



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Messa in funzione e analisi sperimentale del prototipo
di macchina elioassistita

G. Corallo, A. Franchi, A. Simonetti, L. Di Rienzo, A. Fanchiotti



MESSA IN FUNZIONE E ANALISI SPERIMENTALE DEL PROTOTIPO DI MACCHINA ELIOASSISTITA

G. Corallo, A. Franchi, A. Simonetti (ENEA), L. Di Rienzo, A. Fanchiotti (UNIVERSITA' ROMA TRE)

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



ACCORDO DI PROGRAMMA

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO - ENEA

AI SENSI DELL'ART. 3 COMMA 2 DEL DECRETO MINISTERIALE 23 MARZO 2006 PER LE

ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO DI INTERESSE GENERALE

PER IL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE 2008-2009

Progetto 3.4 "Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva"

**Utilizzo dell'energia elettrica e solare per condizionamento estivo
Attività A. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi**

**MESSA IN FUNZIONE E ANALISI SPERIMENTALE DEL PROTOTIPO
DI MACCHINA ELIOASSISTITA**

Aldo Fanchiotti - Università RM3

Giuseppe Corallo - ENEA

Luigi Di Rienzo - Università RM3

Aldo Franchi - ENEA

Andrea Simonetti - ENEA

- SOMMARIO -

- 1 - SCHEMA DI IMPIANTO E FUNZIONAMENTO DELLA FACILITY**
 - 1.1 - FUNZIONAMENTO INVERNALE
 - 1-2 - FUNZIONAMENTO ESTIVO

- 2 - NOTE E CONSIDERAZIONI SULLA FASE DI MONITORAGGIO**

- 3 - FASE INVERNALE, DATI DI MARZO**
 - 3.1 - ANDAMENTI GIORNALIERI
 - 3.2 - RISULTATI GENERALI

- 4 - FASE ESTIVA, DATI DI GIUGNO E LUGLIO**
 - 4.1 - FUNZIONAMENTO CON L'AEROTERMO
 - 4.2 - UTILIZZO DEI PANNELLI COME DISSIPATORI

- 5 - LA SIMULAZIONE CON TRNSYS**
 - 5.1 - FASE INVERNALE
 - 5.2 - FASE ESTIVA

- 6 - CONCLUSIONI**

- 1- SCHEMA DI IMPIANTO E FUNZIONAMENTO DELLA FACILITY -

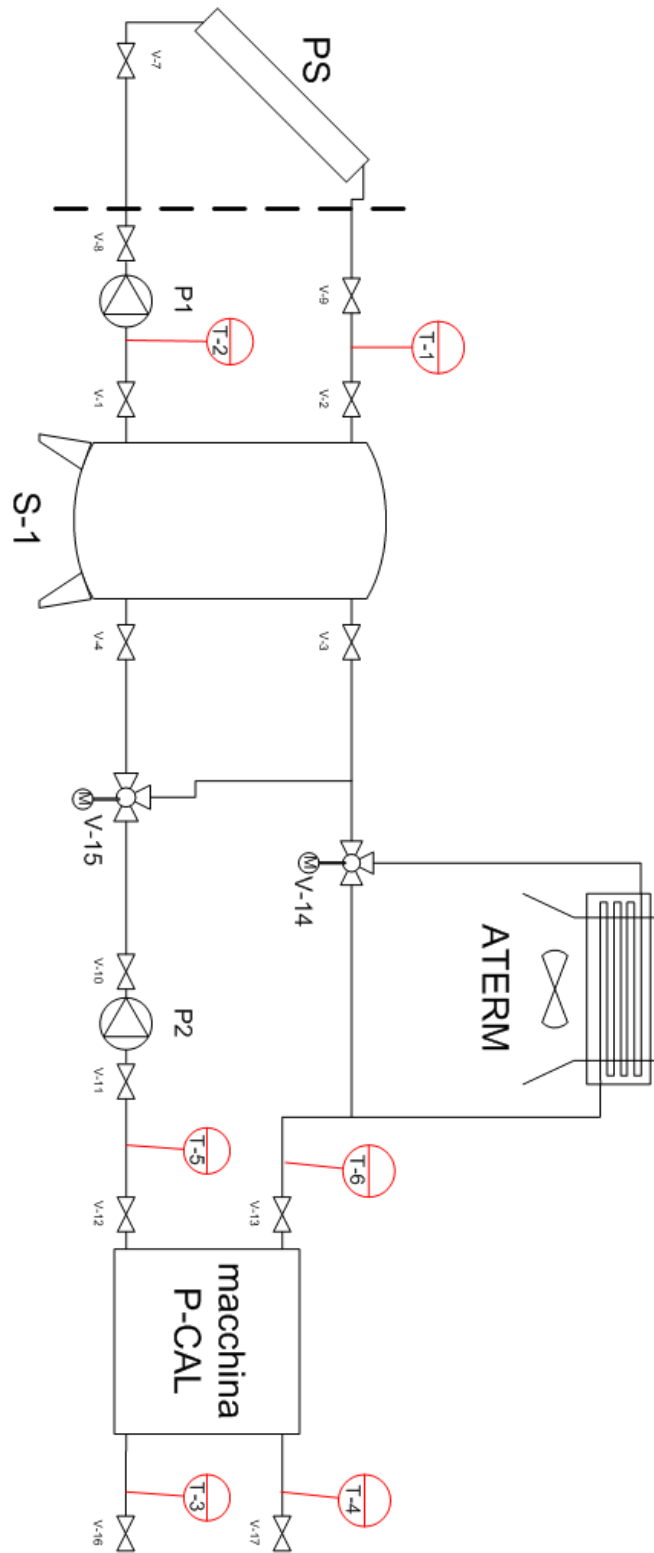


Figura 1; schema della facility installata alla Casaccia

Nella figura 1 nella pagina precedente è riportato lo schema di impianto realizzato alla Casaccia e messo in funzione.

Si notano le componenti principali, ovvero:

- PS, i pannelli solari posti all'esterno dell'edificio che contiene la facility

I pannelli installati sono del tipo a collettori scoperti, dal basso rendimento ma anche dal costo specifico contenuto, adatti all'applicazione in questione dove è necessario solo un leggero riscaldamento ausiliario. La superficie totale adottata è di 40 m^2 : i singoli elementi, di dimensioni $3,3 \times 1,25 \text{ m}^2$, sono stati accoppiati in maniera da costituire due moduli.



In figura è riportata la fotografia dei pannelli installati alla Casaccia.

Infine, l'angolo di inclinazione scelto è di 42° .

- ATERM, aeroterma per la dissipazione del calore

L'aeroterma scelto, è il modello AERMEC CSE 314 BM, di cui in figura si riporta un'immagine.



La potenza elettrica per il funzionamento del dry-cooler è di 500 W.

- S-1, serbatoio per l'accumulo

L'accumulo utilizzato ha una capacità di 1,5 m³, ed è stato isolato termicamente e posto all'interno della struttura dove si sono poi raccolti i dati

- P-CAL, pompa di calore

Per quanto riguarda la pompa di calore, all'inizio è stata utilizzata il modello AERMEC MOD. VENICE 015H, ma successivamente, date le non ottimali prestazioni, è stata cambiata per la fase estiva.

Questo discorso verrà approfondito ampiamente nella relazione.



Accanto a questi componenti principali si notano anche(sempre facendo riferimento alla fig.....):

- P1 e P2, le due principali pompe di circolazione

Queste due pompe sono dello stesso tipo a rotore bagnato con attacco flangiato, modello WILO TOP E25/1-7: in fig... si riporta un immagine del modello.



- V-14 e V-15, le due valvole a tre vie necessarie per la regolazione di impianto

In rosso (sempre in fig...) sono infine indicati le posizioni e la nomenclatura dei termostati utilizzati per la campagna di monitoraggio.

A valle della pompa di calore, non rappresentata nello schema, è presente un rubinetto che simula l'utenza e che permette di regolare la temperatura di lavoro della macchina e il suo ritorno.

A seconda che all'impianto venga richiesto riscaldamento o raffreddamento la modalità di funzionamento cambia utilizzando in maniera diversa le diverse componenti.

Qui di seguito si riportano anche i costi sostenuti per l'installazione dell'impianto:

COSTI DELLE COMPONENTI PRINCIPALI DI IMPIANTO [€]	
Pompa di calore	3672
Dry cooler	1206
Pannelli solari (40m ²)	3526
Accumulo (1,5 m ³)	1650
Due pompe di circolazione	300
Valvola a tre vie + regolatore	500
Quadro elettrico	1000
TOTALE	11854

- 1.1 - Funzionamento invernale -

In questa fase vengono utilizzati i pannelli per riscaldare l'acqua da mandare al secondario della pompa di calore, in maniera che quest'ultima mantenga rendimenti elevati per maggior tempo: verranno dunque utilizzati i pannelli accoppiati con il serbatoio mentre verrà escluso dal funzionamento l'aerotermo.

Durante il periodo di accensione dell'impianto l'utenza simulata riceve acqua calda a 45°C e la restituisce a 40°C e queste due temperature vengono monitorate attraverso i due termostati T-3 e T-4.

I pannelli ricevono acqua dal serbatoio e la riscaldano il più possibile prima di rinviarla all'accumulo, nel frattempo l'acqua del serbatoio viene prelevata per essere inviata al secondario della macchina per essere utilizzata nell'evaporatore: la pompa dei pannelli viene azionata da un regolatore solo quando la differenza di temperatura fra il fondo del serbatoio e l'uscita dei pannelli è superiore a 5°C.

La macchina utilizzata prevede come temperatura massima di mandata al secondario 20°C, quando l'acqua prelevata dal serbatoio supera questo limite entra in funzione in maniera automatica il sistema di gestione che aziona la valvola di regolazione V-15 che opera il miscelamento fra il flusso di mandata e ritorno con lo scopo di abbassare la temperatura al livello voluto: più è necessario abbassare la temperatura più si apre la valvola quasi bypassando il serbatoio. Nel caso poi che questa miscelazione non basti si aziona la valvola V-14 che invia l'acqua all'aerotermo che provvede al raffreddamento.

Le due temperature di ingresso e uscita dall'evaporatore sono monitorate attraverso T-5 e T-6.

È da notare che la filosofia di questa regolazione è sì quella di mantenere la temperatura sotto il limite di 20°C ma anche quello di cercare di tenerla il più vicino possibile a quest'ultimo valore in maniera da ottenere le migliori prestazioni.

La macchina, per quanto riguarda il secondario, prevede anche un limite sulla temperatura minima: non può essere servita da acqua a meno di -2°C altrimenti entra in blocco.

- 1.2 - Funzionamento estivo -

In questa modalità l'utenza fittizia in questo caso riceve acqua fredda a 7 °C e, attraverso il rubinetto di regolazione che riscalda questo flusso, la restituisce in mandata alla macchina a circa 10 °C.

La pompa di calore deve cedere calore al condensatore e a più bassa temperatura lo riceve migliori saranno le sue prestazioni: il ri-raffreddamento del fluido che è utilizzato per questo scopo viene operato dall'aerotermo.

I pannelli e il serbatoio nella fase del raffreddamento estivo non vengono utilizzati, viene fermata la pompa e si aziona la valvola a tre vie posta a valle del serbatoio che impedisce il passaggio dell'acqua.

Quando si passa a questa fase estiva, la macchina automaticamente cambia il circuito interno con un sistema di valvole e rende disponibile sul secondario lo scambiatore del condensatore e utilizza invece l'evaporatore per servire l'utenza. Come si può immaginare anche in questo caso la prestazione della macchina è influenzata dalla temperatura esterna ambiente in quanto è proprio utilizzando quest'ultima che l'aeroterma provvede al raffreddamento dell'acqua da inviare al condensatore: più alta sarà la temperatura dell'aria esterna peggiore sarà lo scambio termico e quindi di conseguenza saranno più alte le temperature di mandata al secondario della macchina.

In realtà, come poi verrà approfondito nel seguito della relazione, per questa operazione, si è pensato anche di utilizzare i collettori solari: coprendoli con un telo ombreggiante si è pensato di sfruttare le loro capacità di scambio di calore per convezione con l'ambiente.

Se si esclude questa particolare possibilità di utilizzo dei pannelli, il campo solare e il serbatoio rimangono inutilizzati durante questa fase di funzionamento e vengono esclusi con la valvola tre vie posta a valle del serbatoio.

- 2 - NOTE E CONSIDERAZIONI SULLA CAMPAGNA DI MONITORAGGIO -

L'obiettivo principale della campagna è stato quello di verificare sia che l'impianto funzionasse sia che le prestazioni dell'intero sistema migliorino sensibilmente con l'utilizzo del gruppo di collettori solari per il riscaldamento dell'acqua in mandata all'evaporatore della pompa di calore.

Per il controllo e l'analisi del funzionamento dell'impianto è stata installata un sistema di acquisizione dati che permette la registrazione dell'andamento di molte grandezze, alcune in maniera sperimentale diretta, altre in maniera derivata.

Le grandezze acquisite sono state:

- **T-1**, temperatura dell'acqua in arrivo dai pannelli
- **T-2**, temperatura dell'acqua verso i pannelli
- **T-3**, temperatura di servizio all'utenza fittizia
- **T-4**, temperatura di ritorno dall'utenza
- **T-5**, temperatura di ritorno dal secondario della macchina
- **T-6**, temperatura di mandata dell'acqua al secondario della macchina
- **Fsol**, portata d'acqua ai pannelli solari
- **FpdC**, portata d'acqua all'utenza fittizia
- **Fsec**, portata d'acqua al secondario della macchina
- **Watt**, potenza elettrica assorbita dalla macchina

- **Qsol**, apporto energetico dei pannelli solari
- **kWt**, potenza termica prodotta dalla macchina
- **COP**, coefficiente di prestazione della macchina

Ognuna di queste grandezze è stata acquisita (o calcolata automaticamente) attraverso una piattaforma LABVIEW e quindi registrata su un computer server.

Attraverso l'analisi di queste grandezze si è cercato di valutare l'effetto benefico dei pannelli solari utilizzati sul comportamento della macchina: dalle curve caratteristiche della pompa di calore erano attesi sensibili miglioramenti sul COP.

Nella fase invernale non ci si è potuto avvalere di una centralina meteorologica: l'installazione di quest'ultima è avvenuta successivamente ma ha permesso, almeno per i mesi di giugno e luglio, di acquisire anche i seguenti dati:

- **SOL_V**, radiazione solare su superficie verticale
- **SOL_O**, radiazione solare su superficie orizzontale
- **UMID**, valore di umidità relativa
- **Anem**, velocità del vento
- **T.est**, temperatura dell'ambiente esterno

In linea generale si può dire che durante le varie fasi l'impianto si è comportato piuttosto bene permettendo l'acquisizione di molti dati ma comunque si sono riscontrati alcuni problemi soprattutto nella gestione dell'impianto.

Fondamentalmente in fase invernale si sono riscontrati alcuni problemi nell'utilizzo della macchina:

- La macchina è andata diverse volte in blocco per le temperature eccessivamente basse dell'acqua che gli veniva fornita al secondario e questi blocchi duravano periodi eccessivamente lunghi, non si è riuscito a capire e a risolvere questo problema;
- in questa fase la macchina ha mostrato un rendimento inferiore rispetto alle aspettative, dato poi confermato nell'analisi dei dati.

Per sopperire a questi problemi si è proceduto al cambio della pompa di calore passando ad un modello migliore ed affidabile: è stata provata in assetto invernale e ha mostrato i risultati sperati.

- 3 - FASE INVERNALE, DATI DI MARZO -

- 3.1 - Andamenti giornalieri

Come prima analisi ci si è concentrati sugli andamenti giornalieri delle grandezze più significative per verificare il funzionamento dell'intera facility e notare eventuali comportamenti non regolari ed eventualmente identificarne la causa.

Si riportano nelle pagine seguenti(figure 2 e 3), a titolo di esempio, gli andamenti ottenuti nei giorni 24/03 e 25/03 quando l'impianto è stato tenuto acceso durante l'intero giorno.

Nel primo grafico di entrambe pagine sono riportate le temperature che riguardano il solare (T1 e T2) e quelle del secondario (T5 e T6) e il valore della portata del solare.

Seguendo l'andamento della potenza elettrica assorbita dalla macchina (grandezza WATT) si riesce subito a vedere dove la macchina ha funzionato, producendo calore ceduto poi all'utenza fittizia. Come si vede in entrambi i giorni si è verificato un blocco della macchina dovuto al raggiungimento della temperatura minima all'evaporatore: la T6 scende sotto il valore limite e il periodo in cui la potenza elettrica va a zero corrisponde al tempo trascorso prima che la macchina si sia riattivato. Seguendo sempre la T6 durante le giornate si può notare anche il blocco della stessa a 20°C, ovvero quando si aziona la miscelazione.

Grazie alla presenza del serbatoio la macchina lavora con qualunque temperatura senza considerare quello che sta succedendo a monte dell'accumulo, ovvero al circuito dei pannelli solari.

Quando la differenza di temperatura fra acqua nel serbatoio e uscita dei pannelli (è misurata da altri termostati, non quelli di cui si riportano i dati) è significativa la pompa viene attivata e il circuito comincia a funzionare: questo passaggio è rappresentato dall'aumento della F_{sol} nei grafici presentati.

Se durante le ore diurne il funzionamento dell'circuito solare è abbastanza continuativo durante la notte o comunque nelle ore di minore illuminazione il funzionamento chiaramente è molto meno stabile.

Il giorno 24/03 però si nota un fenomeno interessante che caratterizza i pannelli: in assenza di luce solare i collettori si comportano in pratica come dei radiatori dalla ampissima superficie e permettono lo scambio di calore fra ambiente esterno e acqua presente all'interno.

Anche di notte i termostati sentono una differenza di temperatura sensibile e inviano acqua ai pannelli anche in assenza di irraggiamento, l'acqua presente nei tubi è più fredda dell'esterno e viene riscaldata dall'ambiente.

Da qui vengono le accensioni che si verificano durante la notte e le brevi fasi di aumento della temperatura T6. Chiaramente queste fasi sono molto brevi dato che il serbatoio si riscalda rapidamente e la T6 raggiunge rapidamente la T1.

Continuando a far riferimento alle figure 2 e 3 si vede che quando la T6 raggiunge i 20°C e poi si stabilizza intorno a quel valore l'andamento mantiene comunque una certa leggera isteresi: questo comportamento è dovuto all'utilizzo della miscelazione necessaria per il mantenimento della temperatura limite.

Quando la temperatura all'interno del serbatoio supera i 20°C e cresce molto, la portata di prelievo sarà molto piccola dato che la maggior parte della portata da mandare alla macchina arriverà proprio dal bypass del ritorno: il sistema di regolazione della valvola non riesce a gestire così piccole portate e di conseguenza oscilla in continuazione fra fasi di accensione e spegnimento che causano quell'isteresi verificata nei grafici.

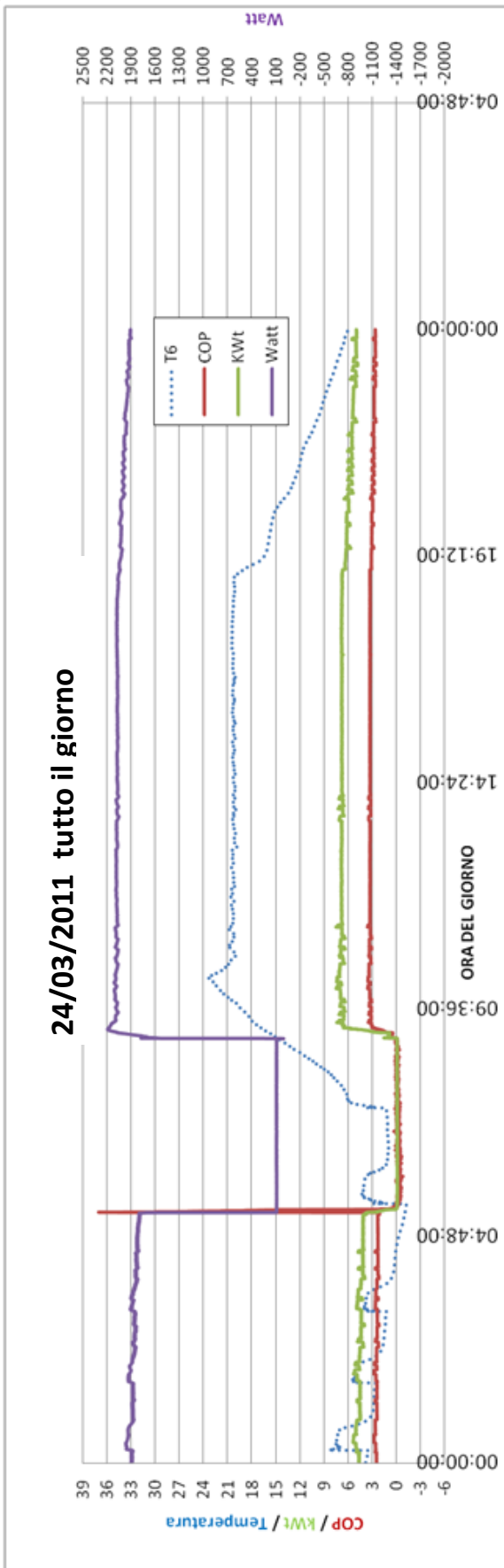
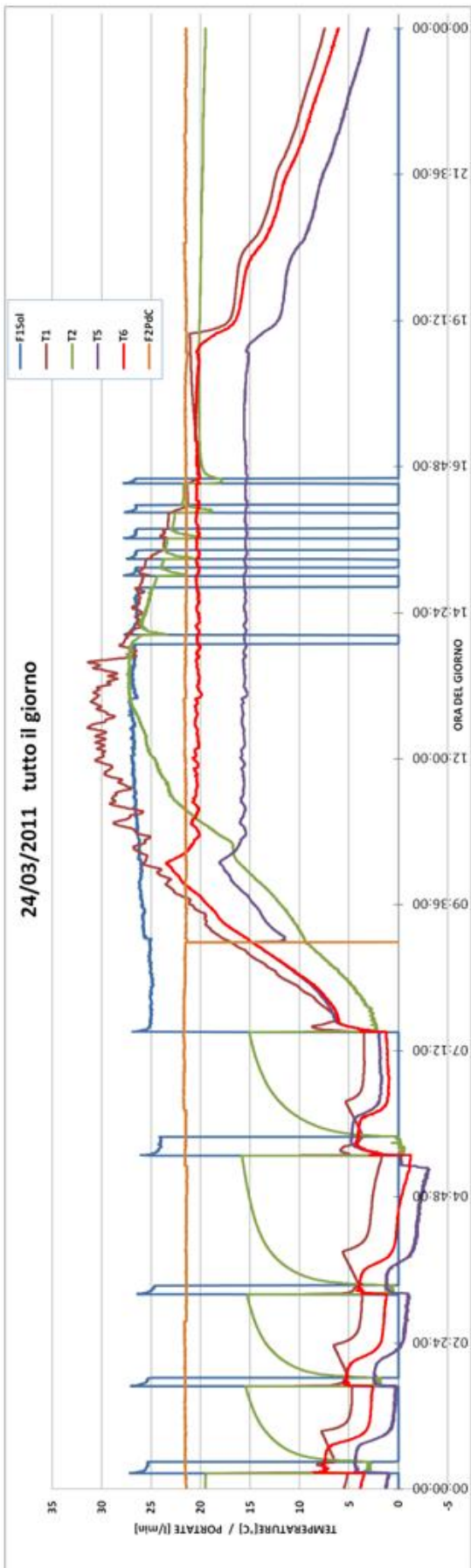


Figura 2; andamenti giornalieri per il giorno 24/03/2011

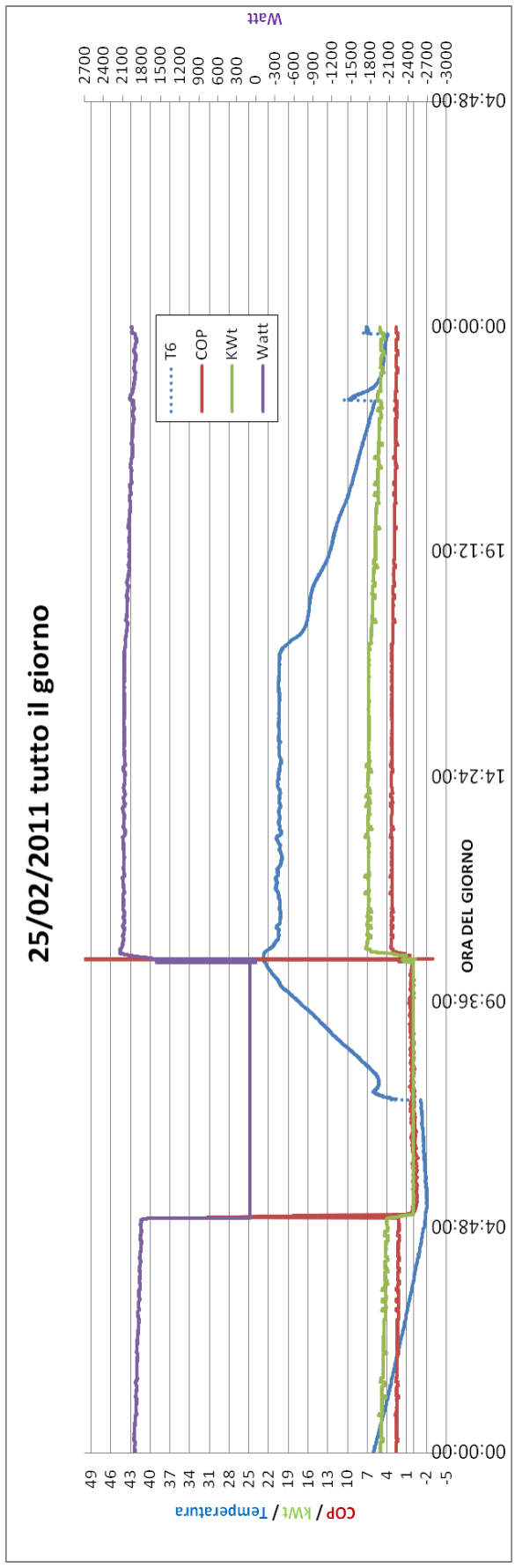
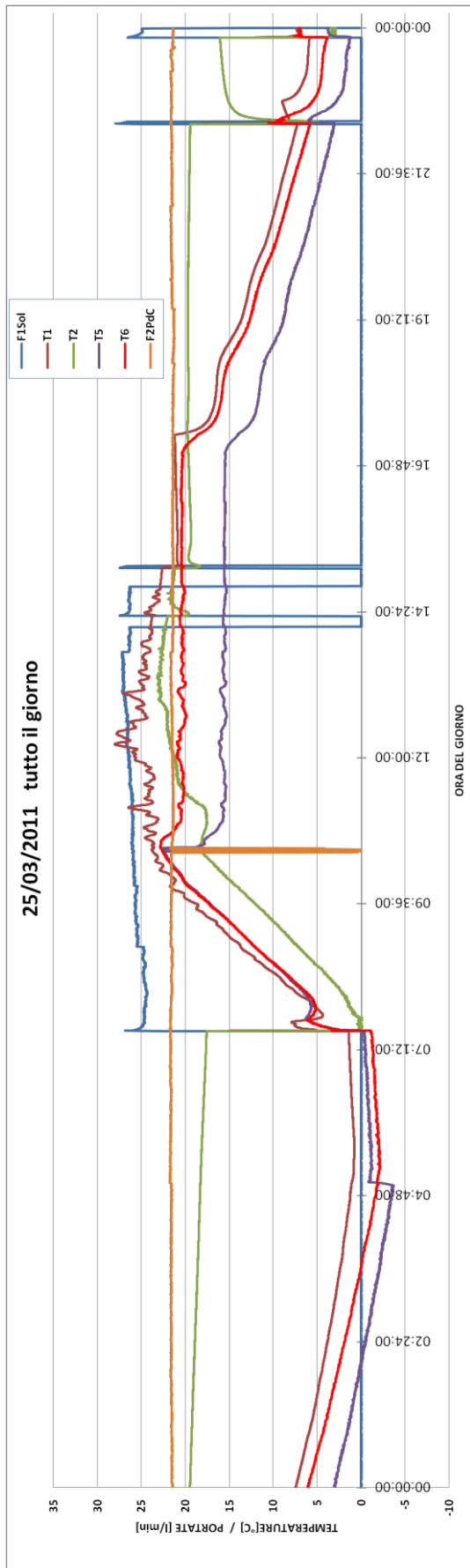


Figura 3; andamenti giornalieri per il giorno 25/03/2011

È infine interessante considerare l'andamento della temperatura T2 nel giorno 24/03, sempre in figura 2: come si vede appena si spegne la pompa del circuito che serve i pannelli la T2 tende rapidamente a salire stabilizzandosi poi a quella che è la temperatura ambiente, la causa di questo fenomeno è semplicemente un peggior isolamento della struttura tubiera.

Considerando invece gli andamenti delle grandezze di maggior interesse quando l'impianto è stato tenuto acceso solamente nelle ore di normale funzionamento giornaliero, tipicamente da circa le nove del mattino fino alle quattro o alle cinque del pomeriggio, si riscontrano risultati molto stabili e che mostrano il reale impatto dei pannelli sull'efficienza dell'intero impianto.

A tal proposito, nelle figure 4 e 5, si riporta l'andamento del COP della pompa di calore e le temperature T6 e T1, relative rispettivamente alla mandata del secondario della macchina e all'uscita dai pannelli solari.

Il COP si mantiene costantemente intorno ad un valore stazionario e la temperatura T6 si mantiene sempre al limite dei 20°C nonostante la T1 vari molto e sempre al di sopra di quest'ultimo valore: la macchina lavora bene per l'effetto dell'alta temperatura all'evaporatore e il sistema di regolazione (con la valvola V-15) agisce permettendo di mantenere il limite di 20°C.

11-mar-2011

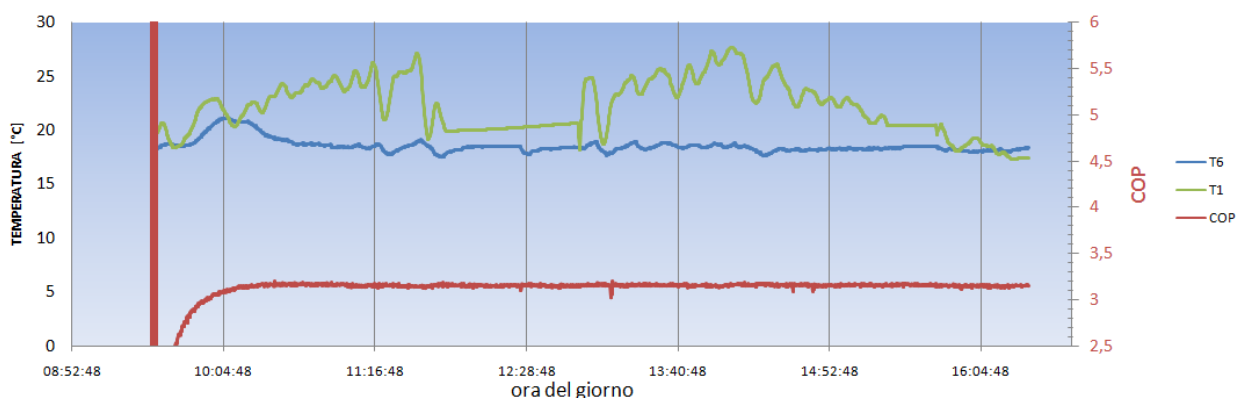


Figura 4; andamento giornaliero del 11/03

8-mar-2011

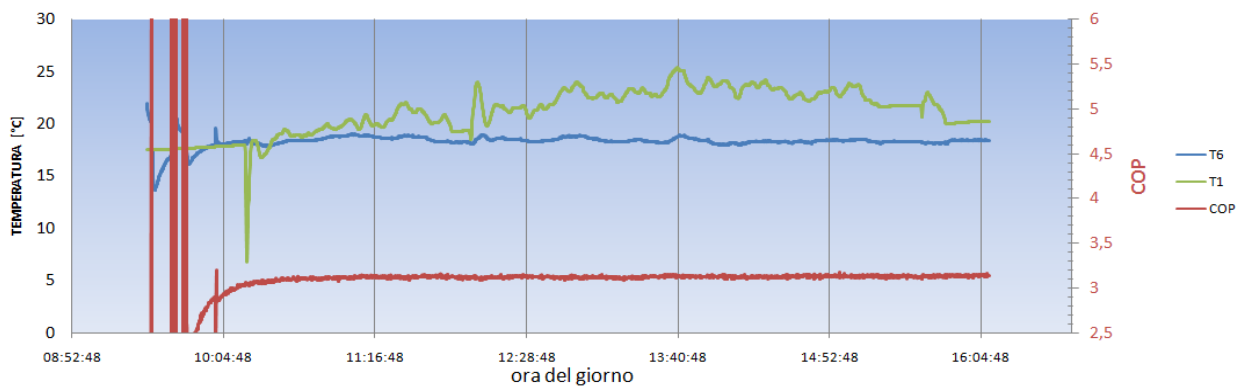


Figura 5; andamento giornaliero del 8/03

Un andamento molto particolare invece nel giorno 18/03 (figura 6): la temperatura particolarmente alta che raggiungono i pannelli e di conseguenza il serbatoio richiede una miscelazione a valle di quest'ultimo particolarmente complicata e la valvola addetta non riesce a seguire un comportamento stabile e stazionario.

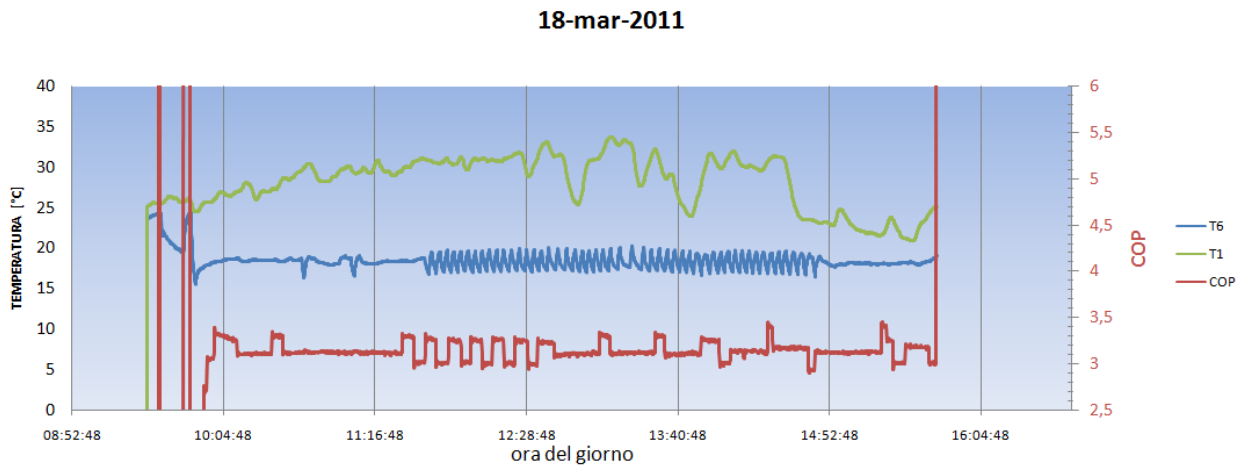


Figura 6; andamento giornaliero del 18/03

Il risultato è un andamento triangolare molto marcato per la T6 e un andamento a dente di sega in alcuni tratti per il COP.

In conclusione, se in linea generale si può dire che l'impianto si comporti molto bene e riesca servire l'utenza con continuità, si devono comunque notare dei problemi sulla regolazione del sistema serbatoio-macchina in quanto il limite superiore dei 20°C è molto stringente per l'accoppiamento con i pannelli nonostante questi ultimi siano comunque di scarsissima qualità.

È invece interessante il lavoro che svolgono i pannelli in assenza di irraggiamento (caso verificato durante le ore notturne): la loro ampia superficie permette un interessante scambio di calore con l'ambiente circostante che potrebbe essere sfruttato proprio in estate quando altrimenti i pannelli resterebbero inutilizzati.

Coprendo i pannelli si potrebbe pensare di utilizzarli come un radiatore vero e proprio e dissipare almeno in parte il calore prodotto dalla pompa di calore, calore che altrimenti dovrebbe gestire totalmente l'aeroterma.

- 3.2 - Risultati generali

Passando oltre l'analisi di singoli andamenti giornalieri delle grandezze misurate si è passati a considerare le prestazioni in generale durante tutto il periodo.

Si è cercato principalmente di mettere in risalto l'aspetto sicuramente più interessante ovvero la correlazione fra la temperatura di mandata all'evaporatore della pompa di calore e il COP che quest'ultima riesce ad ottenere.

Ottenere una T6 più alta per più tempo possibile permette di ottenere grossi vantaggi sull'efficienza del sistema e un certo risparmio energetico: anche con i pannelli di scarsa qualità utilizzati si riescono a raggiungere queste temperature più alte con una certa continuità.

Per prima cosa si sono utilizzati tutti i dati in nostro possesso, verificando per varie T6 quali fosse il COP che si aveva nello periodo di tempo.

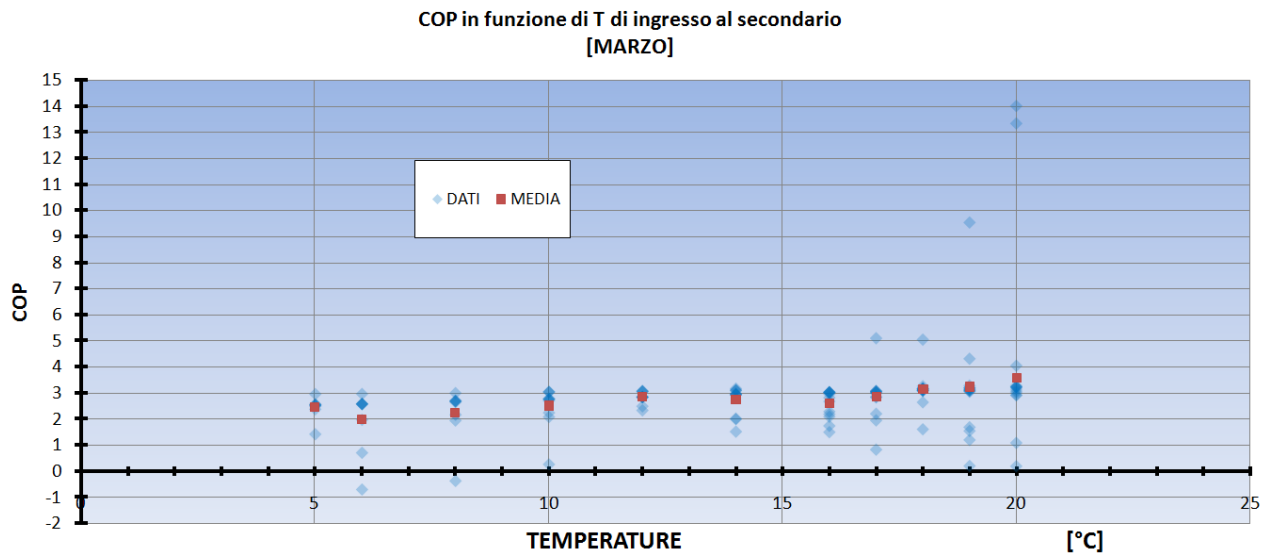


Figura 7; prestazione della pompa di calore al variare della temperatura di ingresso all'evaporatore, sono utilizzati tutti i dati.

In figura 7 si riporta il risultato ottenuto con questo sistema: in blu sono rappresentati tutti i dati ottenuti mentre in rosso sono invece rappresentate le medie per le varie temperature.

Dove si vedono dei punti con blu più intenso significa che quei risultati sono ritornati più volte rispetto a quelli più chiari.

In generale si può dire che le medie si mantengono entro limiti accettabili e vicini a dati di targa della macchina ma i tanti dati ottenuti in regime transitorio falsano troppo i risultati finali.

Si sono allora considerate solo le varie situazioni di regime stazionario riscontrate durante il periodo di monitoraggio.

Si sono ovvero considerati solo i periodi di almeno un'ora in cui la temperatura non variasse oltre un limite di $\pm 1^\circ\text{C}$ cercando in questa maniera di eliminare dall'analisi le situazioni particolarmente instabili che non danno informazioni utili per l'analisi.

Procedendo in questa maniera si è ottenuto il grafico riportato in figura 8.

In rosso sono riportati i dati ottenuti insieme ad una linea di tendenza con funzione di potenza.

In questo caso la maggior parte dei dati sono caduti nella zona a destra del grafico, per temperature più alte: è proprio questo dunque il dato più affidabile.

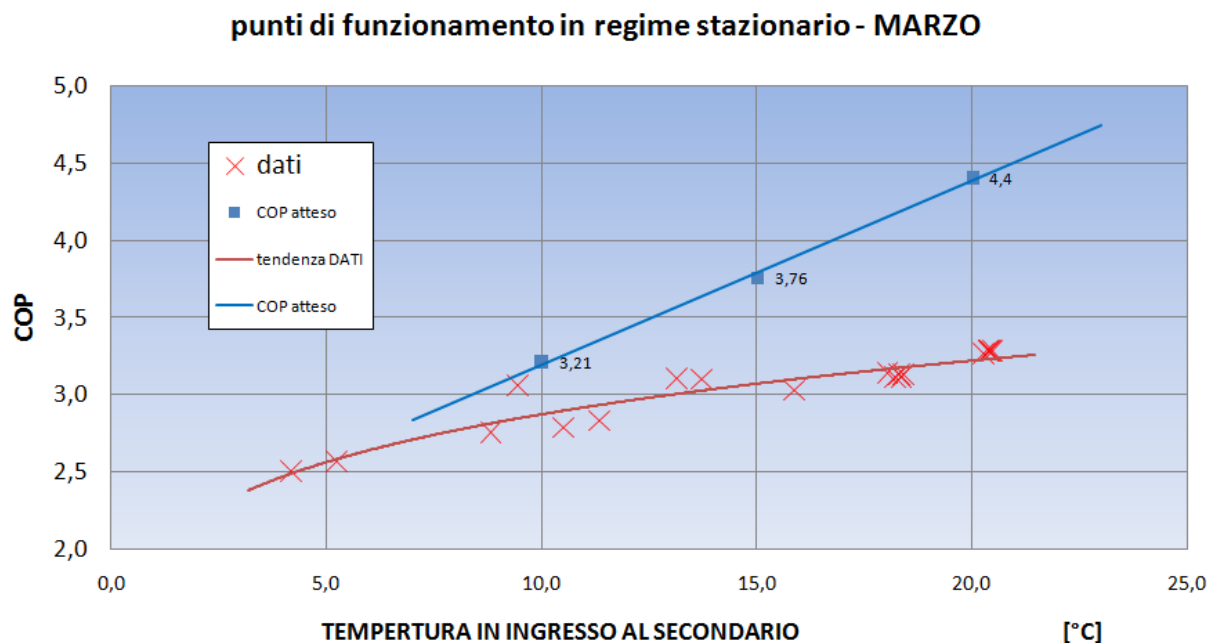


Figura 8; prestazione della pompa di calore utilizzando solo dati ottenuti in regime stazionario. Si riporta anche il COP atteso dalla casa produttrice.

Come si vede l'aumento dell'efficienza della macchina c'è ma sicuramente non è dell'entità assicurata dalla casa produttrice che ha fornito la macchina installata: passando da 5°C a circa 20° il COP passa da 2,6 ad un valore intorno a 3,3 , aumentando solamente del 27%; il confronto con il COP atteso è evidente (dati e linea blu).

In ultimo si è considerato invece come lungo i vari giorni si sia comportato l'impianto, in particolare considerando le ore di accensione tipiche degli impianti di riscaldamento.

Si sono divise le ventiquattro ore e si sono analizzate le varie prestazioni dell'impianto nei diversi momenti della giornata, considerando in questo caso tutti i dati ma facendo la media sulle singole ore.

Il risultato ottenuto è riportato in figura 9 alla pagina seguente.

Come si vede la maggior parte delle situazioni di instabilità si sono manifestate nelle ore notturne quando la macchina è stata servita con temperature molto basse ed è spesso andata in blocco, mentre nelle ore di luce l'impianto ha lavorato molto bene fornendo sempre temperature piuttosto alte e quindi favorendo COP sempre superiori a 3 sia nei vari dati che nelle medie.

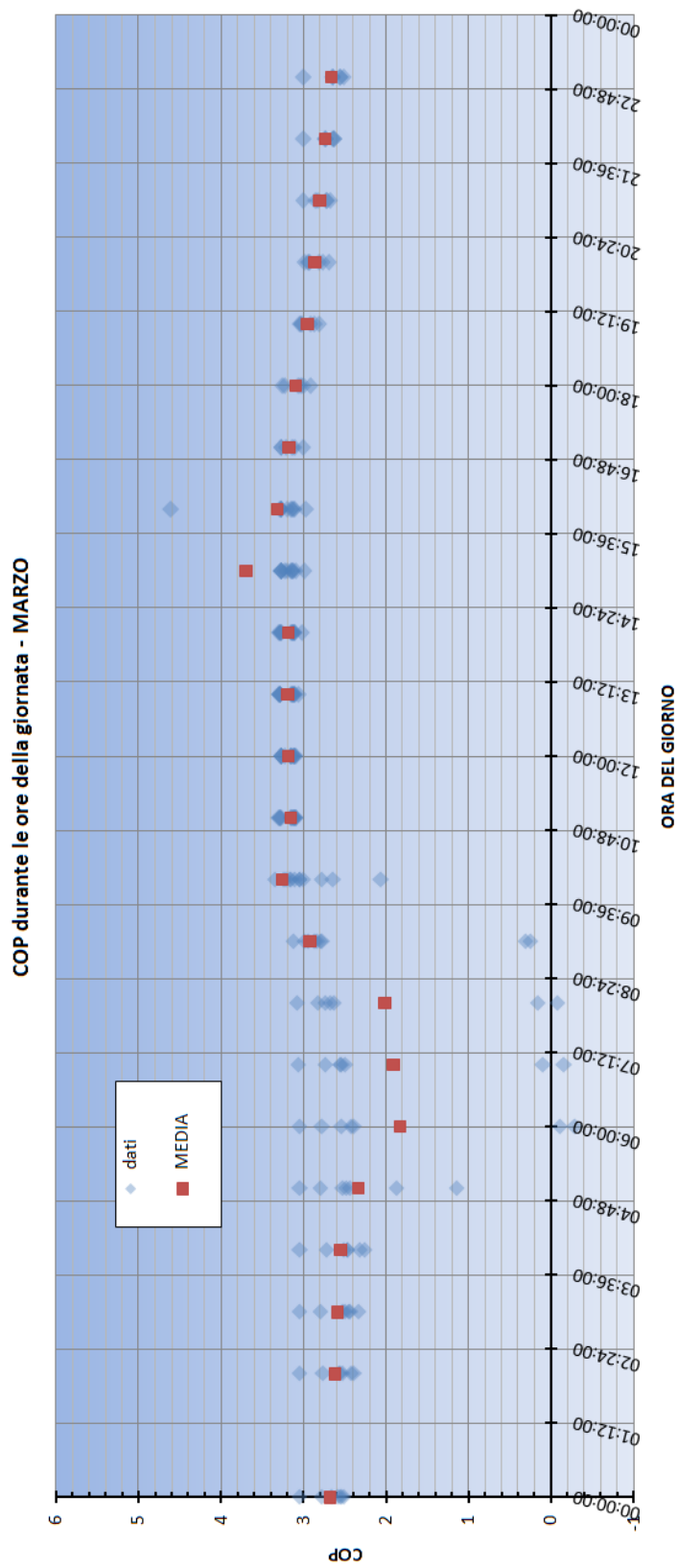


Figura 9; COP ottenuti dalla pompa di calore al variare delle ore del giorno

- 4 - I RISULTATI ESTIVI -

- 4.1 - Funzionamento con l'aeroterma

Come detto nei paragrafi precedenti la pompa di calore utilizzata non ha reso come ci si aspettava e la casa ha proceduto alla sostituzione della stessa con un modello migliore.

Si è proceduto alla variazione del circuito della facility per adattarlo alle nuove misure della macchina e si è di nuovo installata la strumentazione di acquisizione dati.

Con la nuova macchina si è proceduto alla verifica delle prestazioni invernali ma purtroppo ormai le temperature esterne erano molto alte come anche gli irraggiamenti: la temperatura di ingresso del secondario è stata quasi sempre quella massima di 20 °C e si è potuto solo constatare l'effettivo funzionamento ottimale del sistema e il raggiungimento degli ottimi COP che ci si aspettava.

A questo punto del lavoro si è passati a verificare il funzionamento della macchina nel periodo estivo, in cui i pannelli non dovrebbero essere utilizzati e dove, almeno inizialmente, si è controllato il corretto funzionamento dell'aeroterma per lo smaltimento del calore.

Anche per similitudine con quanto fatto in fase invernale si è verificato con i dati ottenuti la prestazione della macchina e si è confrontato il risultato con quanto prometteva la casa produttrice.

Si è messo dunque in relazione il EER della macchina con la temperatura in uscita dal secondario (ovvero, in raffreddamento, in uscita dall'condensatore).

In figura 10 è riportato il grafico in cui sono riassunti i risultati ottenuti.

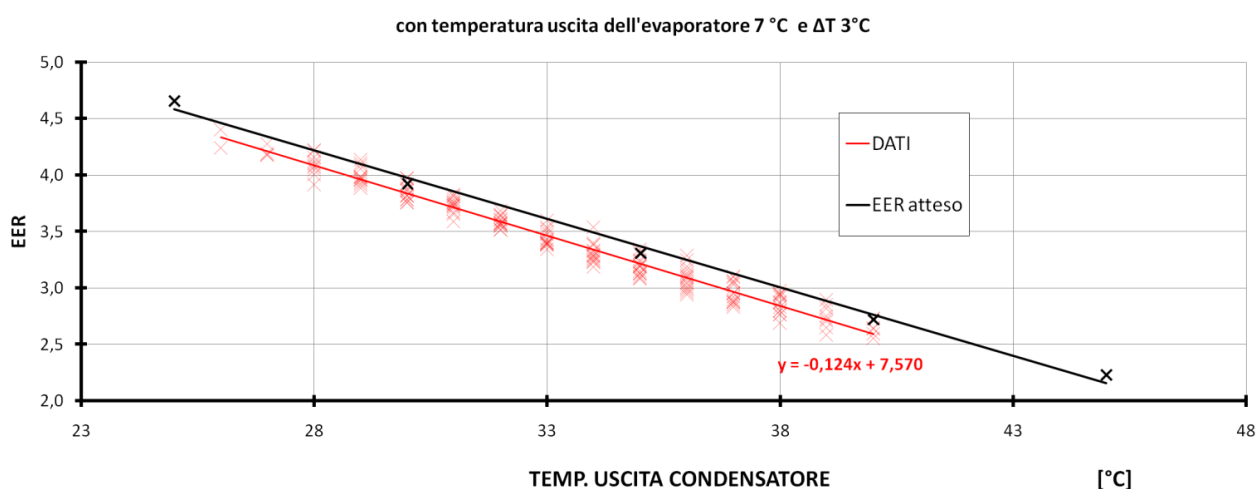


Figura 10; prestazione della macchina nuova installata in assetto estivo

Per la valutazione della curva dell'EER atteso in figura 10 è stato tenuto conto sia del differente intervallo di temperature all'evaporatore rispetto a quello nominale ma non della presenza del glicole all'interno del circuito: il glicole utilizzato nel circuito alla Casaccia è leggermente differente da quello per cui la casa produttrice fornisce la curve di correzione dell'efficienza.

Le curve sono estremamente vicine e il loro leggero scostamento è probabilmente dovuto proprio al fatto che non si è considerata la presenza del glicole.

È poi interessante e significativo anche l'andamento dell'EER in funzione della temperatura esterna: l'andamento è lo stesso di quello visto prima chiaramente, solamente scalato in maniera differente, ma rende subito l'idea della prestazione della macchina in funzione di quelle che sono le condizioni esterne ambientali.

In fig... viene riportato il grafico che rappresenta questa correlazione, come si vede già dai 27 °C l'efficienza della macchina scende sotto a 3.

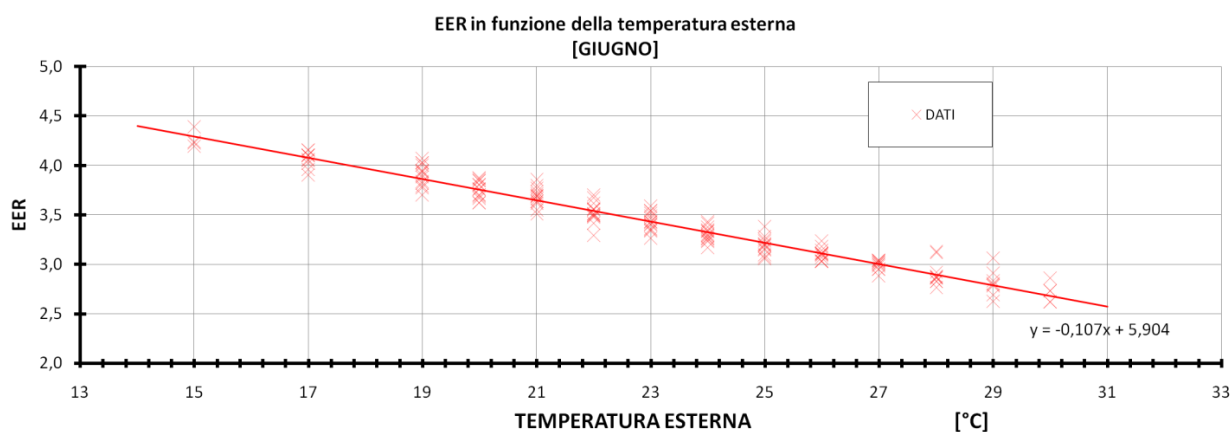


Figura 11; prestazione della macchina, questa volta tenendo conto della temperatura esterna.

In realtà, successivamente a queste analisi si è cercato di verificare la fattibilità e le prestazioni di una soluzione che preveda di utilizzare i pannelli (chiaramente coperti) come radiatori per smaltire calore: come detto precedentemente, i pannelli utilizzati hanno una elevata superficie di scambio e una pessima efficienza che li porta a perdere molto calore con l'ambiente circostante, se questa loro caratteristica è negativa nel loro funzionamento normale può invece rivelarsi utile in questa particolare applicazione.

Come visto nel paragrafo sul modello dell'impianto, i pannelli di gomma utilizzati possono, se coperti e quindi non irraggiati, disperdere potenze termiche considerevoli (dell'ordine dei 7-8 kW), Si è ritenuto questa idea molto importante nell'economia della gestione dell'impianto: se gli ordini delle potenze che i pannelli possono scambiare verranno mantenuti anche in fase sperimentale l'aerotermo risulterebbe quasi del tutto inutilizzato.

Si ridurrebbero quindi significativamente i costi di esercizio dell'impianto e dunque i tempi di ritorno dell'investimento.

- 4.2 - Utilizzo dei pannelli come dissipatori



Figura 12; installazione dei teli ombreggianti sui pannelli.



Figura 13; particolare che mostra i distanziatori inseriti per facilitare il passaggio dell'aria.

Come già detto, una volta osservato il corretto funzionamento dell'impianto in fase estiva con il prescritto uso dell'aerotermo per lo smaltimento del calore prodotto dalla pompa di calore, si è proceduto alla verifica del utilizzo dei pannelli come dissipatori di calore ombreggiandoli con dei teli che gli impedissero di essere raggiunti dal sole diretto.

Nella figura 12 di pagina precedente si riportano le foto delle installazione effettuata e in figura 13 viene evidenziato il dettaglio dei semplici distanziatori posti per far circolare l'aria vicino ai pannelli e aumentare lo scambio di calore.

Rispetto all'impianto progettato si è dovuto inserire un bypass del serbatoio che impedisse al ritorno dei pannelli di raggiungerlo e di andare direttamente alla pompa di calore e si è dovuto cambiare la logica di alcune valvole, come quella di regolazione invernale e quella dell'aerotermo, ma nel complesso l'intervento è molto snello e nella pratica realizzativa non comporterebbe eccessivi complicanze nell'esecuzione dei lavori.

Nelle figure 14, 15, 16 si riportano gli andamenti delle temperature più significative dell'impianto utilizzato con questa configurazione.

Come si vede, T3 e T4, che rappresentano la mandata e il ritorno dell'utenza, rimangono sempre intorno ai 7°C e ai 10° rispettivamente, mentre T5 e T6 , che sono la mandata e il ritorno dai pannelli (si ricorda che in questo caso i pannelli effettuano un raffreddamento) si muovono di concerto con la temperatura esterna.

Sono molto confortanti i risultati ottenuti: i pannelli riescono ad esercire con tranquillità al loro compito di dissipatori e con rendimenti interessanti dato che la temperatura di ritorno è sempre intorno ai 3,5-5 °C a seconda delle condizioni più o meno favorevoli di scambio termico.

La macchina non risente per nulla del cambio del sistema di dissipazione del calore se non con una diminuzione dell'efficienza dovuta al leggero aumento delle temperature di ritorno al secondario.

In generale si può dunque dire che la soluzione proposta tecnicamente è facilmente realizzabile, non complica eccessivamente l'impianto e richiede solo un po' di attenzione nell'impostazione della logica di controllo delle valvole e della regolazione dell'impianto.

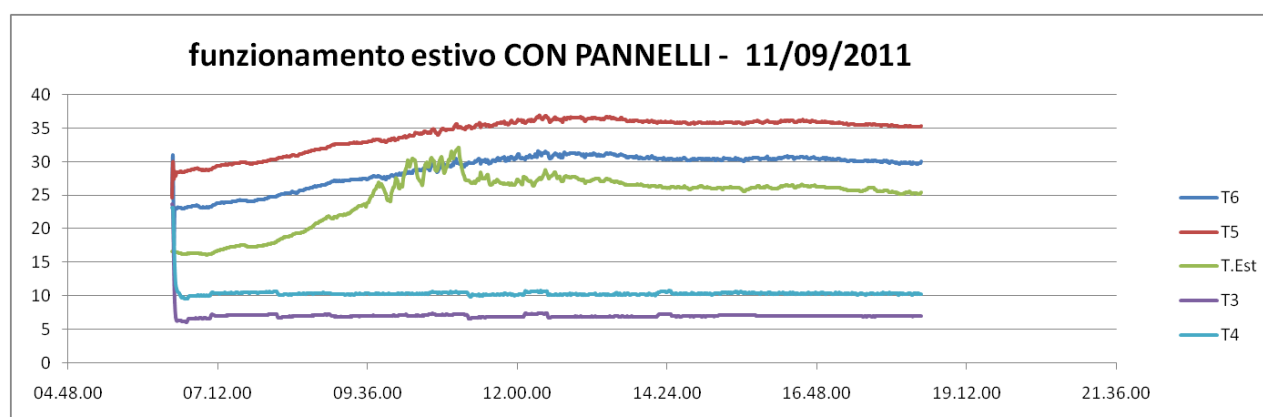


Figura 14; andamento delle temperature di impianto.

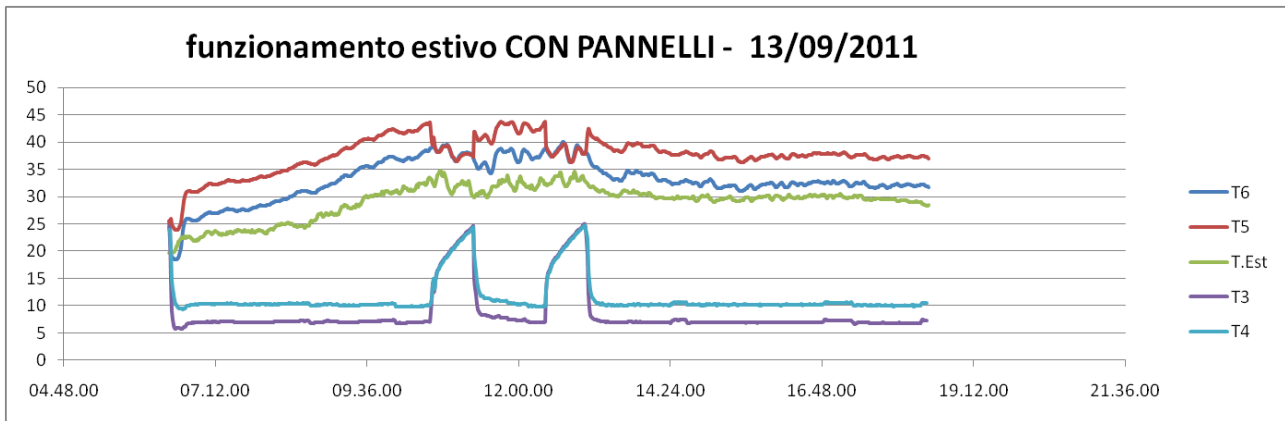


Figura 15; andamento delle temperature di impianto.

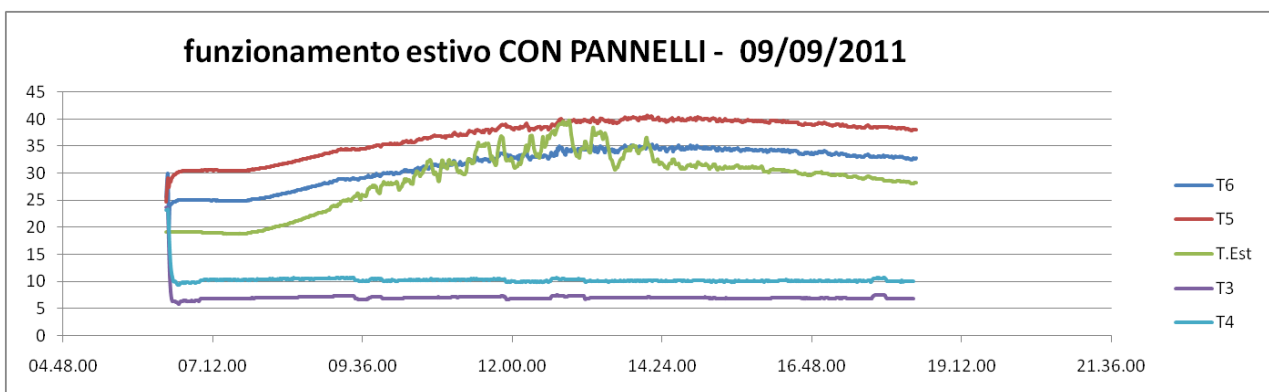


Figura 16; andamento delle temperature di impianto.

- 5 - LA SIMULAZIONE CON TRNSYS-

Accanto all'analisi dei dati dell'impianto si è verificato il funzionamento e la fattibilità del sistema attraverso la simulazione al computer della facility: si è sviluppato un modello matematico che rappresenta l'impianto in modalità invernale sia estiva attraverso il software di calcolo TRNSYS.

- 5.1 - Fase invernale –

Si è tenuto conto nella simulazione condotta sia degli orari di apertura tipici di questi impianti che della suddivisione annuale per la stagione invernale, ipotizzando, come è poi nella realtà, che l'acqua al condensatore ritorni sempre a 40°C.

La simulazione è stata condotta implementando il modello della macchina originaria AERMEC e anche in questa sede si è verificato che la macchina avrebbe dovuto dare ben altri risultati rispetto a quelli ottenuti in realtà che sono, questi ultimi, diversi anche da quello che dichiara la casa in termini di prestazioni.

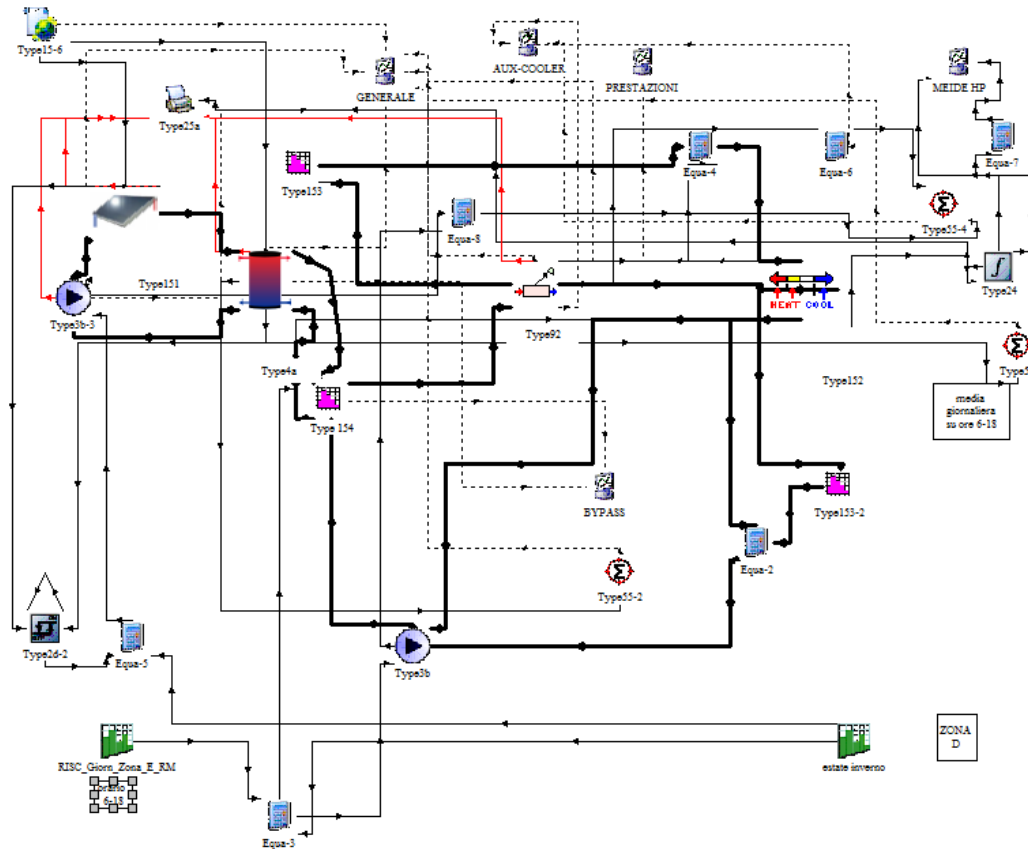


Figura 17; schema della simulazione impostata in TRNSYS.

In figura 17 viene riportato lo schema utilizzato nella simulazione, per il corretto funzionamento sono state implementate varie *type* che rappresentassero in maniera fotografica gli elementi reali costituenti l'impianto: i pannelli di gomma, la pompa di calore e il sistema di by-pass. In ultimo è stata anche considerata la presenza del glicole nel fluido di lavoro.

Come output della simulazione sono particolarmente significativi i valori medi annuali che descrivono le prestazioni dell'impianto.

In figura 18 viene riportato l'andamento del COP medio della macchina durante un anno e anche gli integrali di potenza termica prodotta e potenza elettrica richiesta.

Il valore medio del COP si attesta stabilmente sopra il valore di 3,60 , evidenziando dunque che la macchina è stata servita per larga parte del tempo di lavoro con temperature medie molto vicine al valore di soglia di 20°C.

La macchina assorbendo lavoro elettrico per 4000 kWh riesce a produrre calore utile per il riscaldamento per il valore di circa 14000 kWh.

Le potenze in gioco sono invece riportate in figura 19.

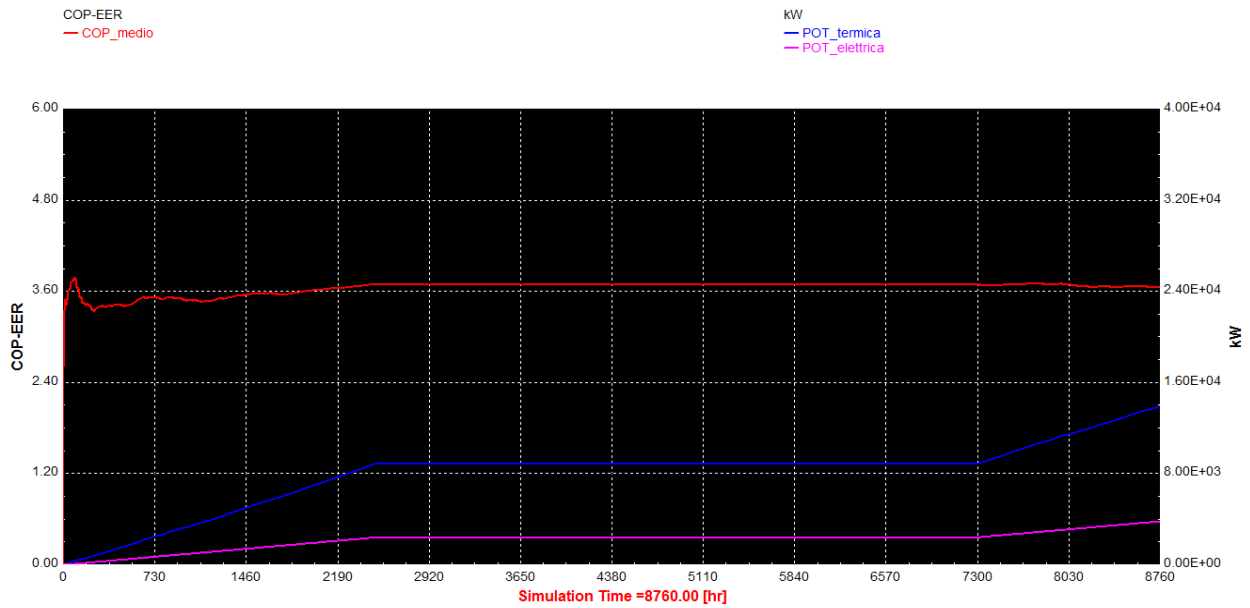


Figura 18; andamento del COP medio della macchina e degli integrali di potenza termica prodotta ed elettrica assorbita.

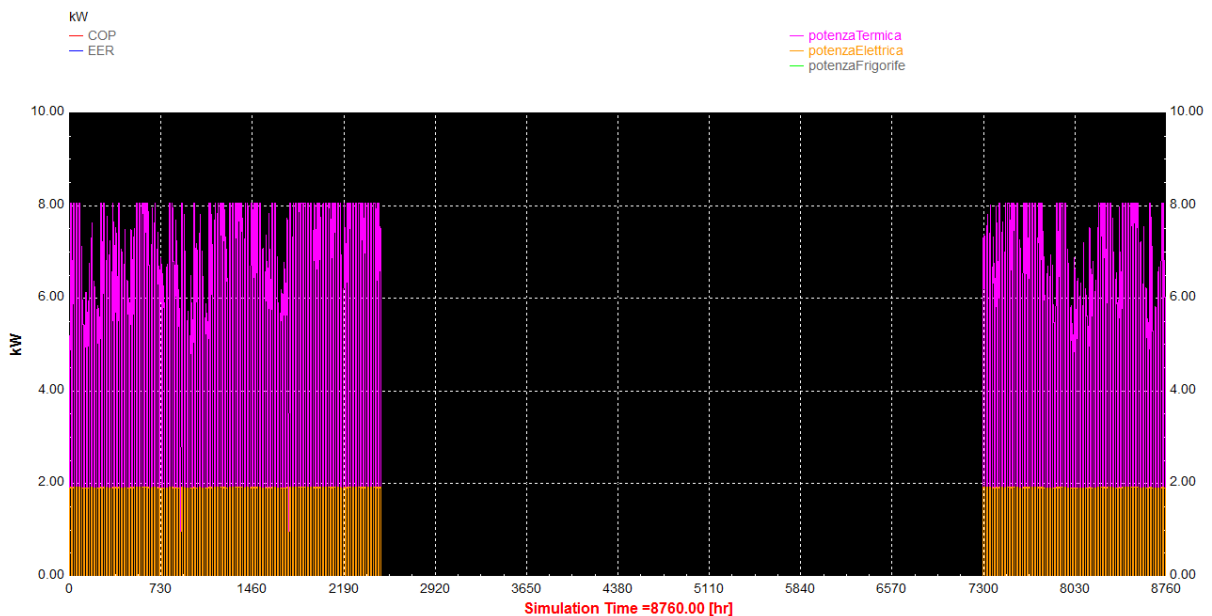


Figura 19; potenze termica ed elettrica in gioco nell'impianto simulato.

Come si vede, scalati sull'asse di sinistra, sono riportati la potenza termica prodotta e quella elettrica richiesta durante l'anno: la pompa di calore produce calore utile sempre fra 6 e 8 kW, valori adatti ad utenze medio - piccole, richiedendo circa 1,8 kW di elettricità.

Si è chiaramente anche tenuto del bypass che deve essere effettuato a valle del serbatoio di accumulo e della temperatura limite di 20 °C di mandata al condensatore.

In figura 20 è rappresentato il risultato della simulazione di una settimana invernale: sono riportate, scalate sull'asse di sinistra, le temperature di ingresso (arancione) e uscita (blu) del condensatore della pompa di calore.

Come si nota quando la temperatura di ingresso raggiunge i 20 °C entra in azione il bypass e si rimane fissi su quel valore soglia di funzionamento, le uniche volte che viene superato è quando siamo fuori dall'orario di accensione dell'impianto.

Si nota come la simulazione riesca anche troppo bene a impostare il bypass e non è presente quell'andamento a scalino che invece si è riscontrato nella facility quando la portata prelevata dal serbatoio era bassissima e il sistema di regolazione andava in difficoltà.

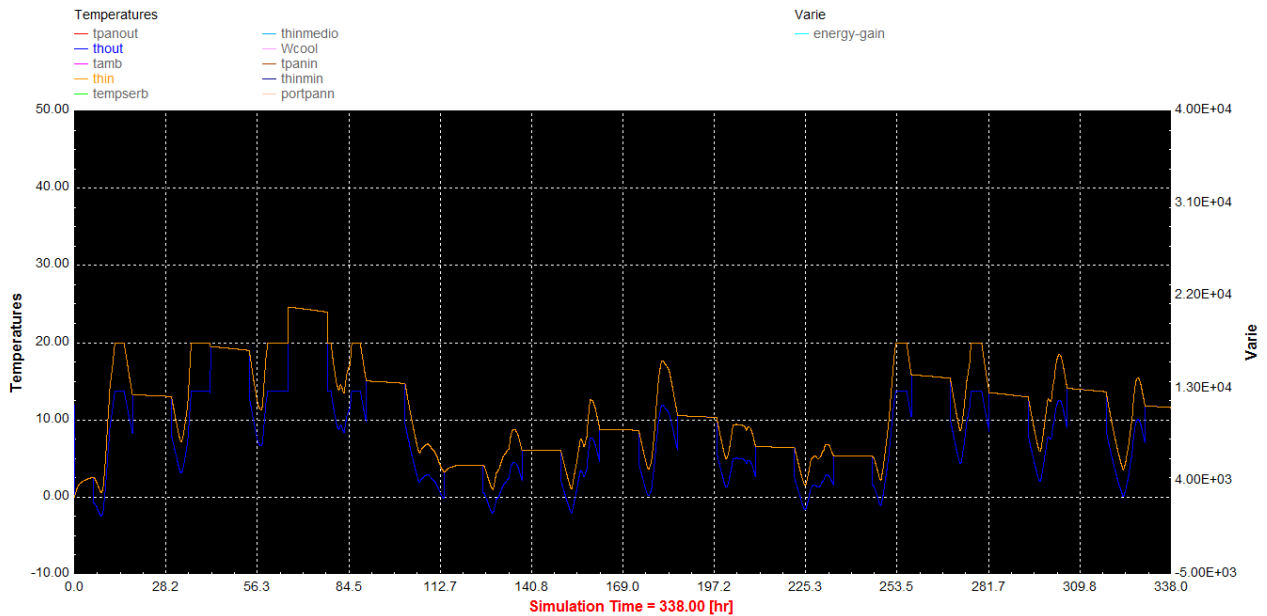


Figura 20; temperature di ingresso e uscita al condensatore della macchina in una settimana di assetto invernale.

- 5.2 - Fase estiva -

Con TRNSYS si è proceduto allo sviluppo del modello del sistema funzionante in fase estiva ovvero quando è richiesto il raffrescamento, anche in questo caso si è utilizzato la type della macchina originaria e non quella nuova.

Si è ritenuto di particolare interesse verificare e confrontare le due diverse soluzioni che si sono ipotizzate per la dissipazione del calore prodotto al condensatore: o la classica possibilità dell'aerotermo o la possibilità più particolare di utilizzare i pannelli solari.

Si sono sviluppati in parallelo due modelli e poi si sono confrontati i risultati utilizzando le stesse condizioni al contorno: meteorologia e periodi di accensione.

Di seguito si riportano le condizioni al contorno utilizzate nella simulazione.

- Orario di accensione: tutti i giorni dalle 6 alle 18
- Periodo di accensione : dal 15 marzo al 1 novembre
- Temperatura di mandata all'evaporatore di 10 °C
- Differenza di temperatura all'evaporatore di 5 °C
- Località in cui è posizionato l'impianto: Roma - Fiumicino

in figura 21 è riportato l'andamento della temperatura in ingresso al condensatore che si riesce ad ottenere lungo un anno con l'aerotermo mentre, di confronto, in figura 22, è riportato il risultato

utilizzando i pannelli: le temperatura (in rosso) è scalata sull'asse di sinistra, mentre a destra è scalato l'EER.

È da notare che la pompa di calore è accesa solo nel periodo in cui è presente anche l'EER: prima e dopo le temperature sono fittizie e non devono essere considerate.

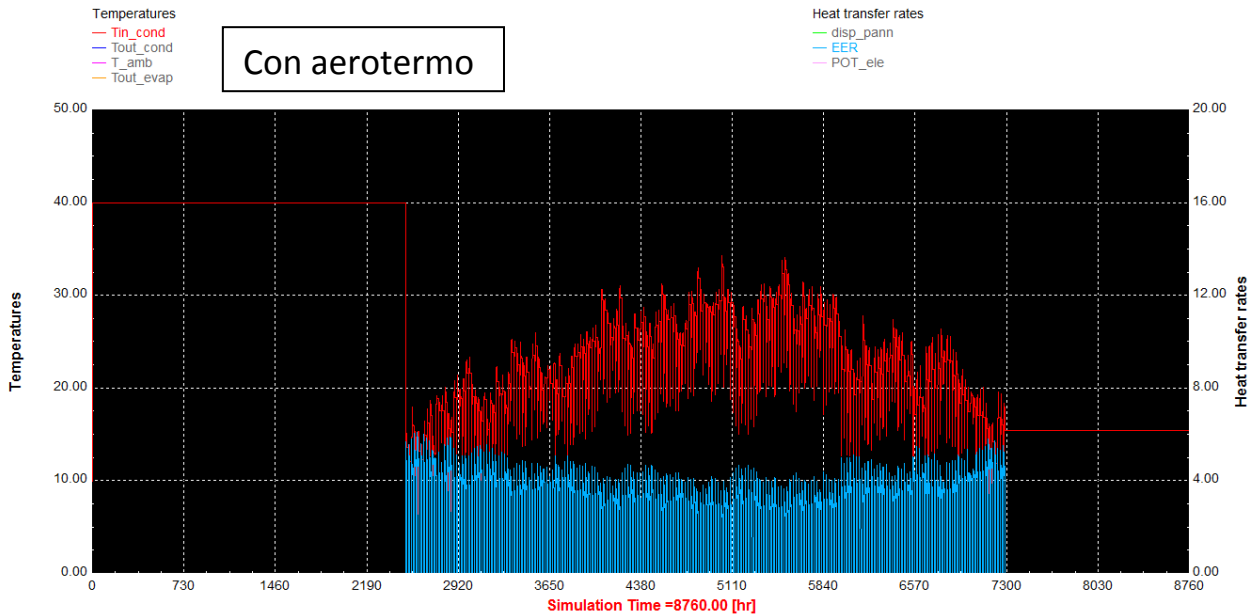


Figura 21; funzionamento con aerotermo dell'impianto in assetto estivo: EER e temperatura in ingresso al condensatore.

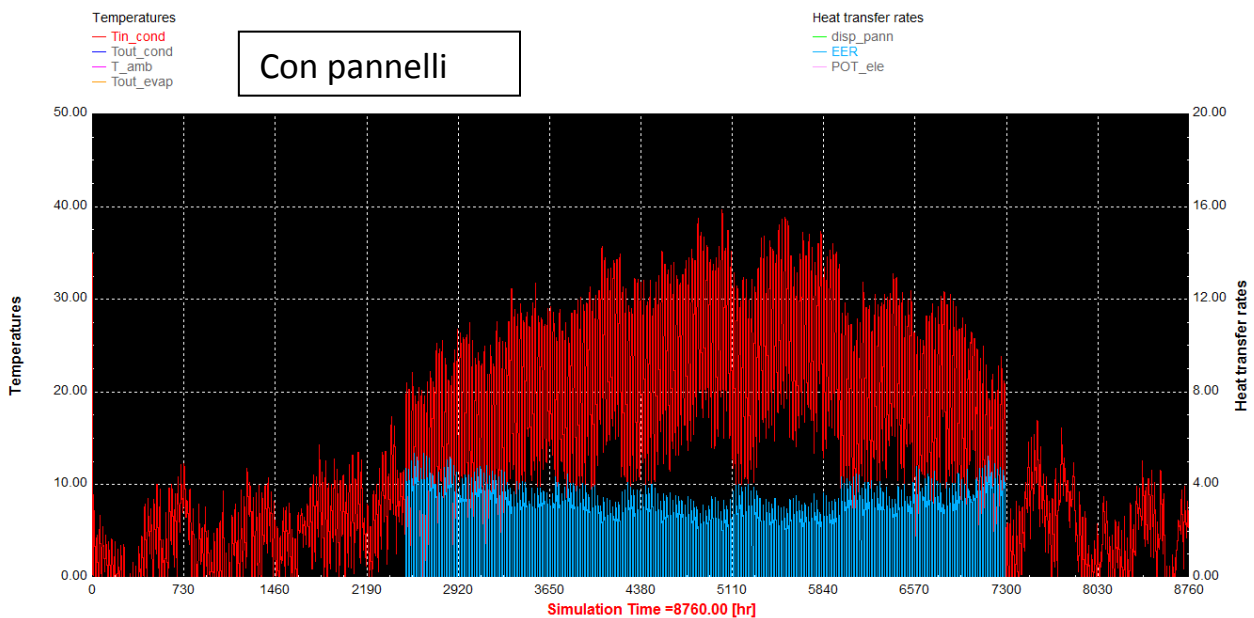


Figura 22; funzionamento estivo con i pannelli in assetto dissipativo.

Come si nota, le temperature sono mediamente più alte nel caso dei pannelli dato che essi scambiano peggio dell'aerotermo e quindi hanno bisogno di una differenza di temperatura maggiore con la temperatura ambiente a cui cedono calore.

Questo fatto si ripercuote chiaramente anche nelle prestazioni e questo può essere notato integrando sia la potenza elettrica che quella di raffreddamento prodotte dalla macchina nelle due diverse situazioni impiantistiche: in questa maniera si riesce a verificare l'EER medio che si ottiene. Operando in questa maniera si sono ottenuti i seguenti risultati:

FASE ESTIVA, MODALITA' DI DISSIPAZIONE DEL CALORE DEL SECONDARIO					
con aerotermo			Con pannelli		
Lavoro elettrico	3375 kWh	$EER_{\text{medio}} = 3,77$	Lavoro elettrico	3800 kWh	$EER_{\text{medio}} = 3,18$
raffrescamento	12731 kWh		raffrescamento	12097 kWh	

Come si vede la diversa modalità di scambi di calore fa sì che con i pannelli, chiaramente non pensati per lo scopo, dissipino in maniera peggiore il calore che si produce nel condensatore e facciano lavorare con minore efficienza la macchina.

Al di là del valore delle prestazioni in senso assoluto, si vede come la differenza sia considerevole fra una soluzione e l'altra. Per decidere quale sia la soluzione migliore resta solo lo strumento dell'analisi economica e della scelta dell'ottimo in una situazione che presenta diversi aspetti che devono essere tenuti da conto contemporaneamente: bisogna vedere se conviene far lavorare peggio la pompa di calore risparmiando però l'installazione dell'aerotermo e l'energia elettrica che assorbe quest'ultimo (~ 500 W).

Per concludere il lavoro si è deciso di sviluppare su TRNSYS un modello completo dell'impianto ipotizzando di utilizzare i pannelli come dissipatori d'estate.

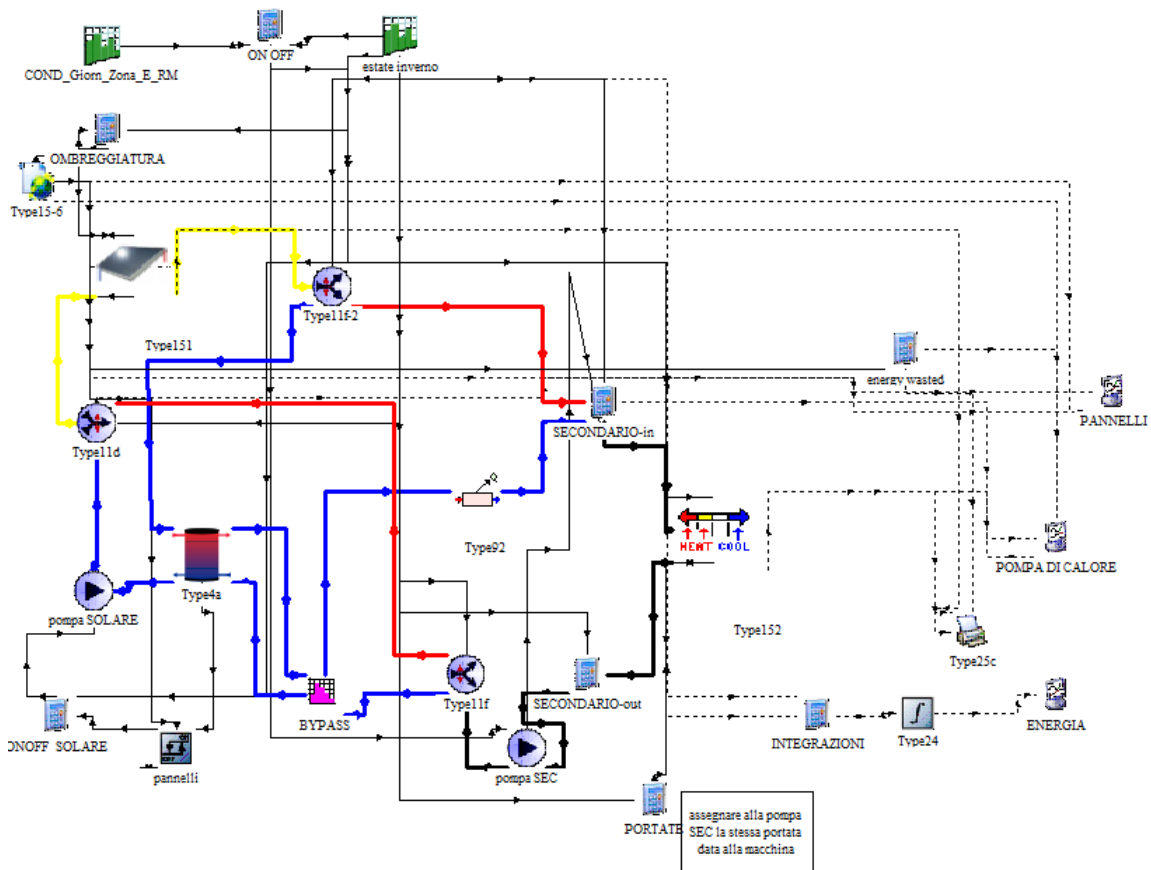


Figura 23; schema del modello completo che prevede l'utilizzo dei pannelli sia in inverno che in estate.

In questo caso si è ritenuto più utile ipotizzare che il serbatoio venga escluso durante la fase estiva e quindi bypassato attraverso un sistema di valvole a tre vie, a differenza di quello che invece si è fatto nella facility sperimentale, dove, come detto nei paragrafi precedenti, l'acqua del secondario della pompa di calore passa per il serbatoio anche d'estate.

Nel modello sono state inserite le condizioni di funzionamento ideali impostate anche nella facility e quindi d'estate la macchina produce riceve acqua all'evaporatore a 10 °C e la deve raffreddare, d'inverno riceve acqua al condensatore a 40 °C e la deve riscaldare.

A seconda della stagione, l'acqua del secondario della pompa di calore (collegato in inverno all'evaporatore e d'inverno all'condensatore) viene mandata o ai pannelli ombreggiati per dissipare calore o al serbatoio che accumula il calore raccolto dai pannelli.

L'accensione della macchina è stata fissata dalle 6 alle 18 tutti i giorni dell'anno e il periodo del riscaldamento segue le norme a riguardo e va dal 1 novembre al 15 aprile, per il resto dell'anno viene attivato il raffrescamento.

Sotto queste ipotesi è stata condotta una simulazione annuale per verificare prima di tutto la bontà del sistema e anche per vedere quali potessero essere le prestazioni di questa tipologia particolare di impianto.

Si sono tratti alcuni risultati interessanti: in figura 24 si riporta il comportamento dei pannelli in assetto dissipativo in particolare considerando l'andamento delle temperature durante la cessione del calore.

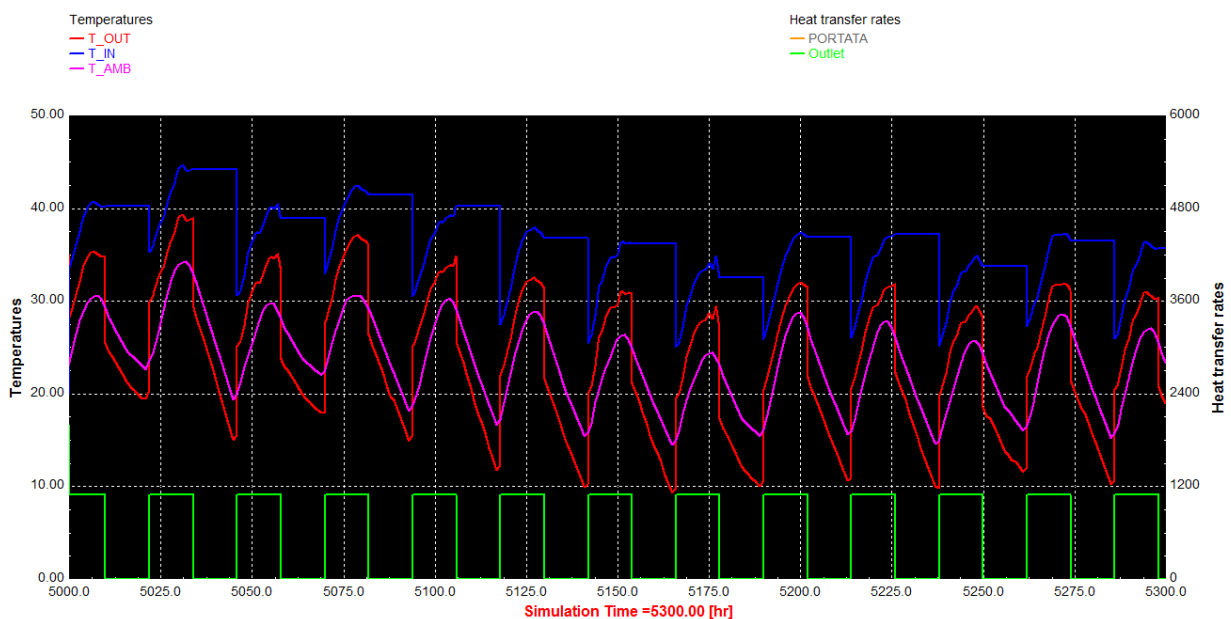


Figura 24; funzionamento dell'impianto in fase estiva con le temperature ai pannelli, la temperatura esterna e i periodi di accensione dell'impianto.

È riportato l'andamento per trecento ore durante il mese di agosto a Roma.

Sull'asse di sinistra sono scalate le temperatura di ingresso ai pannelli (in blu), di uscita dei pannelli (in rosso) e la temperatura ambiente (in violetto) mentre sull'asse destro è scalata la portata della pompa che ci dice quando sono utilizzati o meno i pannelli.

Come si vede, per effettuare lo scambio termico, la temperatura di uscita dai pannelli si porta a circa 4-5 °C di più rispetto alla temperatura ambiente e quindi, di conseguenza, le temperature di lavoro della macchina pompa di calore saranno più alte rispetto a quelle che si conseguono con l'utilizzo di un normale sistema di raffreddamento.

Nella tabella seguente sono infine riportati i risultati generali ottenuti dall'impianto sotto le ipotesi semplificative precedentemente dette.

MODELLO COMPLETO CON PANNELLI					
Inverno			estate		
Lavoro elettrico	3832 kWh	COP _{medio} = 3,90	Lavoro elettrico	3794 kWh	EER _{medio} = 3,23
riscaldamento	14974 kWh		raffrescamento	12254 kWh	

- 6 - CONCLUSIONI -

Le pompe di calore elettriche possono convenientemente essere accoppiate ad un circuito servito da pannelli solari a bassa temperatura, come alternativa alla sorgente aria esterna o alle sonde geotermiche.

Le prestazioni che si ottengono in inverno sono le più elevate ottenibili, sino ai limiti imposti dalle macchine stesse.

D'estate l'uso di un aerotermo per smaltire il calore è fattibile, ma comporta circa il 25 % di consumo elettrico aggiuntivo.

Tale consumo si può evitare con l'uso degli stessi pannelli solari come dissipatori di calore, opportunamente schermati con delle economiche reti ombreggianti.

E' stato infine messo a punto un modello di simulazione dinamica col codice TRNSYS che permette di fare un dimensionamento molto realistico dell'impianto elio assistito, per qualunque luogo geografico.