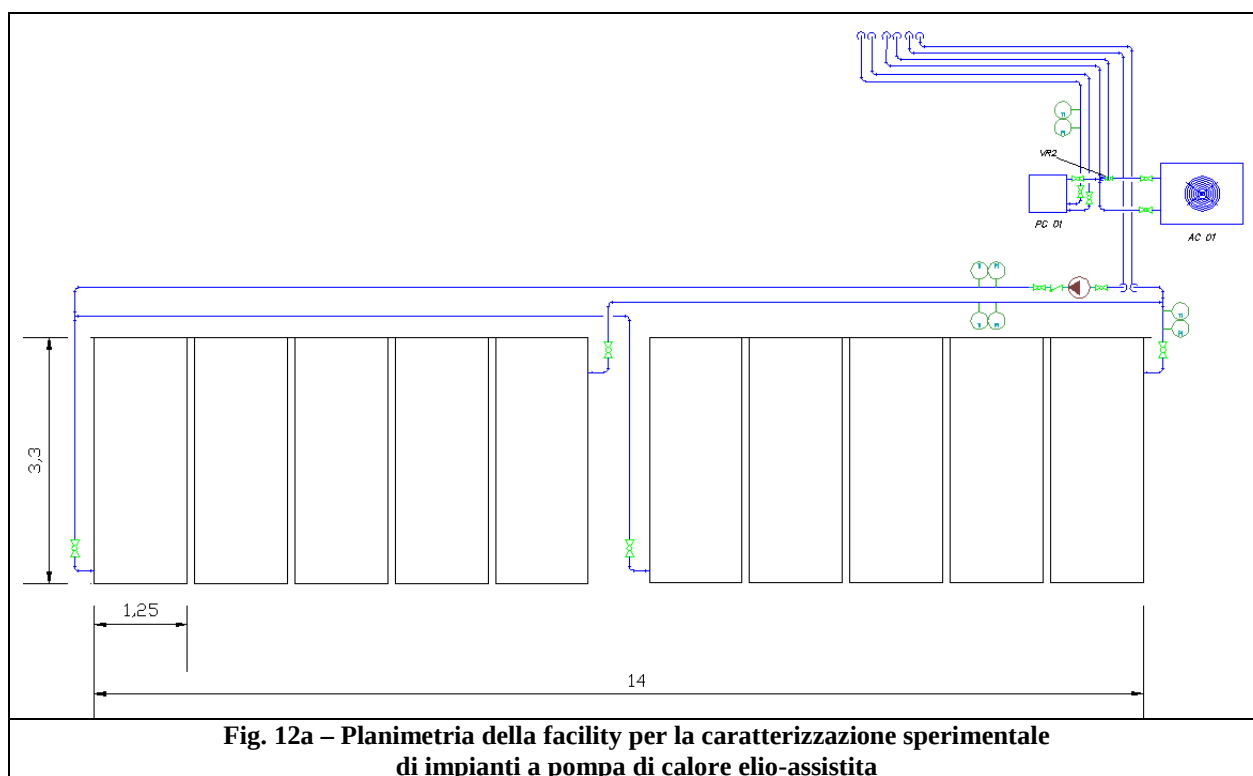
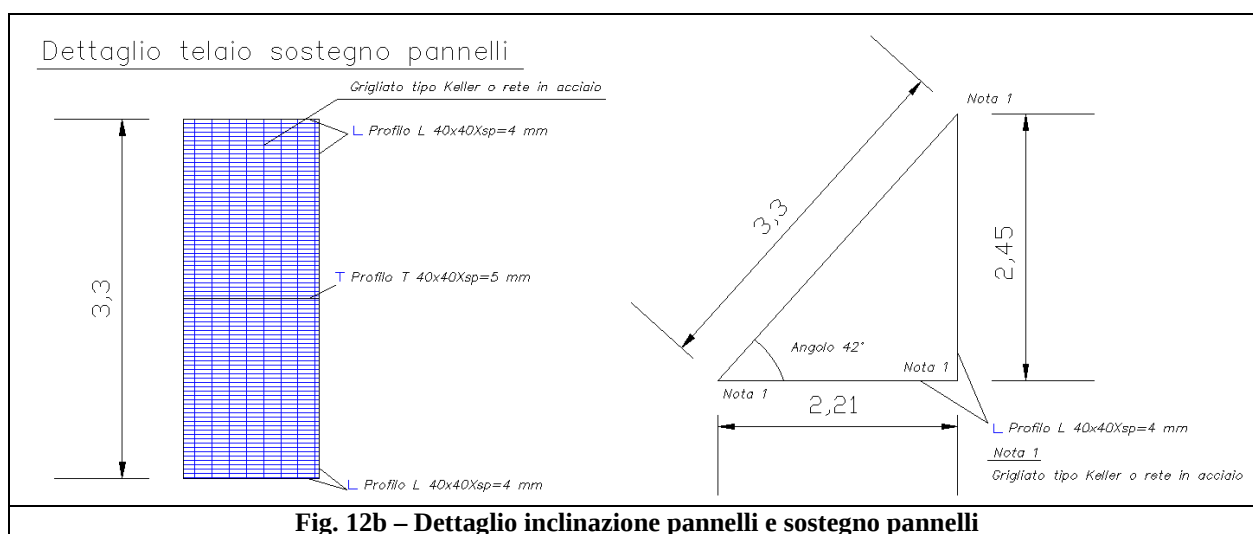


Fig.11 - Schema funzionale della facility per la caratterizzazione sperimentale di impianti a pompa di calore elio-assistita

La fig. 12a mostra la planimetria dell'impianto: essa evidenzia in particolare la disposizione in serie dei moduli solari per una superficie totale complessiva di $41,25 \text{ m}^2$:



Nella fig. 12b sono rappresentati alcuni dettagli costruttivi e l'inclinazione dei pannelli, installati con orientamento a SUD:



3.2 Componenti e strumentazione

I principali componenti impiegati nel progetto della facility di prova sono (fig. 10):

- Pompa di calore acqua-acqua PC01;
- Pompe di circolazione CIR01 e CIR02;
- Valvola miscelatrice a tre vie VR1;

- Valvola ON-OFF VR2;
- Collettori solari PSX;
- Air-cooler AC01;
- Serbatoio inerziale VES01.

Di seguito vengono brevemente descritti i componenti effettivamente impiegati sull'impianto sperimentale realizzato presso il centro ricerche ENEA della Casaccia.

- Pompa di calore acqua-acqua AERMEC MOD. VENICE 015H

Le caratteristiche termodinamiche di funzionamento sono state illustrate nel paragrafo 2. Utilizza l'R407C come fluido frigorifero.



Fig. 13 – Pompa di calore AERMEC 015H

- Pompa di circolazione

Le due pompe di circolazione CIR01 e CIR02 sono dello stesso tipo (fig. 14). Si tratta di pompa di circolazione a rotore bagnato con attacco flangiato. E' dotata di stadi di velocità preimpostabili per l'adattamento delle prestazioni e può essere utilizzata per sistemi di riscaldamento ad acqua calda, impianti di ricircolo industriali, impianti di condizionamento e circuiti di refrigerazione chiusi.



Fig. 14 - Circolatore tipo WILO TOP E25/1-7

- Valvola miscelatrice a tre vie



Fig. 15 - Valvola miscelatrice tipo Watts mod V3BM DN20 KVs 6.3

- Collettori solari

Per il dimensionamento e la scelta della tipologia di collettori da adottare per il campo solare, non esistono procedure standardizzate perché la tecnologia delle pompe di calore elioassistite non ha ancora nessun tipo di applicazione commerciale. Riguardo al tipo di collettori, la maggior parte dei ricercatori concordano sull'opportunità di utilizzare collettori scoperti a basso rendimento, per sfruttare il riscaldamento per convezione quando la temperatura del fluido nei collettori è minore di quella ambiente. Inoltre i collettori scoperti hanno un costo nettamente inferiore a qualunque tipo di collettore vetrato.

E' stato scelto di adottare un campo solare con dimensioni di circa 40 m² sia per ottimizzare la superficie a disposizione sia perché, dalle nostre simulazioni è stato rilevato che la superficie captante ottimale deve essere di questo ordine di grandezza. Con un campo solare di tali dimensioni inoltre si riduce l'incidenza percentuale del costo del campo solare sull'investimento totale dell'impianto.



Fig. 16 – Particolare dei tubi in propilene sunstar

Il singolo elemento dei collettori (fig. 16), in polipropilene, ha le dimensioni di 3.3x1.25. L'impianto costruito presso il Centro ricerche Casaccia è dotato di due moduli accoppiati in serie ognuno costituito da cinque elementi per il raggiungimento di una superficie totale irraggiata di circa 41,25 m², che, tra l'altro, ottimizza al massimo lo spazio disponibile (fig.17).



Fig. 17 – Campo solare installato presso il CR Casaccia

- Air - Cooler

E' stato selezionato per l'istallazione il modello AERMEC CSE 314 BM (fig. 18)



Fig. 18 – Air-Cooler modello AERMEC CSE 314 BM

- Serbatoio inerziale VES01 (fig.19)



Fig. 19 – Serbatoio inerziale in fase di montaggio

4. SISTEMA ACQUISIZIONE DATI E STRUMENTAZIONE

Il sistema di acquisizione dati (SAD) dedicato alla realizzazione della test-facility per pompe di calore con evaporatore elio assistito è installato nella sala adibita a prove presso l'edificio C47 ed è così assemblato:

VARIABILE	DESCRIZIONE	UNITA'	TIPO
hh:mm:ss	Orario campionamento	Ore:min:sec	Derivata
SecLView	Orario riferimento LabView	sec	Primitiva
TE1	Temp. Uscita campo solare	°C	Primitiva
TE2	Temp. Ingresso High serbatoio	°C	Primitiva
TE3	Temp. Uscita Low serbatoio	°C	Primitiva
F1	Portata Acqua campo solare	l/min	Primitiva
STer1	Scambio termico campo solare	KW	Derivata
Sol1	Irradiazione solare	W/m ²	Primitiva
Tu1	Sensore umidità	Perc	Primitiva
Ve	Velocità vento	m/sec	Primitiva
REG1	Regolazione pompa PO1	0/0	Primitiva
TE4	Temp. Uscita High serbatoio	°C	Primitiva
TE5	Temp. ingresso pompa calore impianto	°C	Primitiva
TE6	Temp.uscita pompa calore impianto	°C	Primitiva
F2	Portata acqua pompa calore	l/min	Primitiva
W1	Consumo pompa di calore	KW	Primitiva
TE7	Temp. ingresso pompa calore	°C	Primitiva
TE8	Temp. uscita pompa di calore	°C	Primitiva
F3	Portata acqua lato utenza	l/min	Primitiva
STer2	Scambio termico lato utenza	KW	Derivata

Tabella 5: Legenda delle variabili trattate dal SAD.

- 1 - Pc con sistema operativo windows XP e software di acquisizione dati LabView 7.1;
- 2 - Data Logger HP 3852;
- 3 – N° 1 Sensore di radiazione globale EKO mod. MS-602;
- 4 – N° 1 Sensore termoigrometrico mod. TE-EE23/TE-SC-951;
- 5 – N° 1 Sensore per la velocità del vento R.M. Young mod. TE-12102;
- 6 - N° 1 Wattmetro per la misura dell'assorbimento della pompa di calore;
- 7 – N°8 Termoresistenze Pt 100 TERSID;
- 8 – N° 3 Misuratori di flusso KHRONE a induzione magnetica.

Per la precisione dei vari sensori ci siamo normalmente attenuti alle dichiarazioni o certificazioni ufficiali dei costruttori.

Per la taratura delle Pt100 è stato utilizzato il fornello di calibrazione JOFRA mod. D 50 RC., certificato con precisione minore di +/- 0,1 °C nel campo -50 / 75 °C.

La taratura è stata effettuata nel campo 0-70 °C con passo 5 °C, registrando i valori di resistenza elettrica mediante un multimetro FLUKE mod. 8520 A, con precisione di $\pm 1 \text{ m}\Omega$, dopo la completa stabilizzazione della misura.

I valori così raccolti sono stati interpolati ai minimi quadrati, mediante polinomi del secondo ordine, che hanno fornito uno scarto massimo minore di 0,1 °C su tutte le misurazioni.

Le resistenze sono collegate al data logger attraverso cavi a 4 fili con guardia onde evitare disturbi nella lettura.

Gli altri segnali sono acquisiti attraverso segnale a 4-20 mA.

Il tempo di campionamento delle varie misure è di 1 min.

Con riferimento ai files di dati generati dal SAD (in formato xls), le varie sigle delle grandezze acquisite direttamente dal SAD (primitive) o successivamente elaborate (derivate) per la contemporanea visualizzazione sul display del PC hanno il significato riportato in tabella 1.

5. TEST FUNZIONALI E CONCLUSIONI

Con la test facility realizzata sarà possibile qualificare il funzionamento di pompe di calore acqua-acqua di piccola potenza, analizzandone il comportamento in abbinamento ad un sistema elio assistito. Si è quindi deciso di utilizzare una superficie captante (circa 41.25 m^2) prossima a quella massima disponibile, in modo da ampliare la possibilità di utilizzo della test facility realizzata.

La pompa di calore elioassistita è decisamente una tecnologia impiantistica poco sviluppata e nel mercato, salvo rare eccezioni, risulta completamente assente. È però oggetto di studio di diversi ricercatori e ne esistono diversi impianti sperimentali.

Dalle prime simulazioni dinamiche effettuate, risulta evidente l'aumento della potenza termica fornita e l'abbassamento della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore abbinata ai collettori solari durante il funzionamento invernale.

La campagna invernale che è in procinto di essere condotta sulla test facility servirà a confermare la bontà delle simulazioni ed i metodi di progettazione adottati.