



Ricerca di Sistema elettrico

## Gli impianti di solar cooling a servizio di serre agricole: prove sperimentali

*Giuseppe Corallo, Andrea Simonetti*

## GLI IMPIANTI DI SOLAR COOLING A SERVIZIO DI SERRE AGRICOLE: PROVE SPERIMENTALI

Giuseppe Corallo, Andrea Simonetti (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA

Progetto: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

Obiettivo A: Sperimentazione di componenti e sistemi

Responsabile del Progetto: Ing. Nicolandrea Calabrese, ENEA

Si ringrazia il dott. Eugenio Benvenuto e il dott. Luca Nardi dell'unità ENEA UTBIORAD-FARM, per il costante aiuto e supporto durante le fasi di messa a punto dell'impianto di solar cooling e della successiva sperimentazione presso la serra da loro gestita.

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 DESCRIZIONE DELLA SERRA A CONTENIMENTO (EDIFICIO F96) .....	5
2.2 DATI REALIZZATIVI DELL'IMPIANTO.....	6
2.3 SISTEMA ACQUISIZIONE DATI.....	7
2.4 DATI DI MONITORAGGIO .....	8
2.4.1 <i>Set point dei regolatori di temperatura</i> .....	10
2.5 ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI .....	11
2.5.1 <i>Funzionamento Macroscopico</i> .....	12
3 CONCLUSIONI.....	16

## Sommario

Il presente lavoro mostra i risultati sperimentali ottenuti durante la stagione estiva del 2013 su un impianto di solar cooling da 17 kW freddi di potenza nominale, al servizio di una serra sperimentale a contenimento del centro Casaccia dell' ENEA, realizzato nel 2012 nell' ambito del Piano Annuale di Realizzazione precedente dell' accordo di programma ENEA –MSE.

L'impianto, nel periodo antecedente la messa in marcia è stato messo a punto e modificato in alcune parti, in modo da ottenere il soddisfacimento delle specifiche funzionali della macchina ad assorbimento alimentata ad acqua calda installata durante la precedente fase di costruzione.

E' stato inoltre realizzato il quadro elettrico di alimentazione e controllo che permette di tenere in sicurezza il funzionamento della parte solare, tenendola svincolata dall'esercizio o meno della parte di generazione del freddo.

Particolare attenzione è stata data alla scelta dei set-point sulle temperature di funzionamento delle varie apparecchiature che compongono lo schema, in modo tale da massimizzare il contributo di fonte rinnovabile al condizionamento della serra a contenimento prescelta per l' installazione.

Infatti le correnti di acqua refrigerata prodotte dall' impianto sono poste in parallelo rispetto al circuito di condizionamento già in servizio presso la serra, del tipo basato su un chiller elettrico a compressione da 100 kW freddi, raffreddato ad aria.

Il sistema di acquisizione dati utilizzato per monitorare ed acquisire su PC le variabili di funzionamento più interessanti è basato su speciali sensori di temperatura a trasmissione WiFi e su misuratori di portata ad induzione magnetica sulle varie correnti di acqua coinvolte negli scambi termici.

Il sistema è in funzione in continuo dal luglio 2013 ed è stata resa disponibile l'osservazione su un sito internet dei grafici degli ultimi 20 minuti circa delle temperature dei punti chiave dell' impianto.

Le osservazioni sperimentali mostrano una finestra di funzionamento solare che va dalle circa 7 ore e 45 minuti di fine luglio alle 4 ore e 30 minuti di metà settembre, in accordo con le variazioni meteorologiche e dell' inclinazione del sole rispetto all' orizzonte.

Il contributo del sistema di solar cooling è risultato di circa il 21 % sul carico di picco della serra, quando il campo solare è in effettiva produzione, e del 100 % in assenza di radiazione solare, con caldaia di integrazione a gas accesa.

Nel complesso l' impianto realizzato ha mostrato un funzionamento molto affidabile e che non ha richiesto assistenza per periodo molto lunghi anche durante la chiusura del centro per le ferie estive.

Successive modifiche sulla schermatura alla radiazione solare della serra, potranno far sì da ridurre il carico richiesto in modo da poter utilizzare il solo impianto ad azionamento termico al posto di quello preesistente a compressore elettrico.

## 1 Introduzione

Tra le attività svolte nel PAR 2012 del presente Accordo di Programma (Progetto C3 “UTILIZZO DEL CALORE SOLARE E AMBIENTALE PER LA CLIMATIZZAZIONE”) è stato eseguito il completamento dell’installazione dell’impianto di Solar Cooling a servizio della Serra a contenimento (edificio F96) del CR ENEA Casaccia.

In particolare l’impianto è stato dotato di un idoneo quadro elettrico di comando, di un sistema di acquisizione dati ed è stato modificato in alcune parti fino all’ottenimento delle specifiche funzionali e di sicurezza.

Tali attività hanno consentito l’effettivo inizio delle attività di monitoraggio sull’impianto realizzato.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Descrizione della serra a contenimento (edificio F96)

La serra a contenimento (edificio F96) è ubicata nell’area del CR ENEA- Casaccia ed è utilizzata per la sperimentazione di piante transgeniche per l’ottenimento di vaccini ed altre attività simili con sistemi vari di acquacoltura e illuminazione mista solare/artificiale.

La serra a pianta rettangolare delle dimensioni di 18 m di lunghezza per 12 di larghezza ha un’altezza di circa 4.5 m ed ha l’asse longitudinale orientato secondo la direzione Nord-Sud.



Figura 1 - Ed.F96 - Serra a contenimento

Tabella 1 - Caratteristiche Principali della serra

Superficie Serra	mq	210
Volume lordo	mc	950
Superficie trasparente in pianta	mq	140
Superficie trasparente laterale	mq	130
Superficie coltivabile	mq	8x14

## 2.2 Dati realizzativi dell’Impianto

L’impianto di Solar Cooling realizzato nella serra a contenimento, è stato installato implementando l’impianto di climatizzazione esistente costituito da due caldaie a gas naturale per il riscaldamento invernale, da un gruppo frigorifero a compressore elettrico da ~100 kW per il raffreddamento estivo e da una distribuzione interna del tipo a batterie alettate.

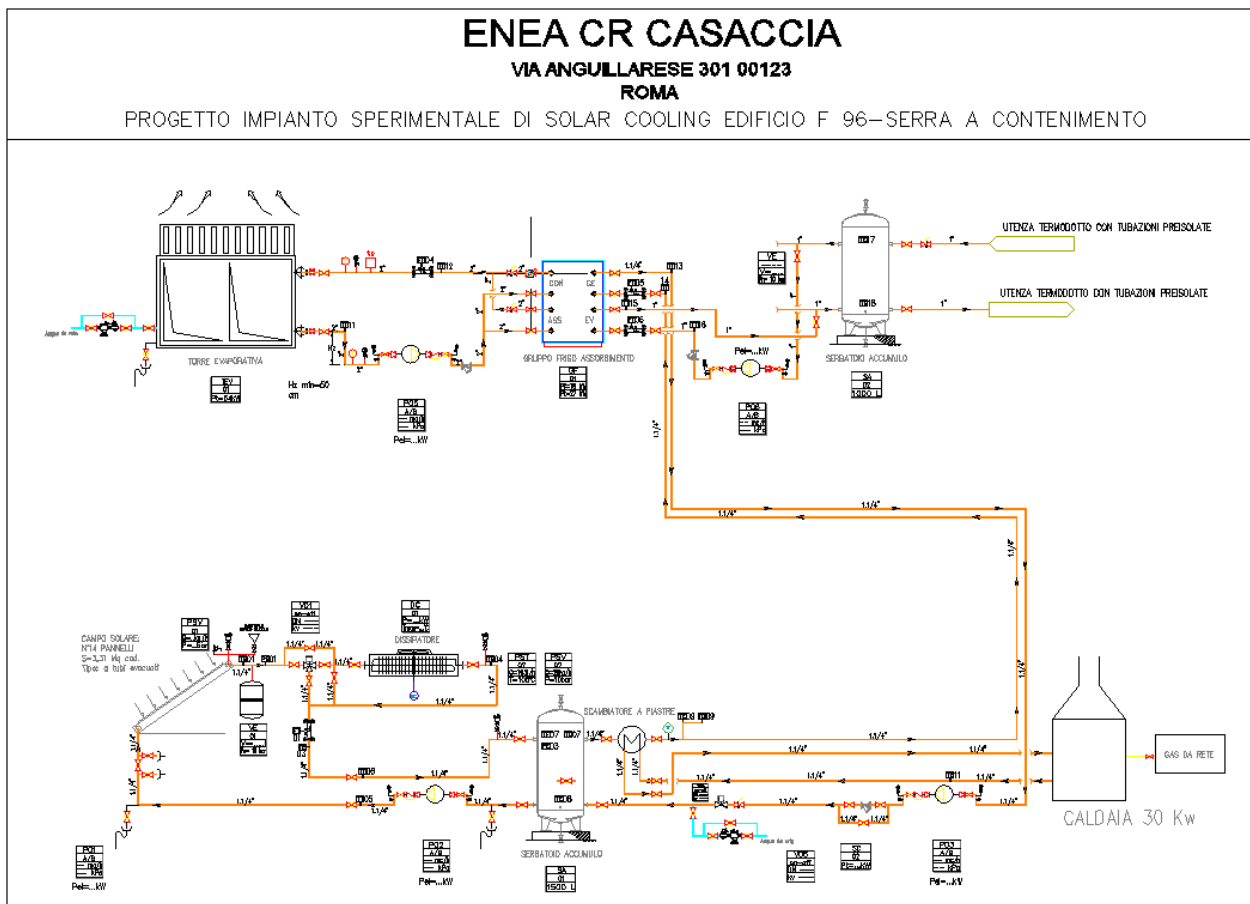


Figura 2 - Schema funzionale impianto solar cooling serra

L’ impianto di Solar Cooling precedentemente realizzato è composto da:

- campo solare realizzato con pannelli solari a tubi evacuati da 50 m<sup>2</sup>;
- accumulo di energia termica costituito da un serbatoio da 1500 l;
- chiller ad assorbimento da 17,5 kW alimentato completamente dall’energia termica prodotta dal campo solare e da una caldaia a gas metano a compensazione delle fluttuazione della radiazione solare disponibile;
- torre evaporativa a servizio del chiller ad assorbimento;
- installazione di un sistema di controllo ed acquisizione dei dati di funzionamento.

Pertanto, l’impianto realizzato è quello rappresentato nello schema di figura 2.

### 2.3 Sistema acquisizione dati

Per la campagna sperimentale è stato utilizzato un sistema di acquisizione dati composto da n° 5 sensori di portata ad induzione magnetica KHRONE IFS 5000 precedentemente installati sulle linee principali dell' impianto e da n° 10 misuratori di temperatura del tipo AREXX PRO Pt100 con trasmissione di dati WiFi che permettono di acquisire i dati di funzionamento dell'impianto.



Figura 3 - Misuratori di portata ad induzione magnetica



Figura 4 - Misuratori di temperatura (Tipo AREXX mod. PRO-PT100)

I sensori di portata sono inseriti nelle seguenti linee:



- Circuito caldaia di integrazione
- Circuito acqua refrigerata del chiller ad assorbimento
- Circuito acqua calda di alimentazione del chiller ad assorbimento
- Circuito acqua di raffreddamento del chiller ad assorbimento (torre evaporativa)
- Circuito del campo solare

I sensori di temperatura, previa taratura con pozzetti di calibrazione, sono stati inseriti in mandata e ritorno delle stesse linee, in modo da poter valutare opportunamente i carichi termici.

### 2.4 Dati di monitoraggio

L'impianto di solar cooling è attualmente in funzione giorno e notte senza interruzione, Il grafico delle temperature acquisite relative agli ultimi 20 minuti di funzionamento dell' impianto è sempre visibile on-line sul sito:

<http://log02.casaccia.enea.it/graphs.html>

Il gruppo frigo ad assorbimento installato (YAZAKI modello WFC SC5) eroga la potenza frigorifera nominale di 17.6 KW alla temperatura di alimentazione dell'acqua calda di circa 88 °C, assorbendo circa 25 KW di potenza termica (Tabella 2).

Tabella 2 - Specifiche tecniche dell' assorbitore Yazaki WFC SC5			
Potenza frigorifera		kW	17,6
Acqua refrigerata	Temperatura	Ingresso ° C	12,5
		Uscita ° C	7
Acqua raffreddamento	Potenza dissipata	kW	42,7
		Temperatura	Ingresso ° C
	Uscita ° C		35
Acqua calda	Potenza assorbita	kW	25,1
		Temperatura	Ingresso ° C
	Uscita ° C		83
	Intervallo alimentazione ° C		Min. 70 – Max 95
Dimensioni	Larghezza	mm	594
	Profondità	mm	744
	Altezza	mm	1786
Peso	A vuoto	kg	365
	In esercizio	kg	420
Rumorosità	Livello sonoro dB(A) a 1 metro		46



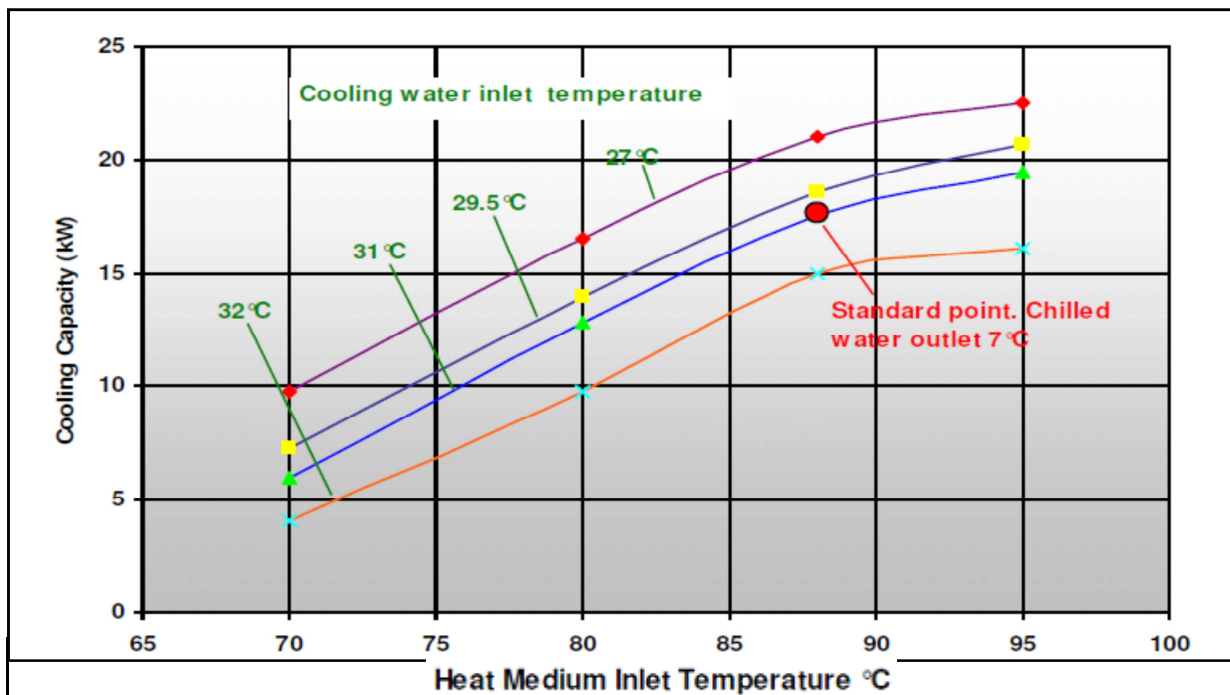


Figura 5 – Yazaki WFC SC5: Potenza frigorifera erogata in funzione della temperatura dell’acqua calda di alimentazione

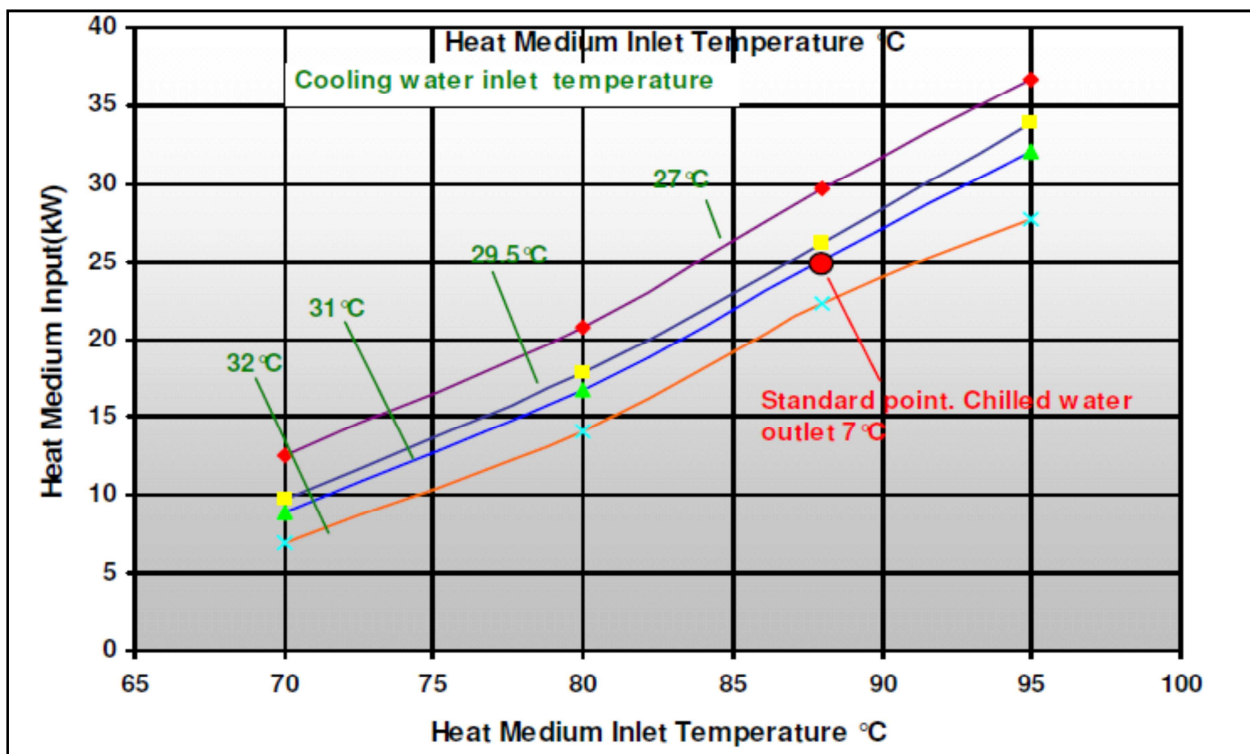


Figura 6 - Yazaki WFC SC5: Potenza termica assorbita dalla macchina

Le figure 5 e 6 mostrano le curve di prestazione del gruppo frigo ad assorbimento installato. Si deve rilevare che l’impianto realizzato è stato progettato per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento con tutta l’energia termica che può essere prodotta dal campo solare installato di superficie di circa 50 m<sup>2</sup> con l’eventuale integrazione di una caldaia nel caso di mancanza o insufficienza della radiazione solare disponibile.

#### 2.4.1 Set point dei regolatori di temperatura

Come detto precedentemente il chiller Yazaki ad assorbimento è posto in parallelo alla macchina a compressione preesistente.

Il regolatore di bordo del chiller Yazaki ha un set point di  $7 \pm 0.5$  °C sulla mandata dell' acqua refrigerata, mentre quello della macchina a compressione lo ha di  $13 \pm 1$  °C sul ritorno.

Considerando il salto termico tipico (5 °C) su queste apparecchiature, questa scelta permette un funzionamento continuo del chiller Yazaki ed uno intermittente di quello a compressione a seconda del carico, senza interferenze tra le due macchine.

Pertanto con questa configurazione si ottiene il massimo dell'utilizzo della fonte rinnovabile.

Il campo solare è interamente regolato da una centralina COSMET 5 della KLOBEN, equipaggiata con una sonda Pt 1000 all'uscita dei pannelli solari ed una con termistore 10K sulla porzione inferiore del serbatoio di accumulo.

La pompa solare che alimenta i pannelli viene accesa se la differenza di temperatura tra le due sonde è superiore a 5 °C e se la temperatura di mandata dei pannelli non supera i 95 °C (limite superiore di funzionamento del chiller Yazaki).

Se la temperatura di mandata dei pannelli supera occasionalmente i 100 °C, il flusso di acqua di campo solare viene deviato verso l' aerotermo di smaltimento previsto nello schema.



Figura 7 - Centralina solare COSMET 5

La caldaia di integrazione, mod. WESTEN Star Digit del tipo a fiamma modulante, ha un set point fissato a 90 °C con isteresi di spegnimento 5 °C e isteresi di riaccensione 10 °C.



Figura 8 - Caldaia di integrazione

### 2.5 Analisi dei dati sperimentali

Nei grafici di figura 9 e 10 vengono rappresentati alcuni parametri di funzionamento (Temperatura esterna, temperatura in/out dal campo solare, Temperatura in/out dalla macchina frigorifera etc.) nelle giornate del 28/7/2013 e del 30/7/2013 rispettivamente.

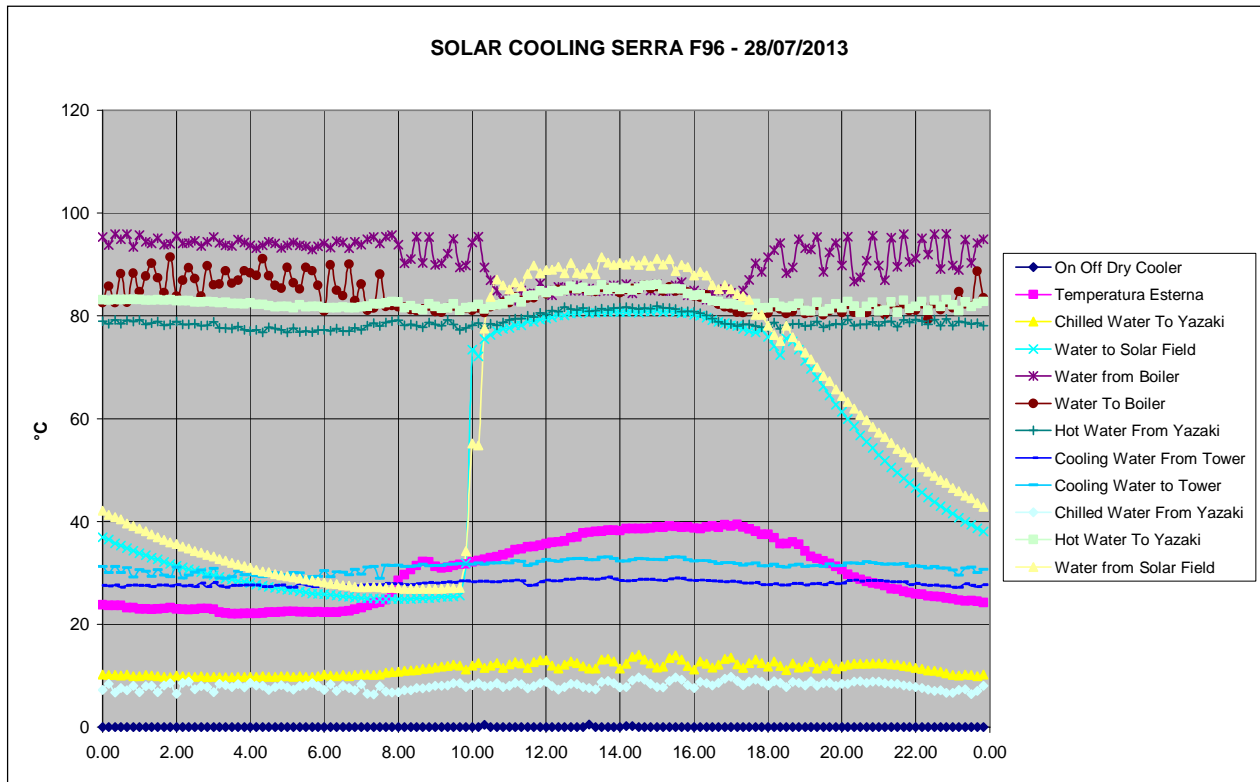


Figura 9 – Dati rilevati il 28/07/2013

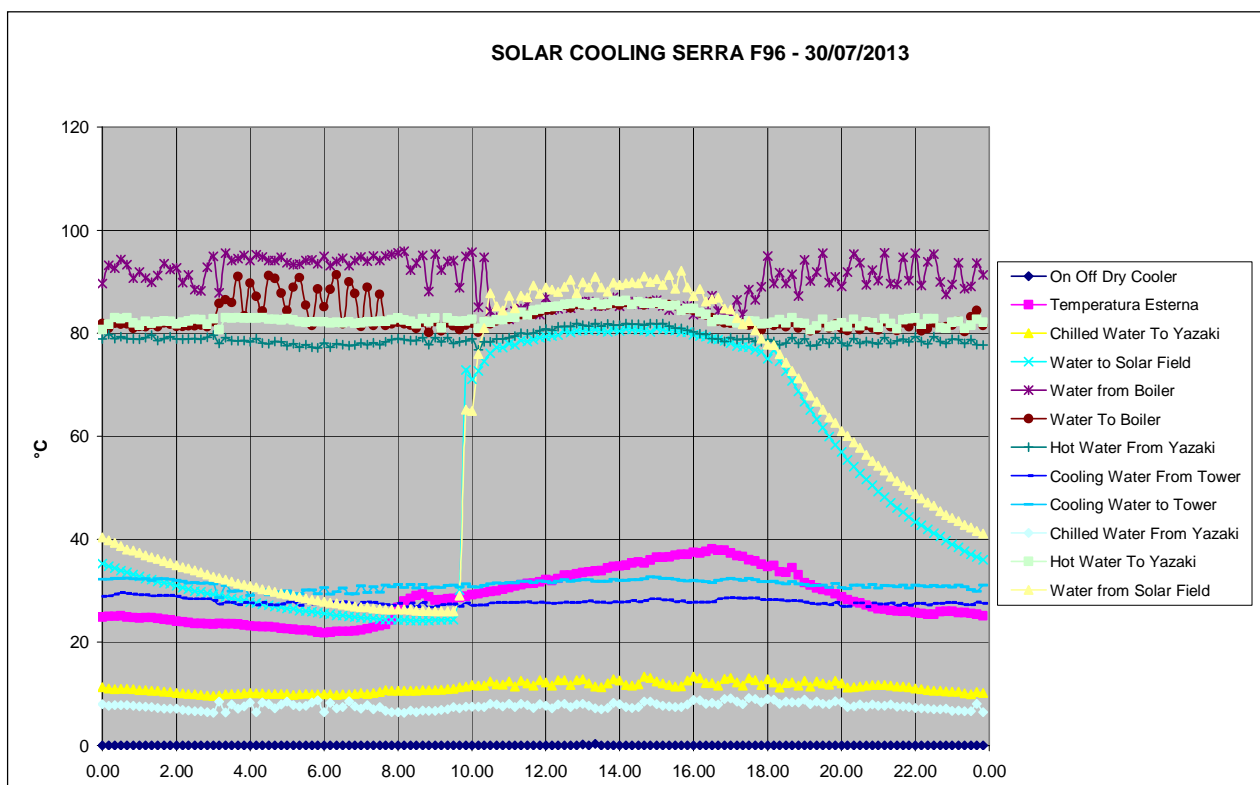


Figura 10 – Dati rilevati il 30/07/2013

### 2.5.1 Funzionamento Macroscopico

Con riferimento ai dati di sperimentali del 28 Luglio 2013, il funzionamento dell' impianto di solar cooling può essere suddiviso in quattro grossi sottoinsiemi:

- Funzionamento Solare: dalle 10.15 alle 18 (nel resto delle ore funziona la sola caldaia di integrazione)
- Funzionamento solo chiller Yazaki dalle 20 alle 10.00
- Funzionamento solo chiller Yazaki parzializzato dalle 23 alle 8
- Funzionamento chiller Yazaki + chiller a compressione dalle 10.00 alle 20

#### Alcune considerazioni:

Il funzionamento misto chiller Yazaki + chiller a compressione non vede mai il secondo acceso continuativamente, quindi il carico termico massimo anche in condizioni estive severe non supera i ~ 120 kW frigoriferi messi a disposizione complessivamente da entrambi gli impianti.

Infatti, l'analisi dei dati di funzionamento del 28/07/2013, nell'intervallo di tempo di funzionamento misto chiller Yazaki + chiller a compressione mostra un andamento ondulatorio delle temperature dell'acqua refrigerata in ingresso e di ritorno all'accumulo freddo del tipo a "dente di sega" (Figura 11) con un periodo di circa 30-40 minuti.

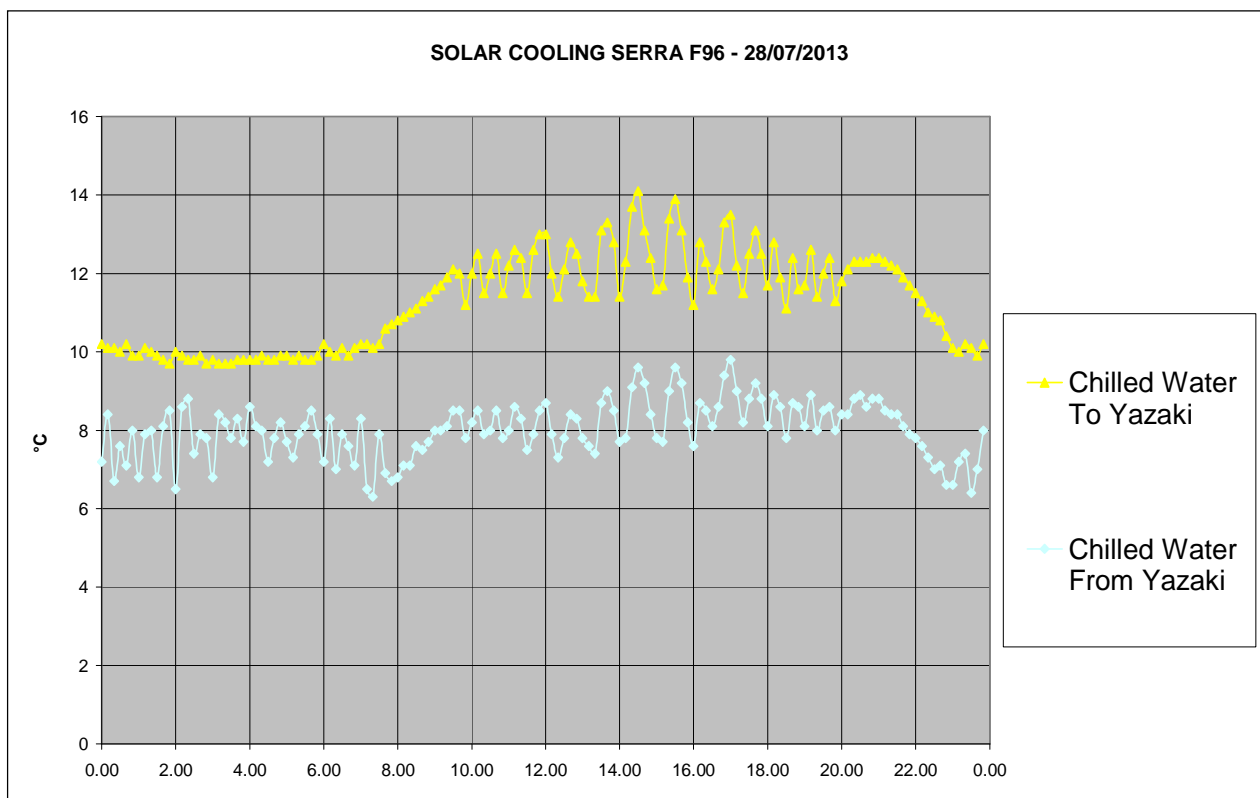


Figura 11 - Chiller Yazaki: Temperature IN/OUT Chilled Water - 28/07/2013

Tale andamento è spiegabile dall'intervento di tipo ON/OFF del Chiller a compressione che ha una potenza massima di circa 100 KW. Il numero di interventi del Chiller a compressione è di circa 16 nell'arco temporale preso in considerazione (Funzionamento misto – circa 10 ore).

Dalle analisi effettuate è stato anche possibile stimare la potenza massima richiesta dalla serra nel periodo di massimo carico, dalle 12 alle 16.

Infatti, la potenza della macchina frigorifera ad assorbimento nel periodo considerato (4 ore) rimane più o meno costante sul valore medio di 14.14 KW mentre la macchina a compressione nel funzionamento ON/OFF eroga una potenza di 100 KW per circa il 54 % del tempo complessivo.

Pertanto, l'energia frigorifera prodotta è pari a 56.6 KWh per la macchina ad assorbimento ( $14.14 \text{ KW} \cdot 4 \text{ h}$ ) e 216 KWh per quella compressione ( $100 \text{ KW} \cdot 2.16 \text{ h}$ ) per un fabbisogno energetico complessivo di circa 336 KWh corrispondente ad una potenza media di circa 68 KW nelle ore più calde di una giornata che ha registrato un caldo eccezionale per il clima di Roma.

Inoltre, in assenza di radiazione solare si è osservato il funzionamento della sola macchina ad assorbimento con un potenza media erogata di circa 11.1 KW (figura 12 - Potenze rilevate il 28/7/2013) da cui si evince che la serra ha un carico termico diurno da smaltire, dovuto essenzialmente alla radiazione solare, al ricambio d'aria della serra ed alle lampade per le colture, in rapporto di circa 6:1 con quello notturno.

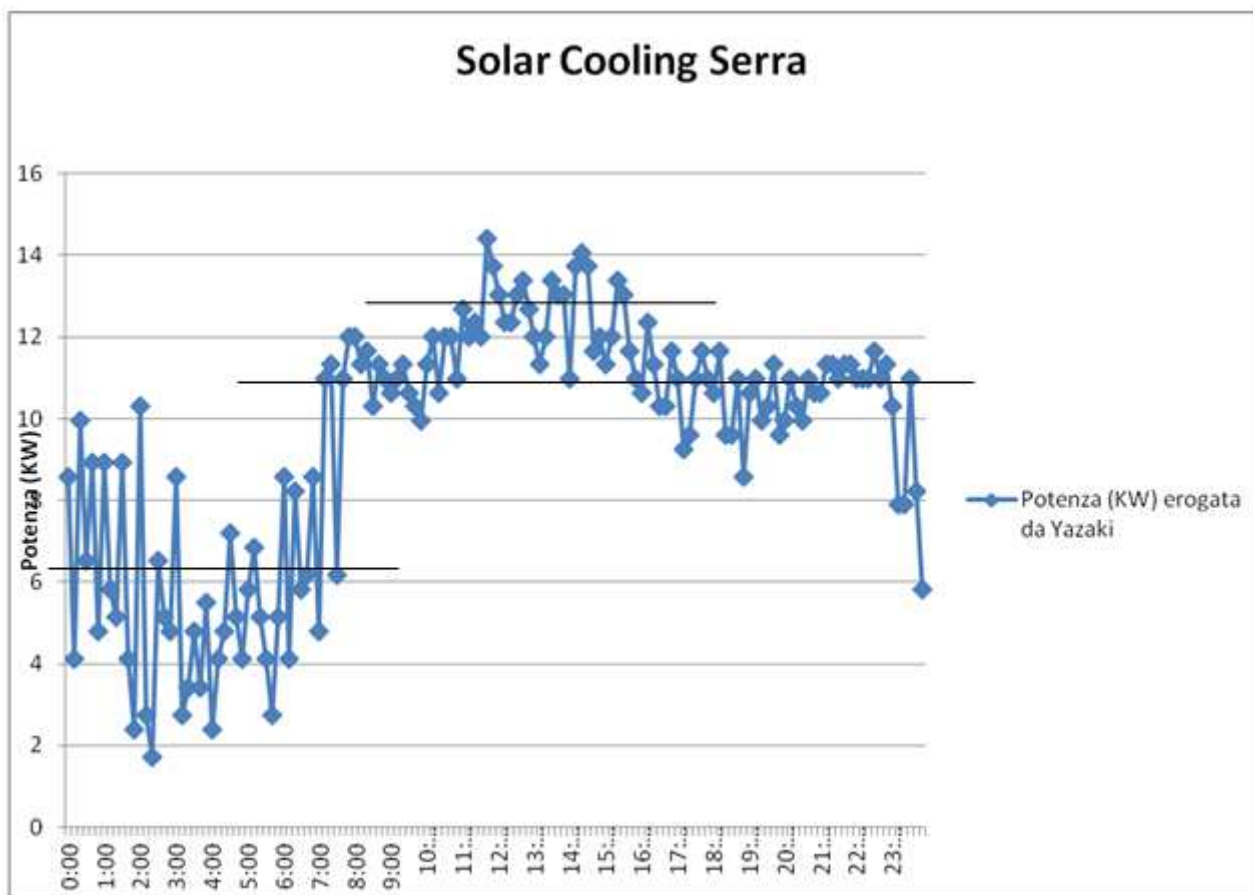


Figura 12 - Chiller Yazaki: Potenze frigorifere rilevate il 28/7/2013

Nel funzionamento solare, la caldaia di integrazione è comunque saltuariamente accesa a potenza ridotta e il chiller Yazaki viene alimentato a circa 86 °C contro gli 83 °C del funzionamento con sola caldaia.

- Il resto del periodo estivo, sino al 14/09, vedi figure 13-16, è stato caratterizzato da un temperatura esterna generalmente decrescente che unita alla fisiologica variazione dell'angolo di incidenza della radiazione solare, ha complessivamente portato a una riduzione di quasi 3 ore della finestra di funzionamento solare della macchina Yazaki rispetto ai valori di luglio, cui corrisponde però una riduzione di circa due ore anche del periodo in cui è acceso il chiller elettrico.

Nel complesso l'impianto si è dimostrato particolarmente affidabile, ed ha richiesto soltanto saltuarie pulizie del filtro dell'acqua di raffreddamento della torre evaporativa da detriti ed alghe, che potranno essere minimizzate con l'uso di apposite sostanze per prevenirne la formazione.

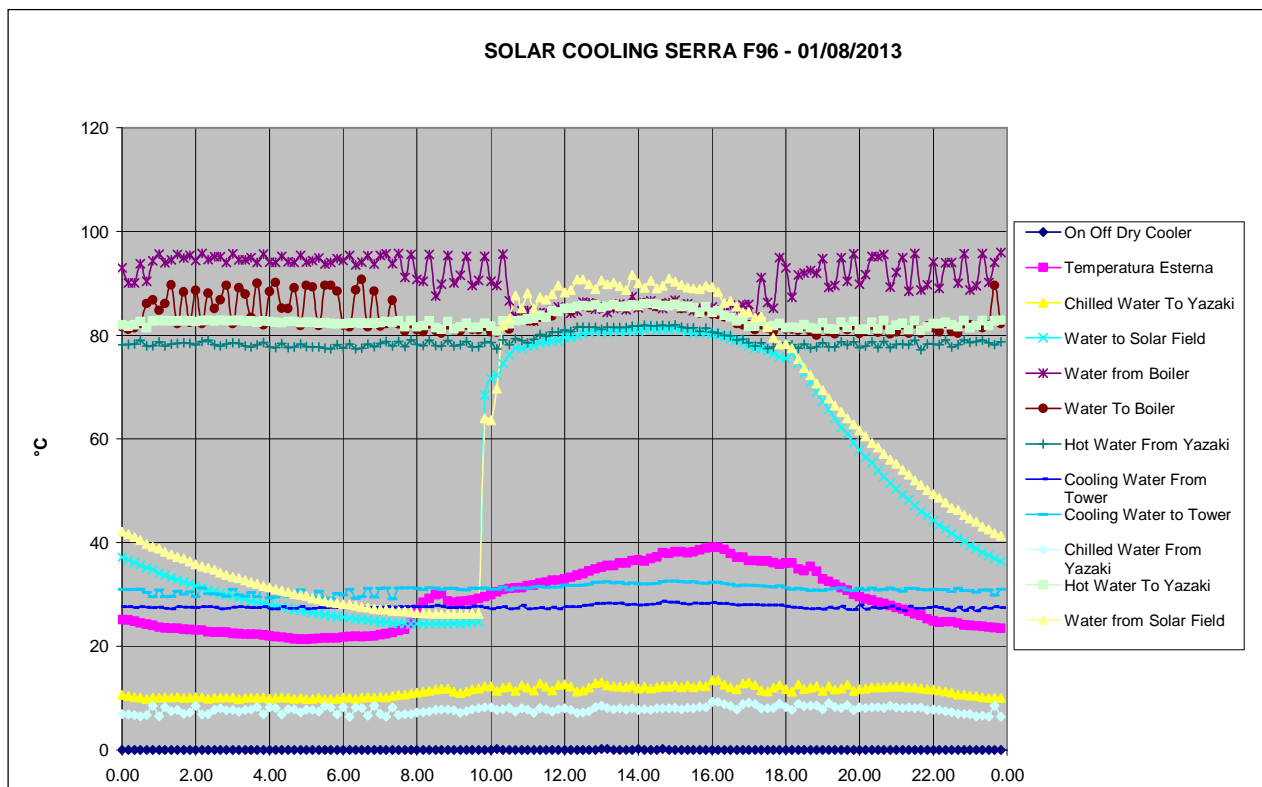


Figura 13 - Dati rilevati il 01/08/201

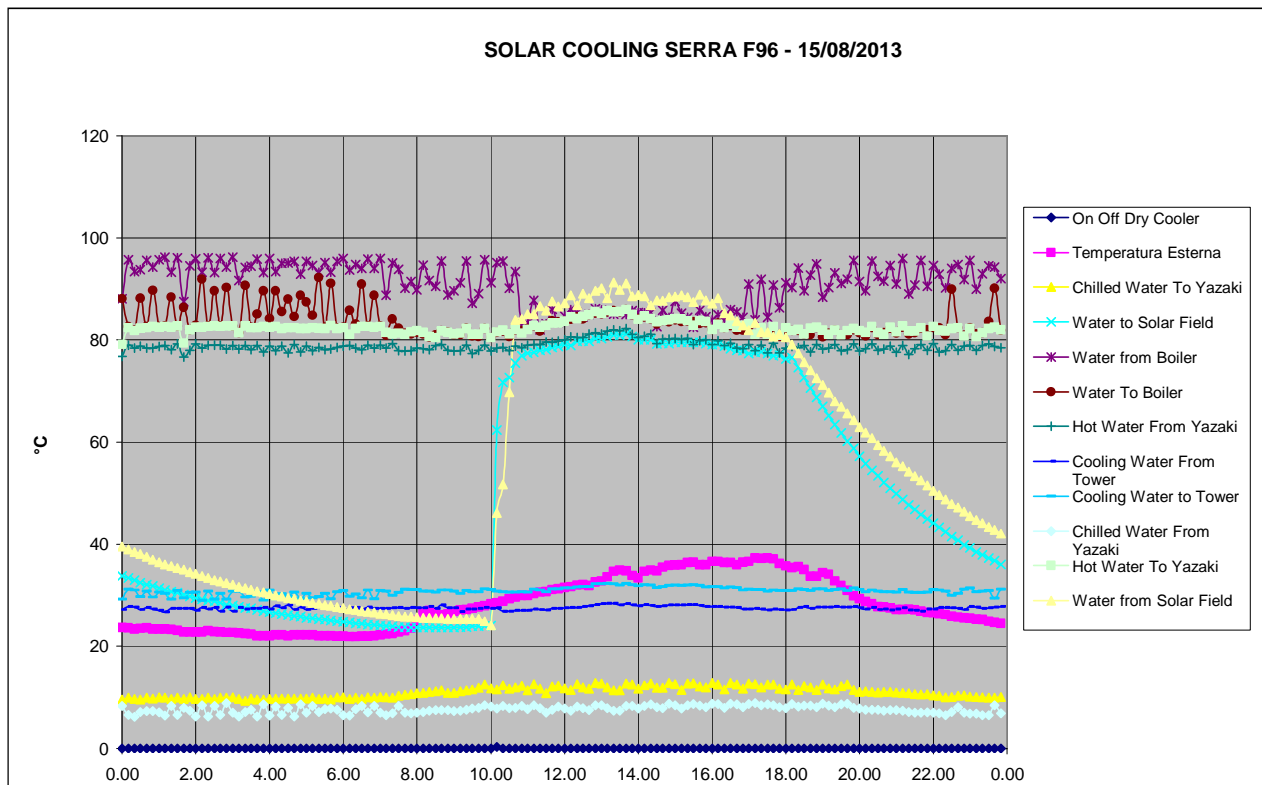


Figura 14 - Dati rilevati il 15/08/2013



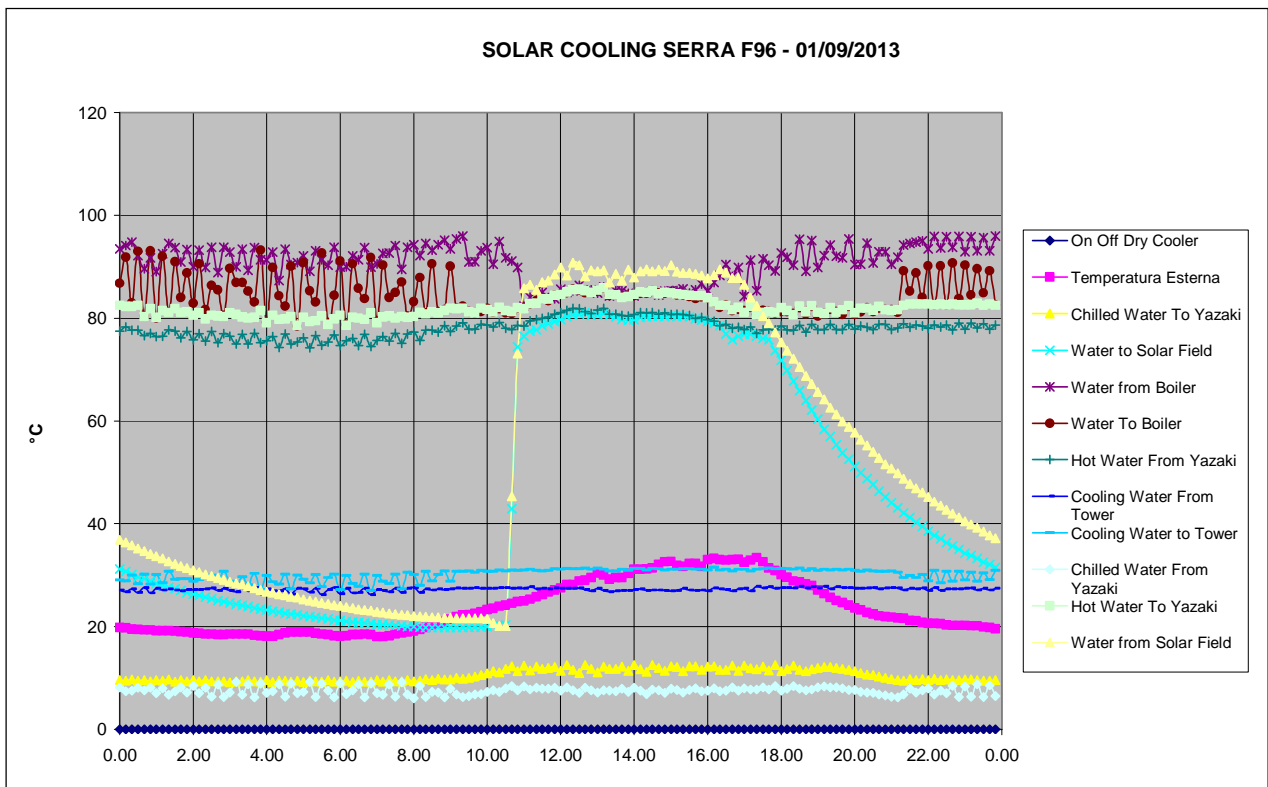


Figura 15 - Dati rilevati il 01/09/2013

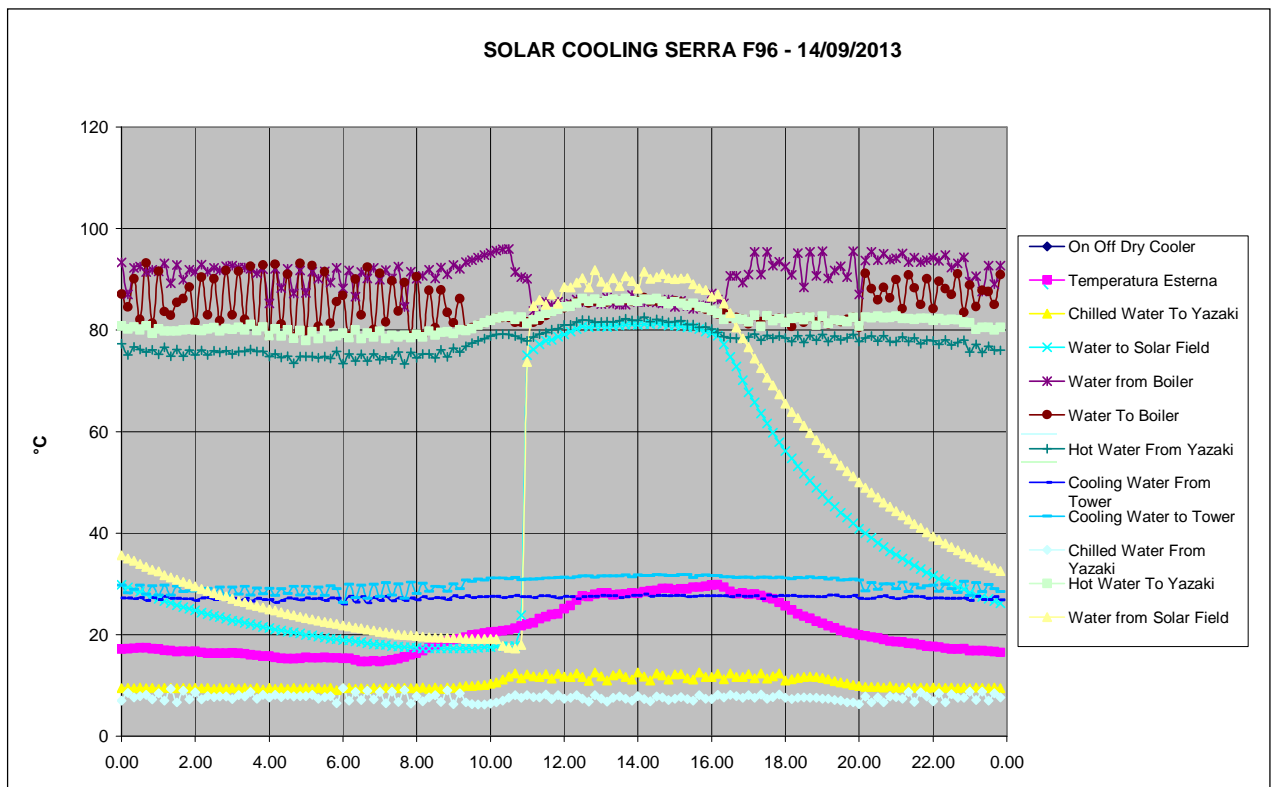


Figura 16 - Dati rilevati il 14/09/2013



### 3 Conclusioni

I dati fin qui rilevati per il funzionamento estivo hanno evidenziato il corretto funzionamento delle varie componenti dell'impianto ed hanno consentito di valutare il carico frigorifero necessario a mantenere le condizioni climatiche richieste per le sperimentazioni condotte nella serra.

Si può rilevare che nel caso fosse possibile realizzare una schermatura mobile esterna della copertura della serra durante i mesi estivi, utilizzando solo luce artificiale per l'illuminazione delle colture, il carico frigorifero potrebbe ridursi ad un valore molto prossimo a quello della potenzialità del solo impianto di Solar Cooling.

Infatti, nel caso che la schermatura sulla copertura orizzontale fosse in grado di ridurre la radiazione solare incidente sul piano orizzontale di circa il 80% (rete ombreggiante), considerando una radiazione solare massima di circa  $850 \text{ W/m}^2$  nel periodo di funzionamento Solare, come sopra definito, e considerato che il materiale con cui è costruita la copertura della serra (policarbonato alveolare) ha un fattore di trasmittanza di circa il 75%, allora la riduzione del carico frigorifero per i 112 mq circa di copertura effettivamente trasparente sulle zone coltivabili, sarebbe stimabile in circa 57 KW, cioè di poco inferiore al carico frigorifero di picco calcolato con i dati sperimentali raccolti.

Questo dimostra che con la copertura aggiuntiva la macchina frigorifera ad assorbimento da 17 KW sarebbe sufficiente a garantire le condizioni climatiche richieste all'interno della serra con una riduzione quasi totale dell'energia elettrica attualmente impiegata.