



Ricerca di Sistema elettrico

Gli accumuli termici a cambiamento di fase integrati in impianti di solar heating and cooling: prove sperimentali.

*N. Calabrese, F. D'Annibale, P. Rovella, R. Lazzarin,
M. Noro, L. Zamboni*

GLI ACCUMULI TERMICI A CAMBIAMENTO DI FASE INTEGRATI IN IMPIANTI DI SOLAR HEATING AND COOLING: PROVE SPERIMENTALI

N. Calabrese, F. D'Annibale (ENEA), P. Rovella (UNIVERSITA' DELLA CALABRIA) - Report RdS/2013/088
R. Lazzarin, M. Noro (UNIVERSITA' DI PADOVA), L. Zamboni (Libero Professionista) – Allegato A

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 e qualificazione di componenti e sistemi

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Integrazione nell'impianto di solar heating and cooling realizzato a servizio dell'edificio F92 di un accumulo termico del tipo a cambiamento di fase"* tra ENEA e UNIVERSITA' DI PADOVA

Responsabile scientifico ENEA: Ing. N. Calabrese

Responsabile scientifico UNIPADOVA: Prof. R. Lazzarin

Si ringrazia per la fattiva collaborazione l'Università degli Studi della Calabria. L'attività di ricerca svolta in merito all'analisi comparativa dei dati di funzionamento dell'impianto anno 2012 (serbatoio di accumulo termico tradizionale da 1.500 litri) ed anno 2013 (serbatoio di accumulo termico a cambiamento di fase da 1.000 litri) è stata sviluppata nell'ambito del lavoro di Dottorato dell'ing. Rovella presso l'Università di Calabria. Il lavoro di dottorato è svolto su impianti sperimentali ENEA che utilizzano le tecnologie del solar heating and cooling e dei sistemi a pompa di calore.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 IL SOLAR HEATING.....	6
2.1 ANALISI DATI SPERIMENTALI DEL MONITORAGGIO INVERNALE 2012	9
2.1.1 <i>Periodo di monitoraggio 9 Febbraio - 29 Febbraio 2012</i>	9
2.1.2 <i>Periodo di monitoraggio 13 Marzo -31 Marzo 2012</i>	10
2.1.3 <i>Periodo di monitoraggio 1 Aprile -15 Aprile 2012</i>	11
2.2 ANALISI DATI SPERIMENTALI DEL MONITORAGGIO INVERNALE 2013	17
2.2.1 <i>Periodo di monitoraggio 8 Febbraio - 28 Febbraio 2013</i>	18
2.2.2 <i>Periodo di monitoraggio 13 Marzo -31 Marzo 2013</i>	21
2.2.3 <i>Periodo di monitoraggio 1 Aprile -15 Aprile 2013</i>	24
2.3 CONFRONTO TRA I RISULTATI DEL MONITORAGGIO INVERNALE 2012 E DEL MONITORAGGIO INVERNALE 2013	32
2.3.1 <i>Confronto mesi di Febbraio 2012 e Febbraio 2013</i>	32
2.3.2 <i>Confronto mesi di Marzo 2012 e Marzo 2013</i>	35
2.3.3 <i>Confronto mesi di Aprile 2012 e Aprile 2013</i>	39
2.4 ANALISI SERBATOIO D'ACCUMULO A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM)	45
3 IL SOLAR COOLING	57
3.1 ANALISI DATI SPERIMENTALI DEL MONITORAGGIO ESTIVO 2012.....	59
3.1.1 <i>Periodo di monitoraggio 1 Giugno -30 Giugno 2012</i>	59
3.1.2 <i>Periodo di monitoraggio 1 Luglio -31 Luglio 2012</i>	60
3.1.3 <i>Periodo di monitoraggio 1 Agosto -31 Agosto 2012</i>	62
3.1.4 <i>Periodo di monitoraggio 1 Settembre -15 Settembre 2012</i>	63
3.2 ANALISI DATI SPERIMENTALI DEL MONITORAGGIO ESTIVO 2013.....	71
3.2.1 <i>Periodo di monitoraggio 1 Giugno -30 Giugno 2013</i>	71
3.2.2 <i>Periodo di monitoraggio 1 Luglio -31 Luglio 2013</i>	77
3.2.3 <i>Periodo di monitoraggio 1 Agosto -31 Agosto 2013</i>	83
3.3 CONFRONTO TRA I RISULTATI DEL MONITORAGGIO ESTIVO 2012 E DEL MONITORAGGIO ESTIVO 2013	96
3.3.1 <i>Confronto mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013</i>	96
3.3.2 <i>Confronto mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013</i>	100
3.3.3 <i>Confronto mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013</i>	105
4 CONCLUSIONI.....	112
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	113

ALLEGATO A: R.Lazzarin, M. Noro, L. Zamboni “ACQUISIZIONE DI DATI SPERIMENTALI DI FUNZIONAMENTO DELL’IMPIANTO DI SOLAR HEATING AND COOLING PRESENTE PRESSO L’EDIFICIO F92 DEL CNR CASACCIA ENEA NELLA NUOVA CONFIGURAZIONE ADOTTANTE UN ACCUMULO DI CALORE CON MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE”, Università di Padova

Sommario

L'attività di ricerca svolta ha come oggetto di studio l'impianto di solar heating and cooling ubicato presso il Centro Ricerche Enea di Casaccia (Roma) a servizio dell'edificio F-92, dotato di un innovativo sistema di accumulo termico del tipo a cambiamento di fase (PCM). Il documento riporta l'analisi dei dati sperimentali ottenuti durante il monitoraggio invernale (periodo 8 febbraio 2013 –15 aprile 2013) e durante il monitoraggio estivo (periodo 1 giugno 2013 – 31 agosto 2013). I risultati ottenuti durante il monitoraggio dell'impianto sperimentale (anno 2013) sono stati confrontati con i risultati delle precedenti campagne sperimentali relative all'anno 2012 (stagione invernale ed estiva).

Il confronto delle performance ottenute durante le due annualità ha consentito di valutare il contributo energetico apportato dall'inserimento dell'accumulo termico a cambiamento di fase (PCM - Phase Change Material PCM), tenendo comunque conto delle differenti condizioni ambientali e del differente profilo d'utilizzo dell'edificio. Durante il 2013 l'edificio F-92 è stato infatti costantemente occupato (occupazione media di circa 20 persone), essendo frequentemente utilizzato come sede di incontri tecnici e di formazione professionale (specie durante il periodo estivo). Essendo previsto l'inizio delle lezioni in aula alle ore 8:30 del mattino, è stato necessario avviare l'impianto di climatizzazione alle ore 7:00. Questa scelta ha causato il ricorso ad un numero maggiore di ore (rispetto all'anno 2012) di utilizzo della caldaia integrativa a gas metano durante le prime ore del mattino, quando l'energia gratuita fornita dal sole non era sufficiente per produrre acqua alla temperatura di circa 85°C (temperatura necessaria per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento azionato termicamente).

1 Introduzione

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università di PADOVA, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi industriali, che ha curato l'analisi dei dati di funzionamento del nuovo accumulo termico del tipo a cambiamento di fase (Phase Change Material) durante la stagione di funzionamento invernale.

ENEA si è occupata dell'acquisizione e quindi dell'elaborazione dei dati sperimentali di funzionamento dell'impianto di solar heating and cooling, realizzato a servizio dell'edificio F92, presente presso il C.R. ENEA di Casaccia. E' stata quindi effettuata un'analisi del comportamento complessivo dell'impianto di riscaldamento e di climatizzazione comparando i dati di funzionamento relativi all'anno 2012 (serbatoio di accumulo termico tradizionale da C=1.500 litri) ed all'anno 2013 (serbatoio di accumulo termico innovativo, PCM, da C=1.000 litri).

L'impianto di solar heating and cooling presente all'interno del Centro Ricerche ENEA di Casaccia è stato realizzato allo scopo di riscaldare durante il periodo invernale e di climatizzare durante il periodo estivo l'Edificio F-92. L'edificio si sviluppa su tre livelli (superficie totale pari a circa 380 m²) di cui ognuno servito da un circuito idraulico indipendente in modo tale da realizzarne l'esclusione, attraverso l'impianto di regolazione, quando le condizioni termo igrometriche dello stesso sono soddisfatte. L'impianto può essere suddiviso in centrale di produzione, campo solare, termodotto di collegamento tra la centrale di produzione ed edificio, sottocentrale di edificio che smista ai vari circuiti il fluido termovettore, terminali d'impianto, rappresentati da pannelli radianti a pavimento e da fan coil a cassetta installati a soffitto.

2 Il solar heating

L'impianto di solar heating and cooling presente all'interno del Centro Ricerche ENEA di Casaccia è stato realizzato allo scopo di riscaldare durante il periodo invernale e di climatizzare durante il periodo estivo l'Edificio F-92. L'edificio si sviluppa su tre livelli (superficie totale pari a circa **381 m²**) di cui ognuno servito da un circuito idraulico indipendente in modo tale da realizzarne l'esclusione, attraverso l'impianto di regolazione, quando le condizioni termo igrometriche dello stesso sono soddisfatte. L'impianto può essere suddiviso in centrale di produzione, campo solare, termodotto di collegamento tra la centrale di produzione ed edificio, sotto-centrale di edificio che smista ai vari circuiti il fluido termovettore, terminali d'impianto, rappresentati da pannelli radianti a pavimento e da fan coil a cassetta installati a soffitto (Figura 1).



Figura 1: Viste dell'impianto e dell'edificio F-92

La facility di prova è provvista di un sistema di monitoraggio integrato **BMS (Building Management System)** che permette il controllo e la verifica costante di tutti gli aspetti legati al funzionamento degli impianti.

L'analisi dei dati sperimentali permette di valutare le prestazioni dell'impianto in modalità heating determinando in che percentuale la produzione di energia realizzata dal campo solare contribuisca a soddisfare il fabbisogno energetico dell'intero edificio. Le grandezze indagate riguardano la produzione di acqua calda utilizzata per il riscaldamento invernale degli ambienti, e quindi la parte d'impianto costituita dall'accumulo caldo, dal campo solare, dalla caldaia integrativa e dai rispettivi scambiatori di calore. Il flusso energetico destinato all'edificio segue un diverso iter, indagabile attraverso i contatermie installati (tabella 1), a seconda se interviene la caldaia integrativa o il campo solare. In questo ultimo caso, l'energia prodotta dal campo solare dipende ovviamente dall'irradianza solare incidente sui pannelli mentre quella effettivamente utilizzata per caricare l'accumulo dipende dall'attivazione del dry cooler e dallo scambio termico che avviene attraverso lo scambiatore a piastre interposto tra il circuito solare ed il puffer (Figura 2). I dati energetici misurati attraverso i contatermie, vengono forniti dal BMS con cadenza oraria, giornaliera e mensile. In Figura 3 è riportato il layout d'impianto ponendo in evidenza i contatermie installati.

Tabella 1. Codici identificativi contatermie installati

Legenda	
Month/Day	Istante di acquisizione
FE01	Energia prodotta dal campo solare [kWh]
FE02	Energia scambiata dal campo solare con l'accumulo [kWh]
FE03	Energia prodotta dalla caldaia integrativa [kWh]
FE07	Energia inviata all'edificio attraverso il termodotto [kWh]



Figura 2. Schema produzione e fornitura energia a partire dai collettori solari

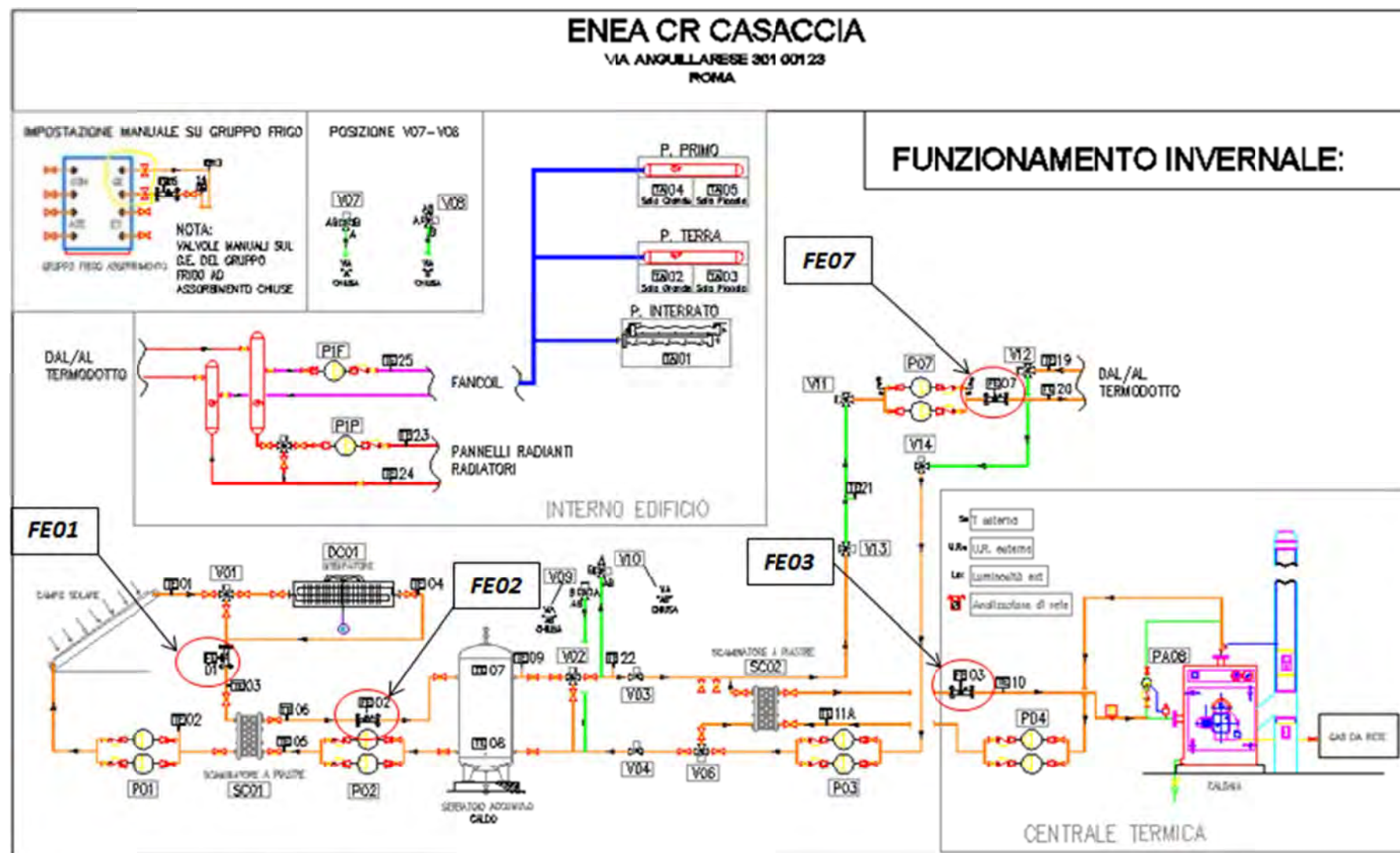


Figura 3. Schema semplificato impianto in modalità solar heating situato presso il CR Enea Casaccia (Roma), con dettaglio contatermie

2.1 Analisi dati sperimentali del monitoraggio invernale 2012

Di seguito si riportano i dati sperimentali relativi al monitoraggio dell'impianto per il periodo 9 febbraio 2012 - 15 aprile 2012. Durante la prima campagna invernale è stato deciso di far funzionare l'impianto in modo continuo (24 ore) dal 9 febbraio 2012 al 17 febbraio 2012 e di impostare un funzionamento di tipo intermittente dal 19 febbraio 2012 al 15 aprile 2012 (funzionamento intermittente: ore 7.00-17.00). I valori della temperatura dell'aria esterna (Figura 4) vengono acquisiti dal sistema BMS ogni dieci minuti a partire dai rilevamenti effettuati da una sonda di temperatura da esterno installata in campo.

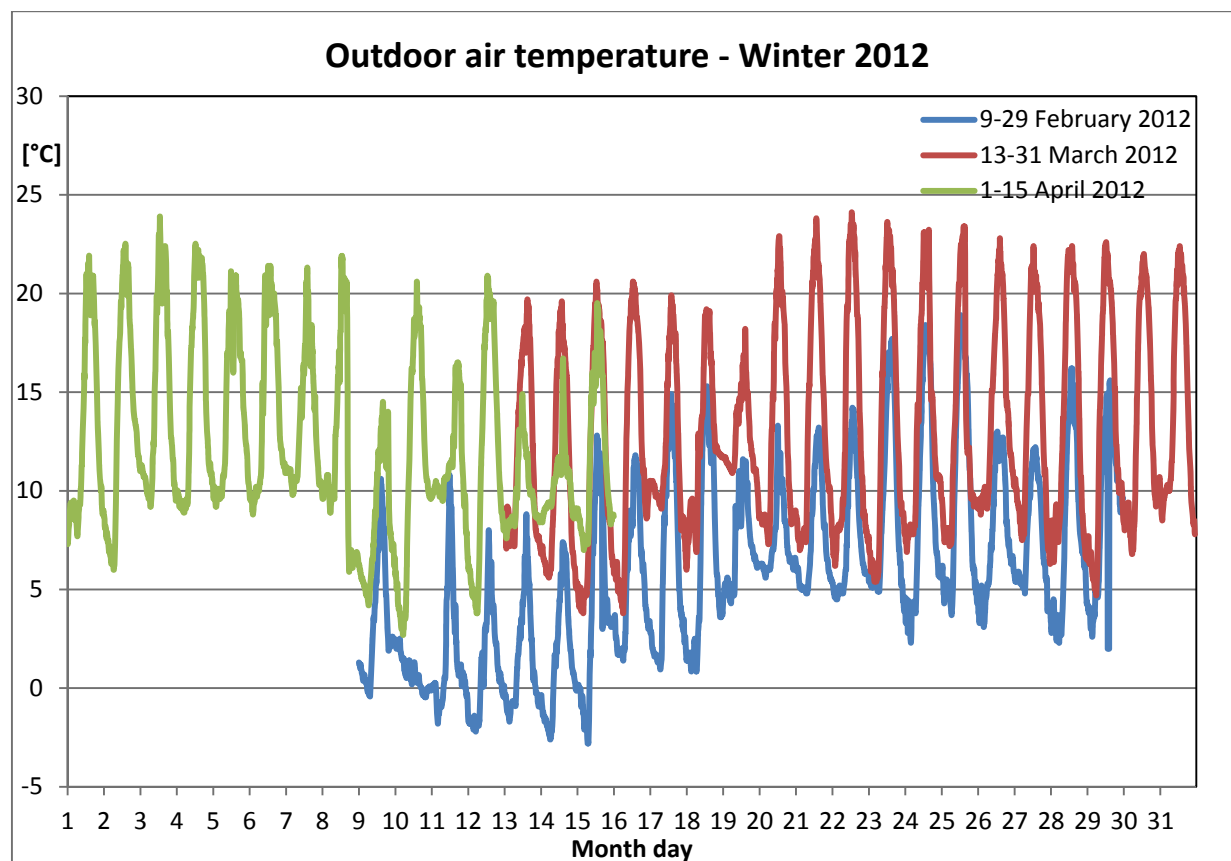


Figura 4. Temperatura giornaliera aria esterna durante l'intero periodo di monitoraggio

Nei mesi monitorati, le condizioni meteo e termigrometriche esterne sono estremamente variabili, determinando una diversa radiazione solare incidente sui collettori.

I valori di temperatura dell'aria esterna relativi al mese di marzo 2012, così come l'intera analisi energetica, riguardano solo il periodo dal 13 al 31 marzo 2012. I giorni precedenti sono stati esclusi per meglio effettuare la comparazione tra il mese di marzo 2012 ed il mese di marzo 2013. Durante i primi giorni di marzo 2013 è stata infatti effettuata la sostituzione del serbatoio d'accumulo classico con quello a cambiamento di fase. Per il soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio F-92 in tali giorni, costantemente occupato, è stato quindi necessario far funzionare esclusivamente la caldaia integrativa.

2.1.1 Periodo di monitoraggio 9 Febbraio - 29 Febbraio 2012

Nei giorni 10 e 11 febbraio 2012 si sono verificate copiose precipitazioni nevose che hanno compromesso il funzionamento dei collettori solari poiché ricoperti totalmente da una spessa coltre di neve. Il mese è stato caratterizzato da precipitazioni nevose e piovose accompagnate da una nuvolosità sparsa alternata a schiarite.

Il monitoraggio è stato condotto dal 9 al 17 Febbraio con l'impianto in modalità di funzionamento continuo (24 ore), mentre nei giorni restanti del mese si è impostato il funzionamento definitivo, caratteristico anche dei mesi successivi, intermittente con impianto acceso dalle ore 7 alle ore 17. Di seguito si riportano i risultati relativi al fabbisogno energetico dell'edificio, all'energia fornita dalla caldaia integrativa e all'energia termica solare stoccata nel serbatoio di accumulo (Tabella 2).

TABELLA 2. Risultati monitoraggio dal 9 al 29 Febbraio 2012

FEBRUARY 2012:

BUILDING ENERGY REQUEST	4.440	kWh	100	%
INTEGRATION GAS BOILER	2.804	kWh	63	%
SOLAR FIELD	1.636	kWh	37	%

I risultati ottenuti per il mese di febbraio (Figura 5) mostrano come il funzionamento della caldaia ha contribuito con una maggiore percentuale (63%) al soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio, rispetto a quanto fornito dal campo solare (37%), sia per le avverse condizioni meteo riscontrate e sia per alcune inefficienze legate al sistema di regolazione, ancora in fase di perfezionamento.

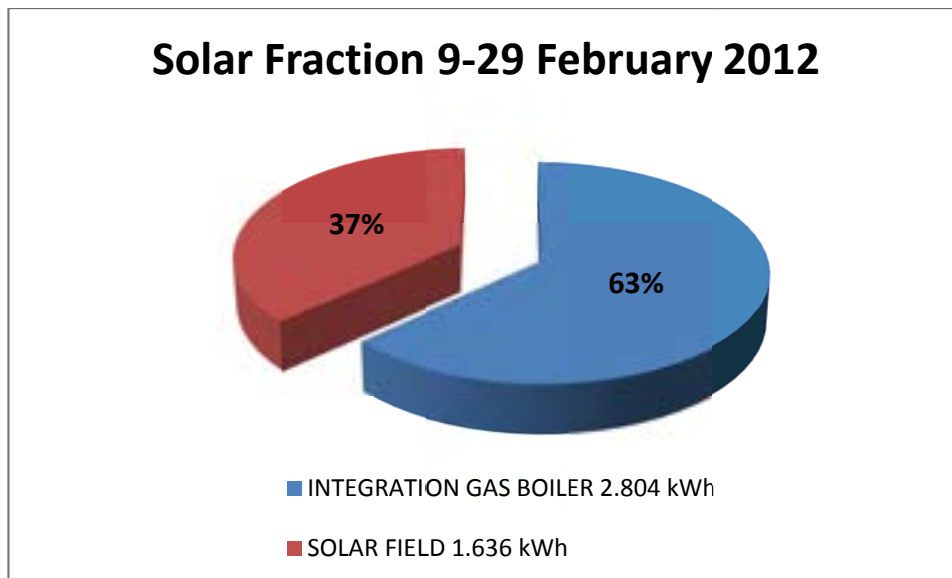


Figura 5. Frazione solare dal 9 al 29 Febbraio

Il fabbisogno energetico dell'edificio nel mese di febbraio è maggiore soprattutto nei primi giorni del mese quando si sono verificate le condizioni meteorologiche più severe, con una temperatura dell'aria esterna media di circa 6°C e che raramente ha raggiunto i 10°C.

2.1.2 Periodo di monitoraggio 13 Marzo -31 Marzo 2012

Nel mese di Marzo si è avuta una maggiore presenza di sole che ha contribuito ad abbassare le richieste di energia da parte dell'edificio, per mantenere le condizioni di comfort all'interno, rispetto al mese precedente. Inoltre è stata predisposta una nuova logica di regolazione più raffinata ed efficiente (22 Marzo 2012) ed il funzionamento dell'impianto è stato intermittente per tutto il mese (acceso dalle 7 alle 17).

Tabella 3. Risultati monitoraggio 13-31 Marzo 2012

MARCH 2012:

BUILDING ENERGY REQUEST	1.290	kWh	100	%
INTEGRATION GAS BOILER	229	kWh	19	%
SOLAR FIELD	1.061	kWh	81	%

Il contributo da caldaia è stato notevolmente inferiore rispetto a quello del campo solare (Figura 6); durante il mese di Marzo il miglioramento delle condizioni meteorologiche ha portato ad un contributo da solare per il riscaldamento dell'edificio pari all'82%, contro il 18% fornito da caldaia integrativa. I precedenti discorsi sono confermati dall'aumento della temperatura media esterna.

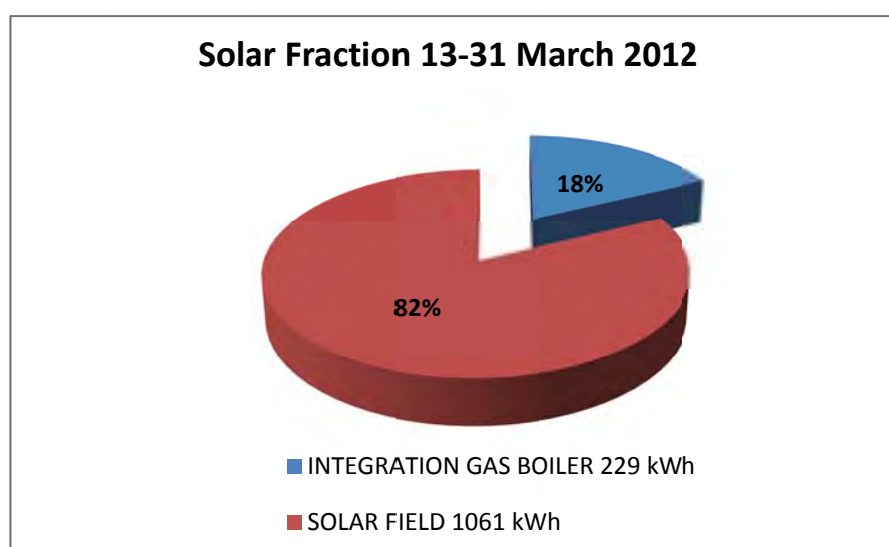


Figura 6. Frazione solare dall' 1 al 31 Marzo 2012

2.1.3 Periodo di monitoraggio 1 Aprile -15 Aprile 2012

Il monitoraggio si è concluso il 15 Aprile in corrispondenza della fine della stagione invernale per la zona climatica D, nella quale rientra l'ubicazione dell'edificio e dell'impianto. Il comportamento dell'impianto ha rispecchiato quanto verificatosi nel mese di Marzo, con temperature dell'aria esterna in linea con il periodo, anche se è stato caratterizzato da una forte presenza di nuvole e richieste termiche da parte dell'edificio sempre più basse che sono state soddisfatte per il 69% dalla fonte solare e per il 31% dalla fonte fossile attraverso la caldaia (Figura 7). I risultati sono di seguito riepilogati (Tabella 4):

Tabella 4. Risultati monitoraggio 1-15 Aprile 2012

APRIL 2012:

BUILDING ENERGY REQUEST	1.070	kWh	100	%
INTEGRATION GAS BOILER	331	kWh	31	%
SOLAR FIELD	739	kWh	69	%

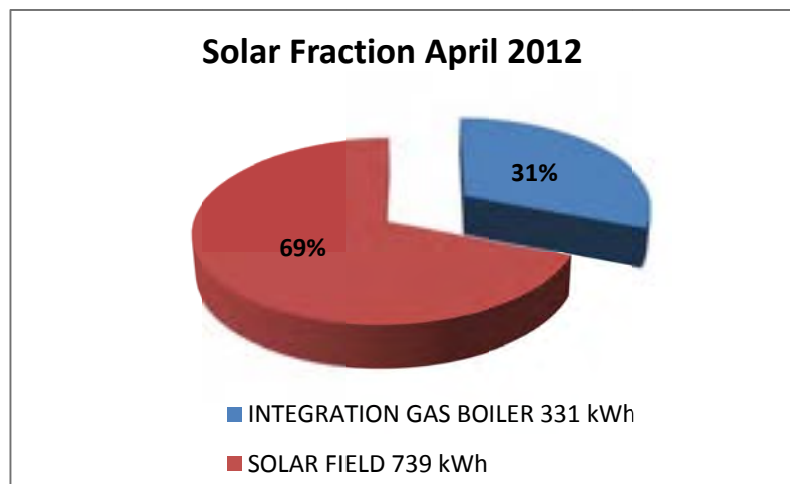


Figura 7. Frazione solare dall' 1 al 15 Aprile

Dal 13 al 31 **marzo** la radiazione solare incidente sui collettori totalizzata è stata maggiore rispetto agli altri mesi (**6.784 kWh**) a causa della maggiore temperatura media mensile dell'aria esterna (12,8°C), maggiore di quella del mese di febbraio (6°C) e molto vicina a quella di aprile. Inoltre, per l'80% circa della sua durata, il mese di marzo è stato interessato dalla presenza di cielo sereno, mentre a **febbraio** (Radiazione solare incidente sui collettori pari a **5.834 kWh**) tale percentuale diminuisce (67% circa) a causa della presenza di precipitazioni nevose (10 e 11 febbraio 2012) e piovose accompagnate da una nuvolosità sparsa alternata a schiarite. Per tenere conto dell'effetto della neve circostante ai pannelli solari, nel calcolo della radiazione solare incidente su di essi è stato necessario utilizzare il coefficiente di riflessione specifico per la neve nei giorni compresi tra il 13 febbraio e il 16 febbraio 2012 ($\rho=0,75$ contro $\rho=0,22$ utilizzato nel resto del periodo di monitoraggio). La radiazione solare incidente sui collettori totalizzata nel mese di **aprile** (**3.825 kWh**) è riferita ai soli primi quindici giorni del mese (Figura 8).

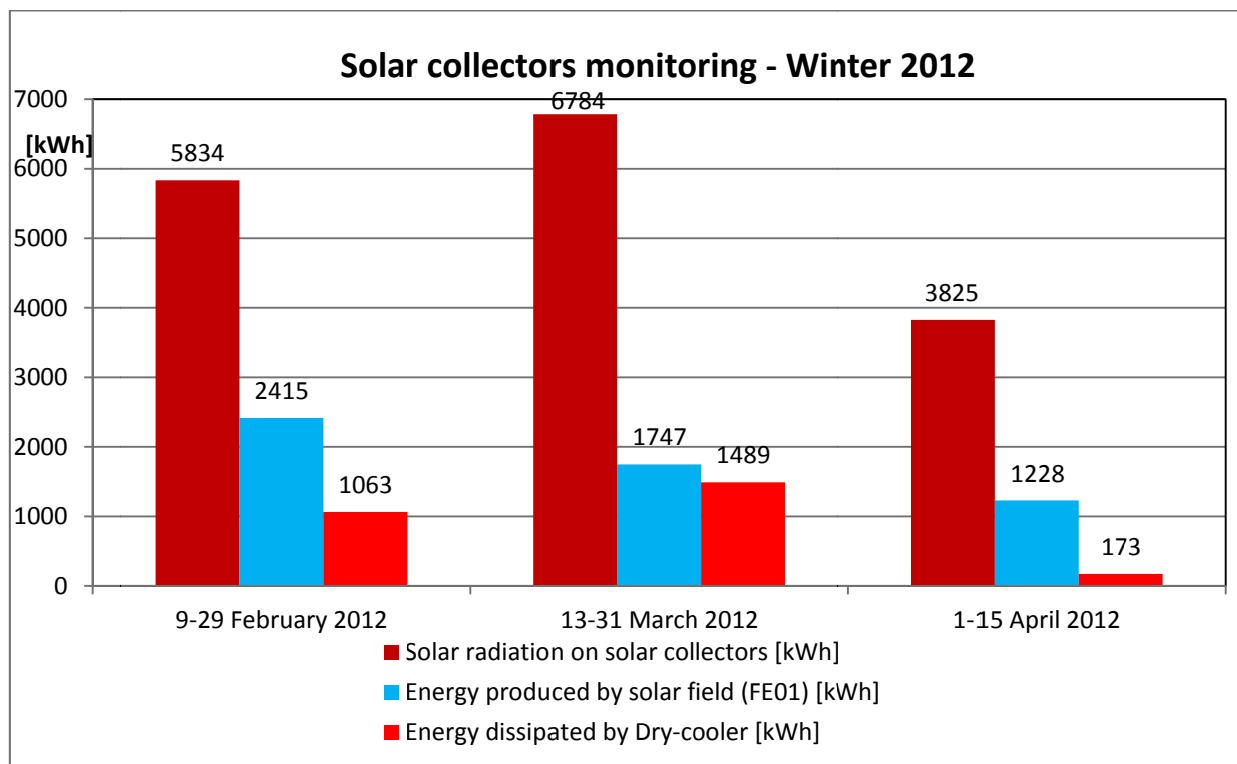


Figura 8. Radiazione solare incidente sul piano dei collettori solari termici durante il periodo di monitoraggio invernale 2012

Il serbatoio d'accumulo riceverà sempre un'energia minore di quella incidente sui collettori solari (Figura 9) a causa delle perdite ottiche e termiche sui pannelli, dell'andamento della irradianza solare (A), della dissipazione energetica realizzata dal dry cooler (B), della temperatura in uscita dal campo solare inferiore a quella dell'acqua all'interno dell'accumulo ($D2_a$), dell'efficienza di scambio termico dello scambiatore a piastre SC01 ($D2_b$). L'irradianza solare (W/m^2) incidente sui collettori è rappresentata da una curva sinusoidale quando si riferisce a condizioni di cielo sereno mentre ha un andamento irregolare nel caso di alternanza di nubi. Tale andamento si ripercuote sulla produzione di energia realizzata dal campo solare influenzando negativamente l'efficienza dei collettori. Nel mese di febbraio (9-29) l'irradianza solare globale orizzontale ha avuto un andamento sinusoidale per la maggior parte del tempo per poi peggiorare decisamente in quasi tutti i giorni del mese di aprile (1-15) in cui presenta infatti un andamento decisamente irregolare. Il mese di marzo rappresenta un caso intermedio tra quello di febbraio e di aprile. Di conseguenza l'efficienza dei collettori solari è maggiore a febbraio per poi diminuire a marzo ed ulteriormente ad aprile. Nella Figura 10 si riporta l'energia effettivamente fornita dal campo solare per il riscaldamento dell'edificio, depurata dalle perdite sopra descritte ($A+B=D1$ e $D2_a+D2_b=D2$) e considerando che l'energia termica scambiata tra il circuito primario solare e l'accumulo differisce da quella effettivamente utilizzata (kWh utili solari) per il parziale soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio (Calore accumulato ma non utilizzato: $D3$).



Figura 9. Schema produzione e fornitura energia a partire dai collettori solari durante il monitoraggio invernale 2012

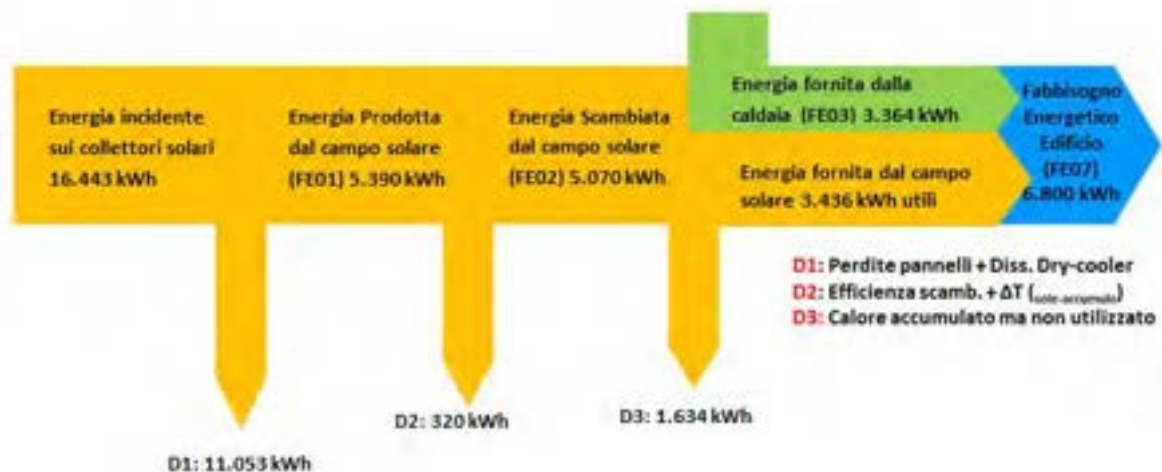


Figura 10. Diagramma del Flusso energetico di tutto il periodo di monitoraggio invernale 2012

La restante aliquota del fabbisogno energetico dell'edificio è soddisfatta ovviamente dalla caldaia integrativa che viene caratterizzata dalla misurazione della temperatura dell'acqua in ingresso ed in uscita dalla stessa e attraverso il contatermie FE03. Il fabbisogno energetico dell'edificio viene monitorato attraverso il contatermie FE07 posto sulla mandata del termodotto. I dati acquisiti dal BMS vengono rielaborati al fine di mostrare i diversi contributi energetici del campo solare (kWh utili) e della caldaia integrativa (FE03) per il soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio (FE07).

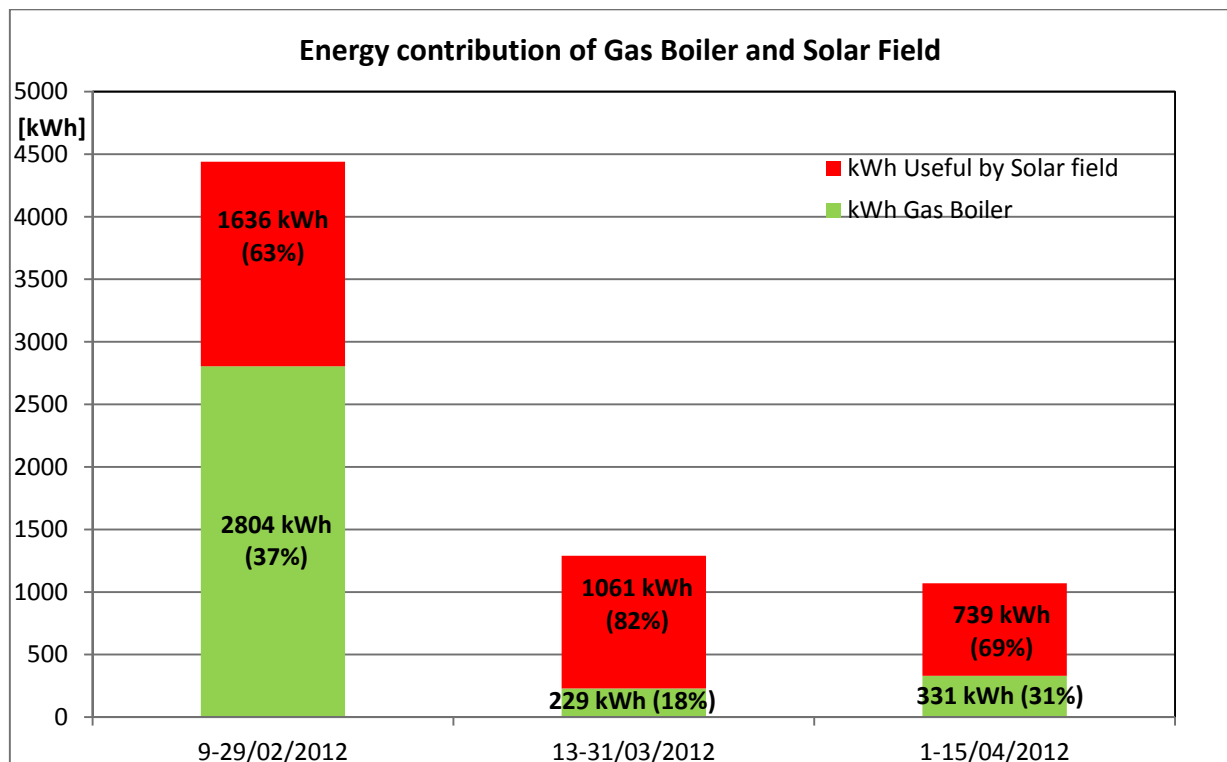


Figura 11. Contributi energetici della caldaia integrativa e del campo solare al fabbisogno energetico dell'edificio

Il fabbisogno energetico dell'edificio nel mese di febbraio è maggiore rispetto agli altri mesi in quanto esso è stato caratterizzato da condizioni meteorologiche più severe, tali da determinare una temperatura dell'aria esterna media mensile di circa 6°C, con temperature sempre inferiori a 20°C durante tutto l'arco

della giornata. I risultati ottenuti per il mese di febbraio mostrano come il funzionamento della caldaia ha contribuito con una maggiore percentuale (63%) al soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio, rispetto a quanto fornito dal campo solare (37%), sia per le avverse condizioni meteo riscontrate e sia per alcune inefficienze legate al sistema di regolazione, essendo ancora vigente una logica di regolazione antecedente a quella attualmente impostata, quest'ultima più raffinata ed efficiente. Nel mese di marzo, in seguito ad una maggior presenza di sole, all'aumento della temperatura dell'aria esterna e all'implementazione della nuova logica di regolazione (22 marzo 2012), si è verificata una minor richiesta di energia da parte dell'edificio rispetto al mese precedente, per il raggiungimento dei setpoint ambiente; l'energia è stata fornita all'edificio per l'82% dal campo solare (Figura 11).

Riepilogando il comportamento dell'impianto di solar heating durante l'intero periodo di monitoraggio, si può calcolare la frazione solare dell'energia termica necessaria per il riscaldamento dell'edificio (Figura 12):

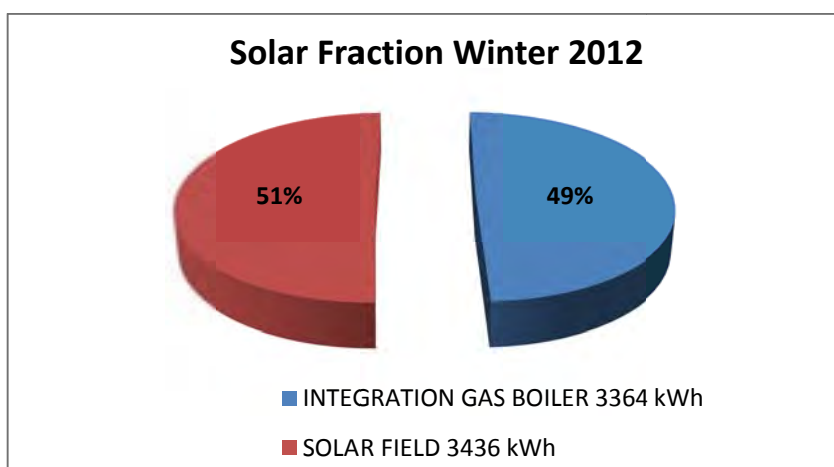


Figura 12. Frazione solare 2012 impianto di solar heating C.R. ENEA di Casaccia

L'obiettivo finale del funzionamento dell'impianto di solar heating è il raggiungimento dei valori di setpoint di temperatura da parte di ciascun ambiente dell'edificio ed il mantenimento della stessa all'interno di un range prefissato. Tali temperature vengono acquisite ogni dieci minuti dal BMS ma, a causa della grande mole di dati, vengono di seguito riportate le sole medie giornaliere (Figura 13-Tabella 5). Il primo giorno di monitoraggio è relativo al 9 febbraio 2012 mentre il cinquantacinquesimo si riferisce al 15 aprile 2012. Dal grafico si nota la presenza di un minimo in corrispondenza del 21 febbraio 2012 (13° giorno monitorato) causato da un fermo impianto, necessario per un intervento di manutenzione.

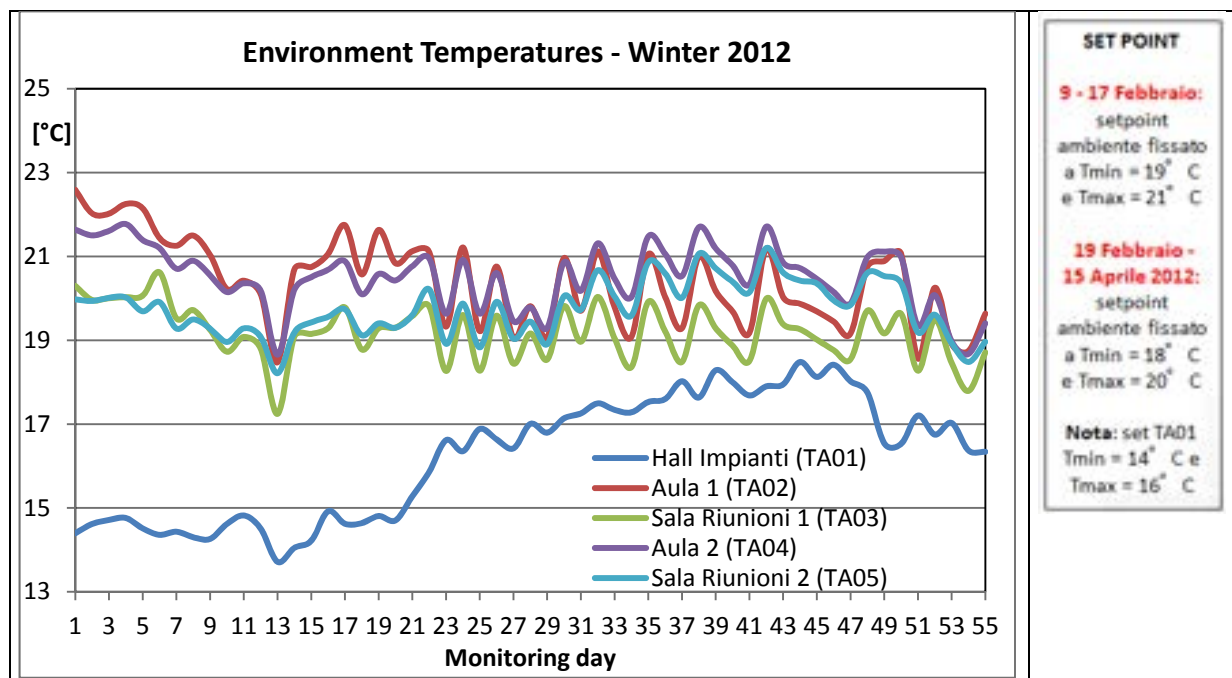


Figura 13. Temperature di ciascun ambiente costituente l'edificio (ore 6:00- ore 18:00)

Tabella 5a, 5b, 5c. Numerazione dei singoli giorni di monitoraggio

Day	Monitoring day	Day	Monitoring day	Day	Monitoring day
09/02/2012	1	13/03/2012	22	01/04/2012	41
10/02/2012	2	14/03/2012	23	02/04/2012	42
11/02/2012	3	15/03/2012	24	03/04/2012	43
12/02/2012	4	16/03/2012	25	04/04/2012	44
13/02/2012	5	17/03/2012	26	05/04/2012	45
14/02/2012	6	18/03/2012	27	06/04/2012	46
15/02/2012	7	19/03/2012	28	07/04/2012	47
16/02/2012	8	20/03/2012	29	08/04/2012	48
17/02/2012	9	21/03/2012	30	09/04/2012	49
18/02/2012	10	22/03/2012	31	10/04/2012	50
19/02/2012	11	23/03/2012	32	11/04/2012	51
20/02/2012	12	24/03/2012	33	12/04/2012	52
21/02/2012	13	25/03/2012	34	13/04/2012	53
22/02/2012	14	26/03/2012	35	14/04/2012	54
23/02/2012	15	27/03/2012	36	15/04/2012	55
24/02/2012	16	28/03/2012	37		
25/02/2012	17	29/03/2012	38		
26/02/2012	18	30/03/2012	39		
27/02/2012	19	31/03/2012	40		
28/02/2012	20				
29/02/2012	21				

E' inoltre evidente che l'andamento delle temperature ambiente dipende dai setpoint fissati lungo tutto il periodo di monitorato: durante il funzionamento di tipo continuo (24 ore, 9 febbraio-17 febbraio 2012) il setpoint ambiente era fissato a $T_{min} = 19^{\circ}C$ e $T_{max} = 21^{\circ}C$ mentre in funzionamento intermittente (ore 7:00-17:00, 19 febbraio-15 aprile 2012) è stato impostato $T_{min} = 18^{\circ}C$ e $T_{max} = 20^{\circ}C$.

2.2 *Analisi dati sperimentali del monitoraggio invernale 2013*

I risultati ottenuti durante la campagna invernale 2013 si riferiscono al periodo 8 febbraio 2013 – 15 aprile 2013. Nel mese di marzo 2013 è stata effettuata l'installazione di un serbatoio d'accumulo a cambiamento di fase (PCM, Phase Change Material) per aumentare l'aliquota di energia termica stoccata rispetto al tradizionale serbatoio d'accumulo originariamente presente. È stata condotta un'attenta analisi tecnico-economica considerando che il sistema di accumulo a cambiamento di fase può essere rappresentato da:

- a) accumulo caldo di tipo latente progettato per accumulare a $T=45\text{ °C}$ (per il riscaldamento invernale degli ambienti);
- b) accumulo caldo di tipo latente progettato per accumulare a $T=88\text{ °C}$ (per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento);
- c) accumulo freddo di tipo latente progettato per accumulare a $T=7\text{ °C}$ (dedicato alla climatizzazione estiva degli ambienti).

La soluzione che ottimizza le prestazioni energetiche ed economiche dell'impianto è rappresentata da un accumulo caldo di tipo latente progettato per accumulare energia ad una temperatura di $T=45\text{ °C}$; da tale temperatura deriva la scelta del tipo di materiale PCM da utilizzare.

Il monitoraggio invernale 2013 si riferisce ai seguenti periodi:

- 8-28 febbraio 2013;
- 13-31 marzo 2013, a causa dell'installazione del serbatoio d'accumulo a cambiamento di fase come spiegato precedentemente;
- 1-15 aprile 2013.

Come nella campagna di monitoraggio invernale dell'anno precedente, i valori della temperatura dell'aria esterna (Figura 14) vengono acquisiti dal sistema BMS ogni dieci minuti a partire dai rilevamenti effettuati da una sonda di temperatura da esterno installata in campo. Dal grafico in Figura 14 si evince l'aumento della temperatura dell'aria esterna nel mese di aprile.

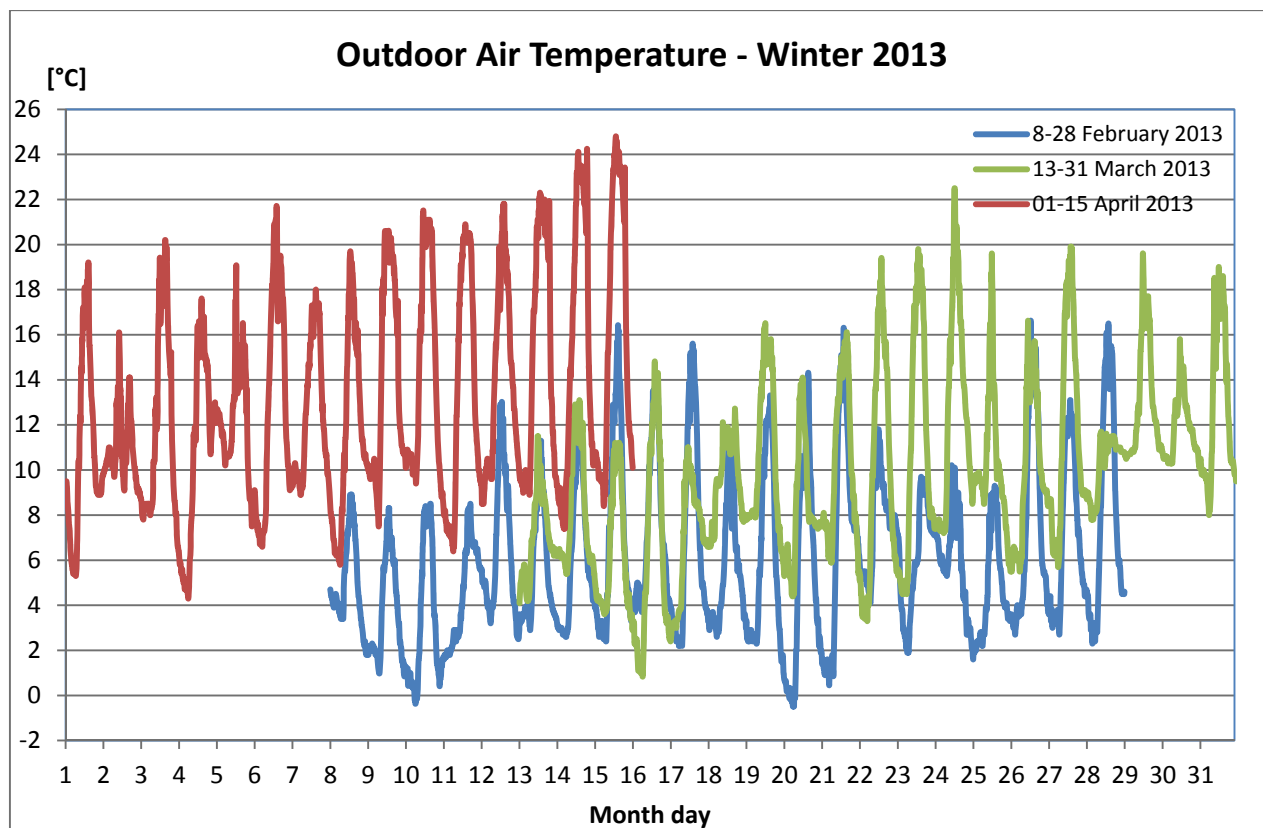


Figura 14. Temperatura giornaliera aria esterna durante l'intero periodo di monitoraggio invernale del 2013

Di seguito si riportano dettagliatamente i risultati ottenuti dalla campagna di monitoraggio invernale per ogni mese considerato.

2.2.1 Periodo di monitoraggio 8 Febbraio - 28 Febbraio 2013

Nei giorni compresi tra l'8 ed il 28 febbraio 2013, la temperatura dell'aria esterna si è mantenuta prettamente nella fascia 0°C-10°C raggiungendo valori maggiori specialmente nei giorni centrali. (Figura 15).

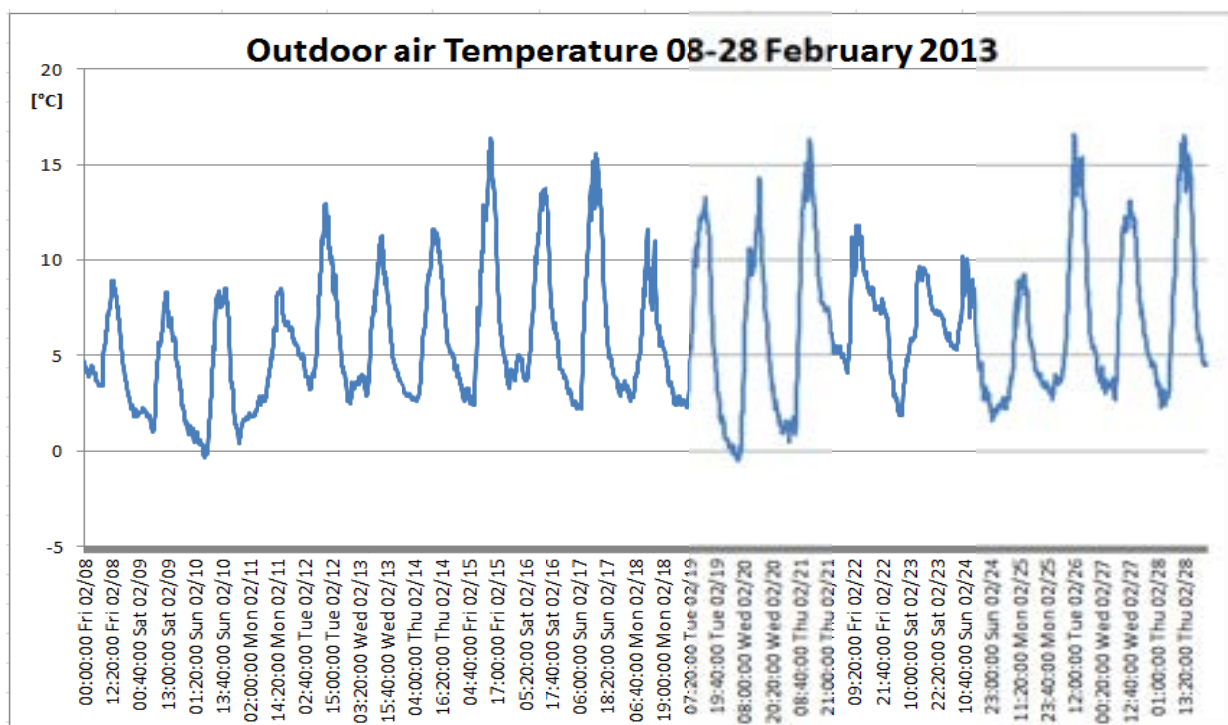
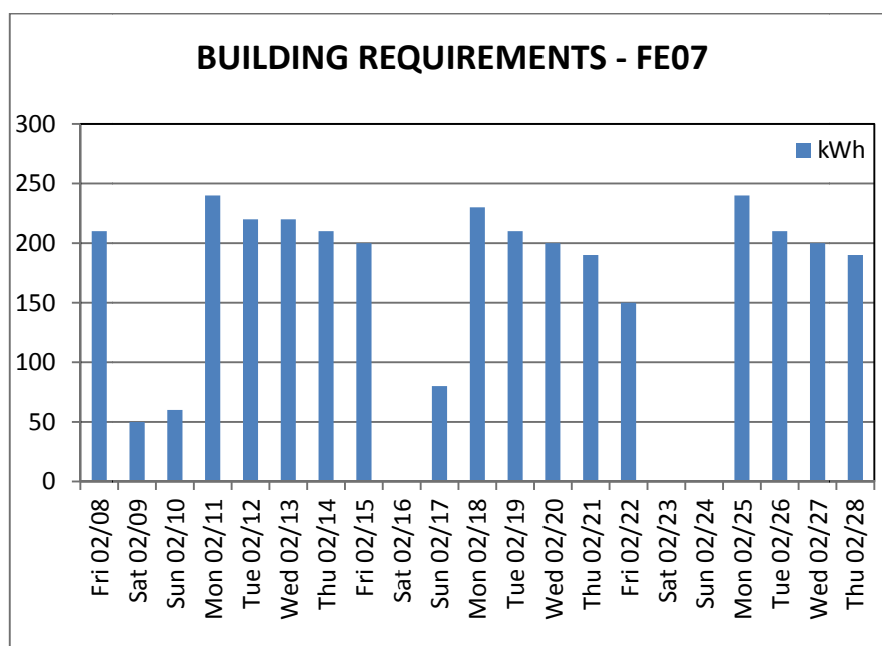


Figura 15. Andamento della temperatura esterna per il mese di Febbraio 2013

Il monitoraggio è stato condotto dall'8 al 28 Febbraio con l'impianto in modalità di funzionamento discontinuo (dalle ore 7 alle ore 17) dal lunedì al venerdì, mentre il sabato e la domenica l'impianto è spento. Di seguito si riportano i risultati relativi al fabbisogno energetico dell'edificio (Figura 16), all'energia fornita dalla caldaia integrativa (Figura 17) e all'energia termica solare stoccata nel serbatoio di accumulo classico (Figura 18) di cui viene indicata la quota parte effettivamente sfruttata dall'edificio.



DATA:	kWh
Fri 02/08	210
Sat 02/09	50
Sun 02/10	60
Mon 02/11	240
Tue 02/12	220
Wed 02/13	220
Thu 02/14	210
Fri 02/15	200
Sat 02/16	0
Sun 02/17	80
Mon 02/18	230
Tue 02/19	210
Wed 02/20	200
Thu 02/21	190
Fri 02/22	150
Sat 02/23	0
Sun 02/24	0
Mon 02/25	240
Tue 02/26	210
Wed 02/27	200
Thu 02/28	190
TOTALE 8-28/02/2013	3310

Figura 16. Fabbisogno dell'edificio (FE07) 8 - 28 Febbraio 2013

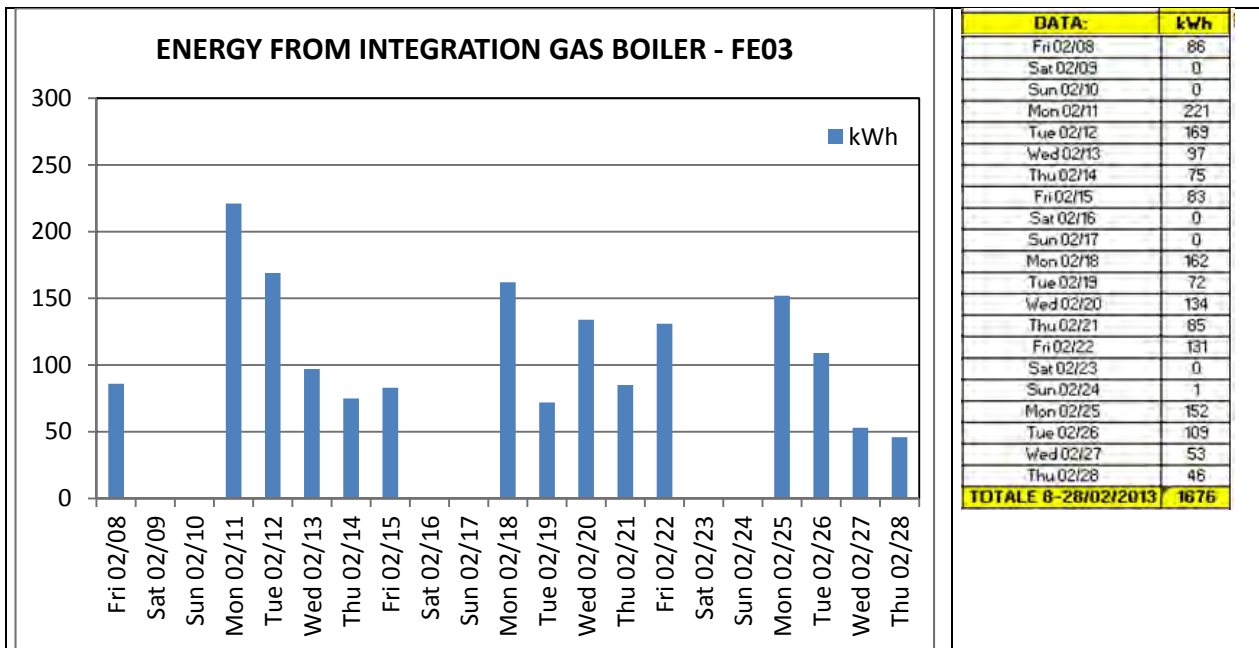


Figura 17. Energia termica fornita dalla caldaia integrativa (FE03) 8 - 28 Febbraio 2013

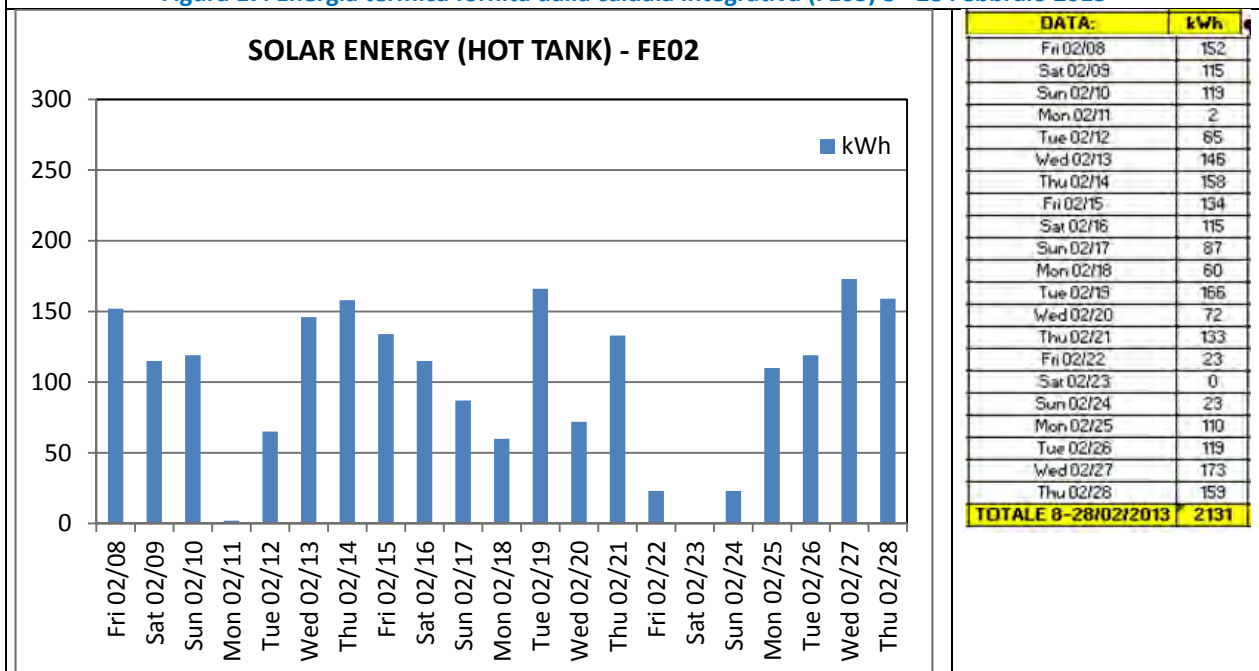


Figura 18. Energia termica fornita da campo solare stoccata nell'accumulo (FE02) 8- 28 Febbraio 2013

I risultati ottenuti per il mese di febbraio (Figura 19) mostrano come il funzionamento della caldaia ha contribuito con una percentuale leggermente maggiore (51%) al soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio, rispetto a quanto fornito dal campo solare (49%), per le basse temperature dell'aria esterna e per un valore del setpoint di 22°C della temperatura degli ambienti interni, maggiore rispetto a quello dell'anno precedente (20°C).

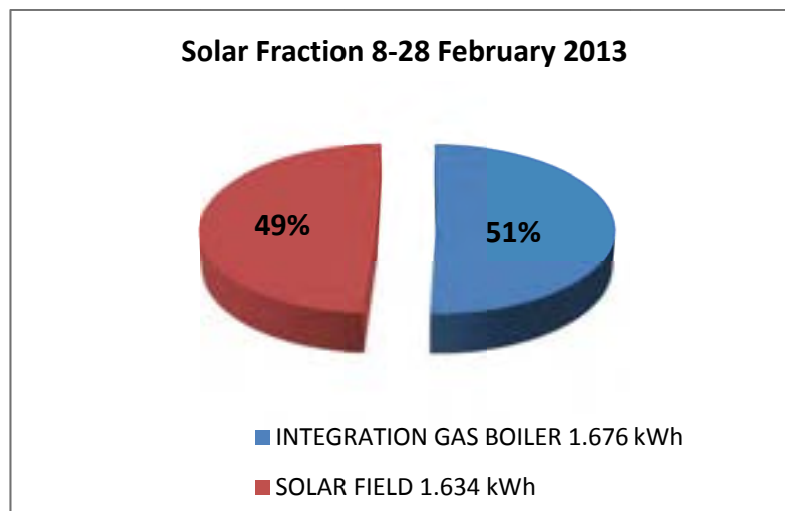


Figura 19. Frazione solare dall'8 al 28 Febbraio 2013

L'andamento delle temperature degli ambienti interni all'edificio sono indicative dell'orario e dei giorni di funzionamento dell'impianto. Il funzionamento dell'impianto è discontinuo (ore 7-ore 17) e relativo solo ai giorni lavorativi. Le curve di temperatura presentano infatti valori minimi in corrispondenza del fine settimana (Figura 20). Durante l'orario di funzionamento le temperature degli ambienti interni sono state sempre mantenute nella fascia compresa tra 18°C e 22°C ad eccezione della hall impianti che ha un setpoint inferiore e risulta ubicata nel piano semi interrato.

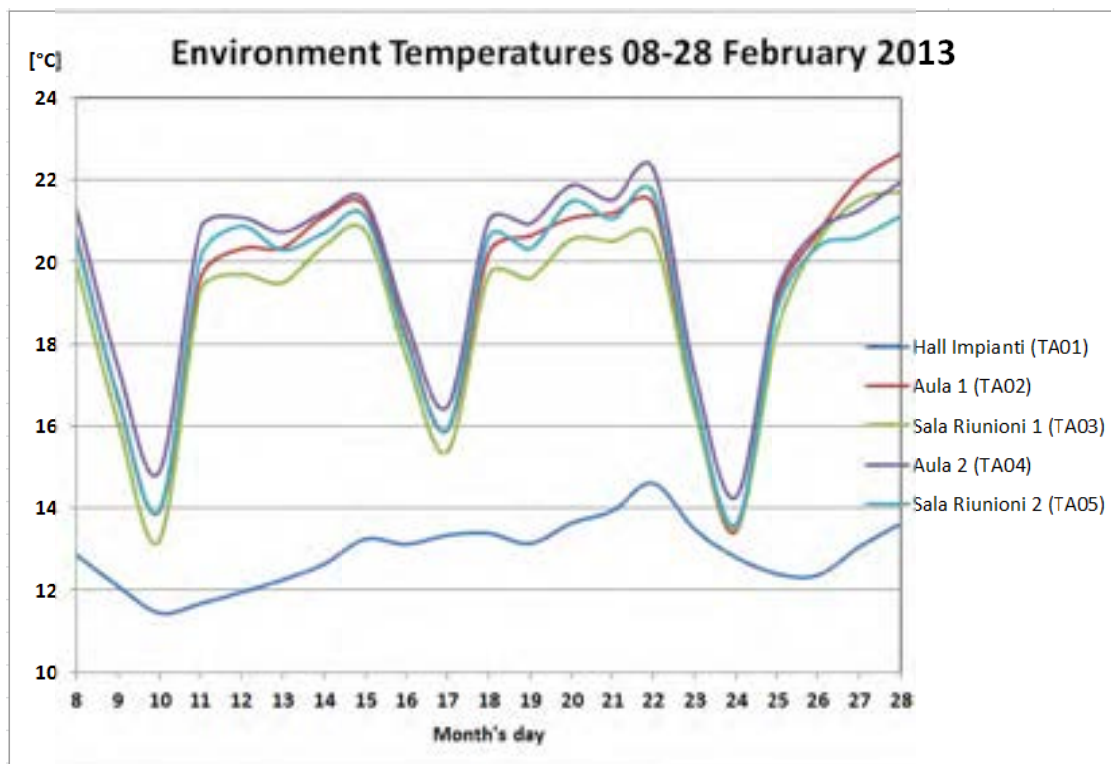


Figura 20. Andamento delle temperature degli ambienti interni all'edificio dall'8 al 28 Febbraio 2013

2.2.2 Periodo di monitoraggio 13 Marzo -31 Marzo 2013

Nel mese di Marzo (13-31 marzo) la temperatura dell'aria esterna non ha mai raggiunto valori al di sotto dello zero attestandosi ad un valor medio di circa 10°C (Figura 21). Ad eccezione di due giorni, il fabbisogno

energetico dell'edificio è stato sempre superiore al valore di 100 kWh giornalieri (Figura 22) per mantenere le condizioni di comfort all'interno. Rispetto al mese precedente, è stato predisposto un nuovo profilo di funzionamento per l'impianto cioè funzionamento discontinuo (impianto in ON dalle ore 7 alle ore 17) ma per tutti i giorni della settimana. Tale variazione del profilo di funzionamento dell'impianto è stata effettuata per eseguire una comparazione più attendibile tra l'inverno 2012 con serbatoio d'accumulo classico e l'inverno 2013 con accumulo PCM.

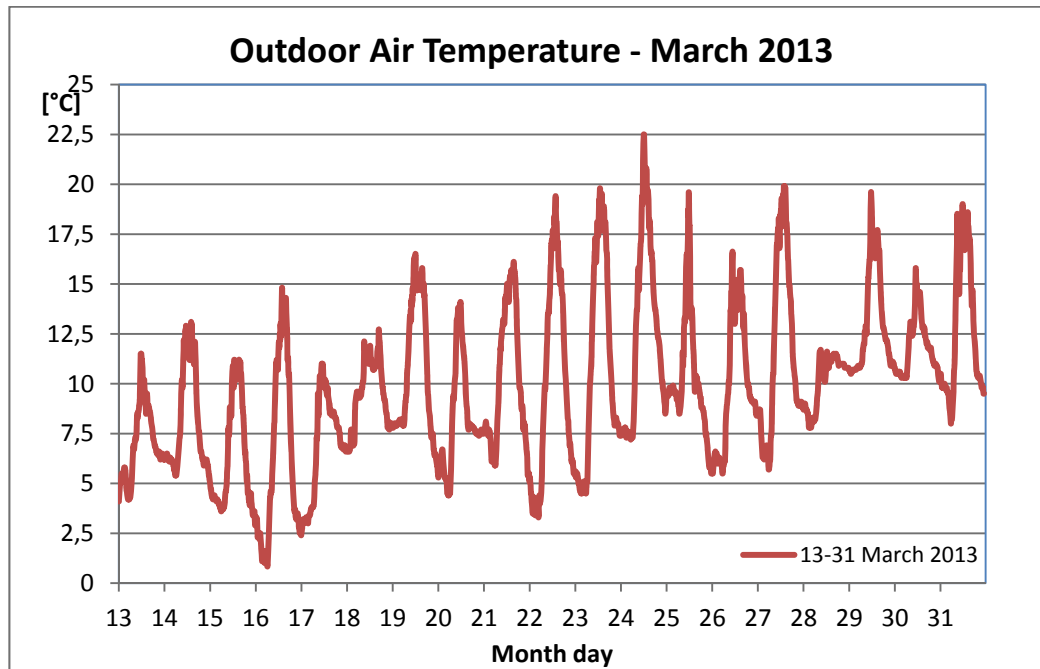


Figura 21. Andamento della temperatura esterna per il mese di Marzo 2013

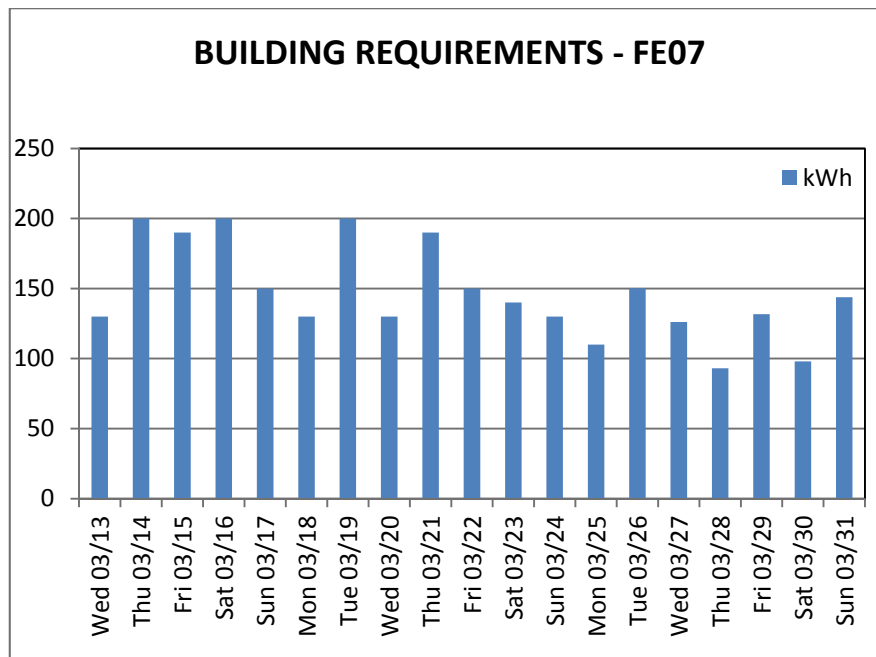


Figura 22. Fabbisogno dell'edificio (FE07) dal 13 al 31 Marzo 2013

DATA:	FE07 kWh
Wed 03/13	130
Thu 03/14	200
Fri 03/15	190
Sat 03/16	200
Sun 03/17	150
Mon 03/18	130
Tue 03/19	200
Wed 03/20	130
Thu 03/21	190
Fri 03/22	150
Sat 03/23	140
Sun 03/24	130
Mon 03/25	110
Tue 03/26	150
Wed 03/27	126
Thu 03/28	93
Fri 03/29	132
Sat 03/30	98
Sun 03/31	144
TOTALE 13-31/03/2013	2793

Il contributo da caldaia (53%) è stato superiore rispetto a quello del campo solare (Figura 25) in quanto alcuni giorni del periodo monitorato sono stati caratterizzati da una scarsa radiazione solare a causa delle avverse condizioni meteo.

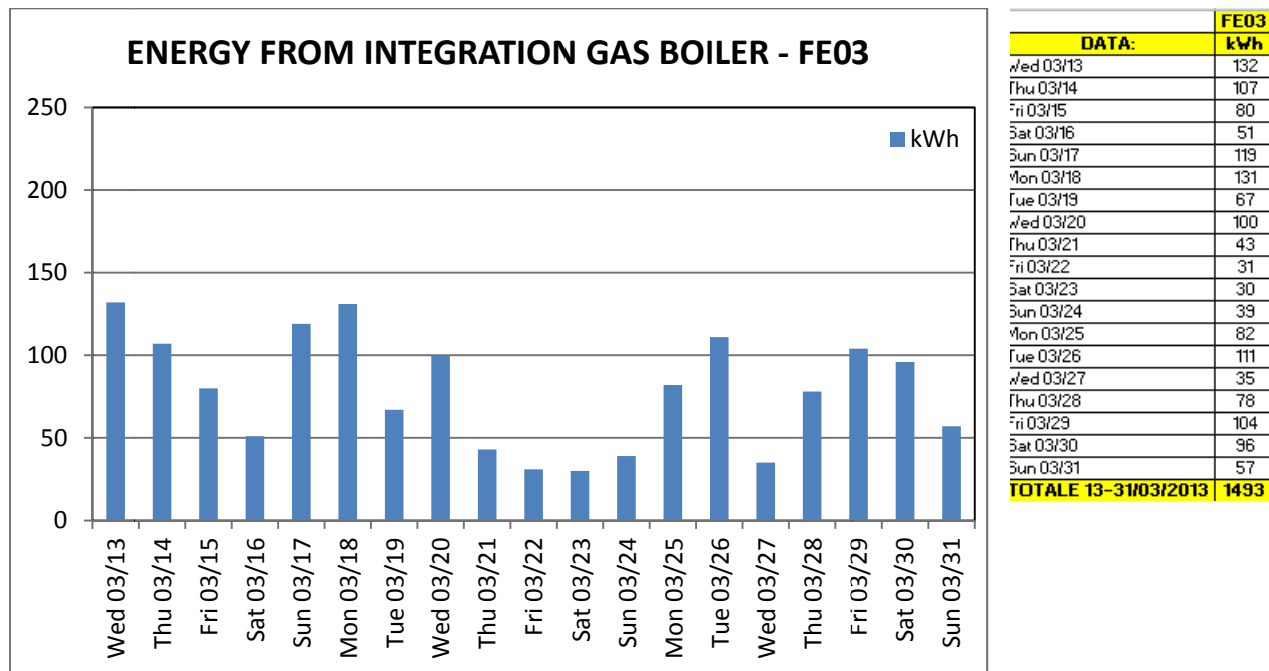


Figura 23. Energia termica fornita dalla caldaia integrativa (FE03) dal 13 al 31 Marzo 2013

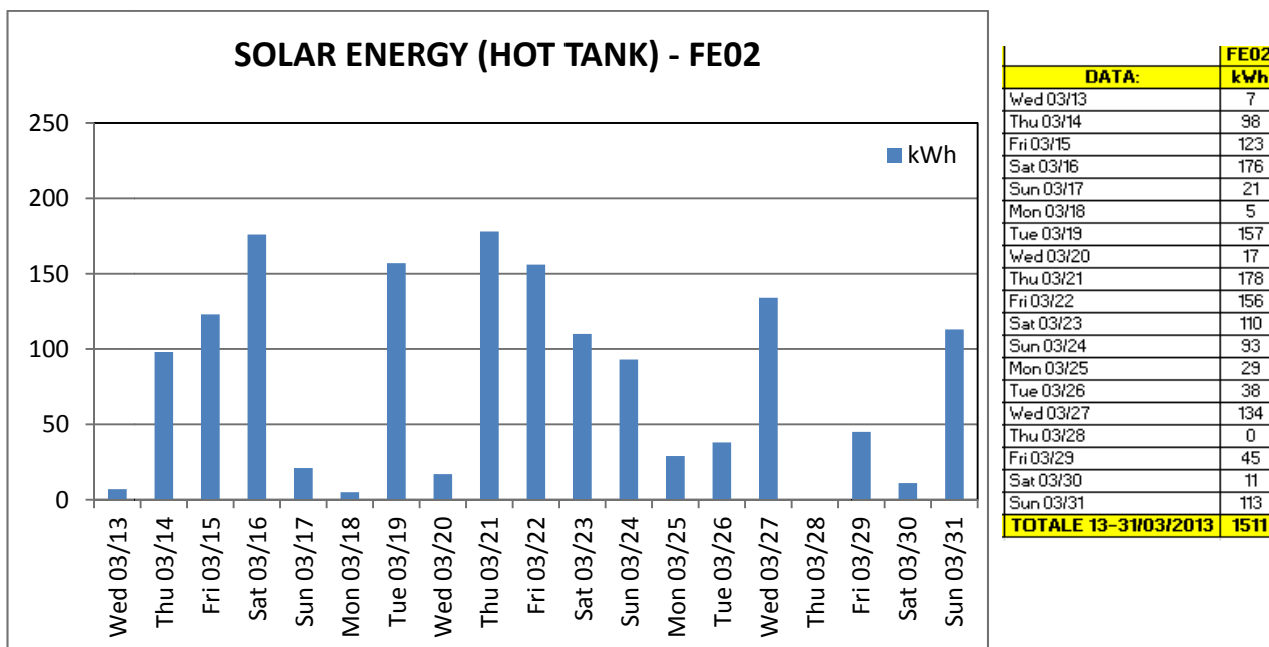


Figura 24. Energia termica fornita da campo solare stoccata nell'accumulo (FE02) dal 13 al 31 Marzo 2013

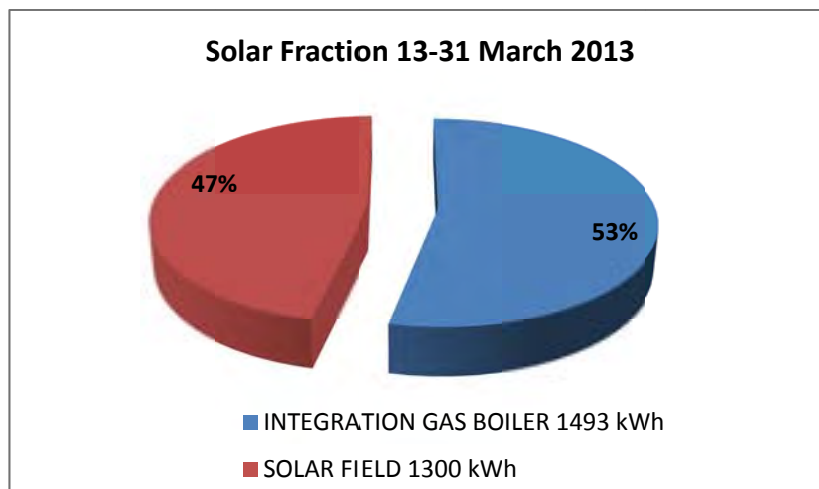


Figura 25. Frazione solare dal 12 al 31 Marzo 2013

La frazione solare del 47% per il periodo 13-31 marzo 2013 è stata ottenuta garantendo sempre le condizioni di comfort termico all'interno degli ambienti climatizzati. Dalla figura seguente si nota come la temperatura di ciascun ambiente, ad eccezione della hall impianti, si è sempre mantenuta nella banda compresa tra 20°C e 24°C, ciò è rappresentativo della bontà della logica di regolazione implementata.

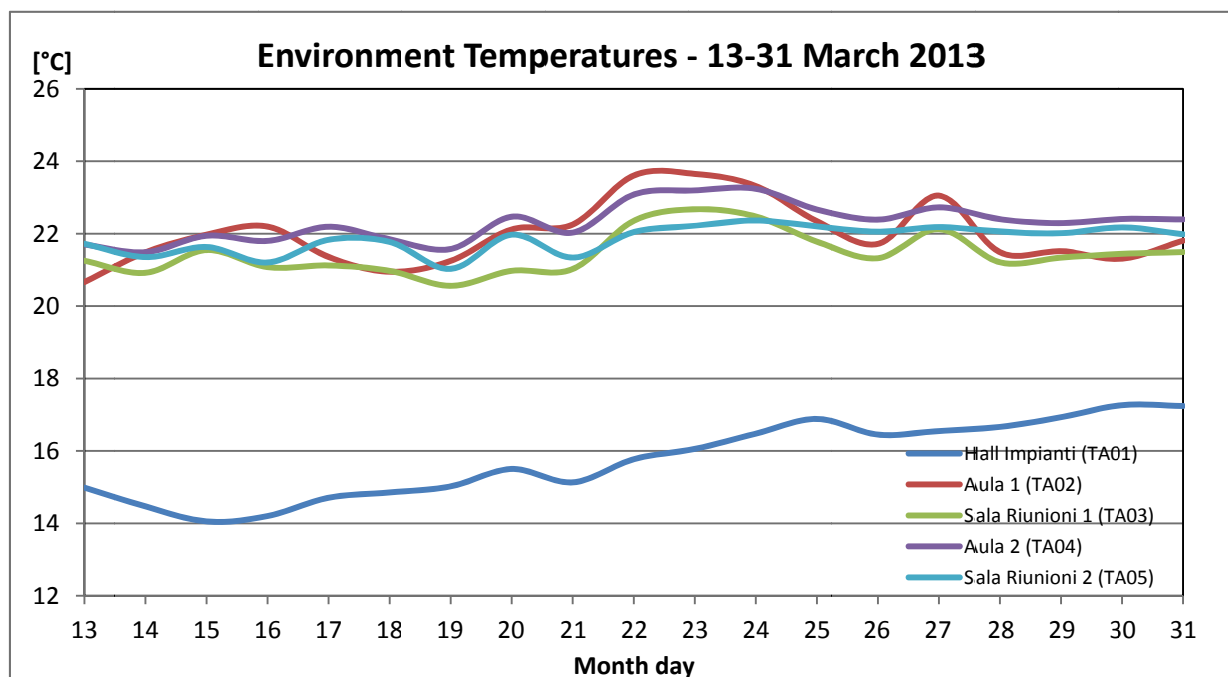


Figura 26. Andamento delle temperature degli ambienti interni all'edificio nel periodo 13-31 marzo 2013

2.2.3 Periodo di monitoraggio 1 Aprile -15 Aprile 2013

Il monitoraggio si è concluso il 15 Aprile in corrispondenza della fine della stagione invernale per la zona climatica D, nella quale rientra l'ubicazione dell'edificio e dell'impianto. Rispetto ai mesi precedenti di febbraio e di marzo, il mese di aprile presenta condizioni climatiche più favorevoli con un valore medio di temperatura dell'aria esterna (13°C) maggiore (Figura 27) ed un minor fabbisogno energetico dell'edificio (Figura 28).

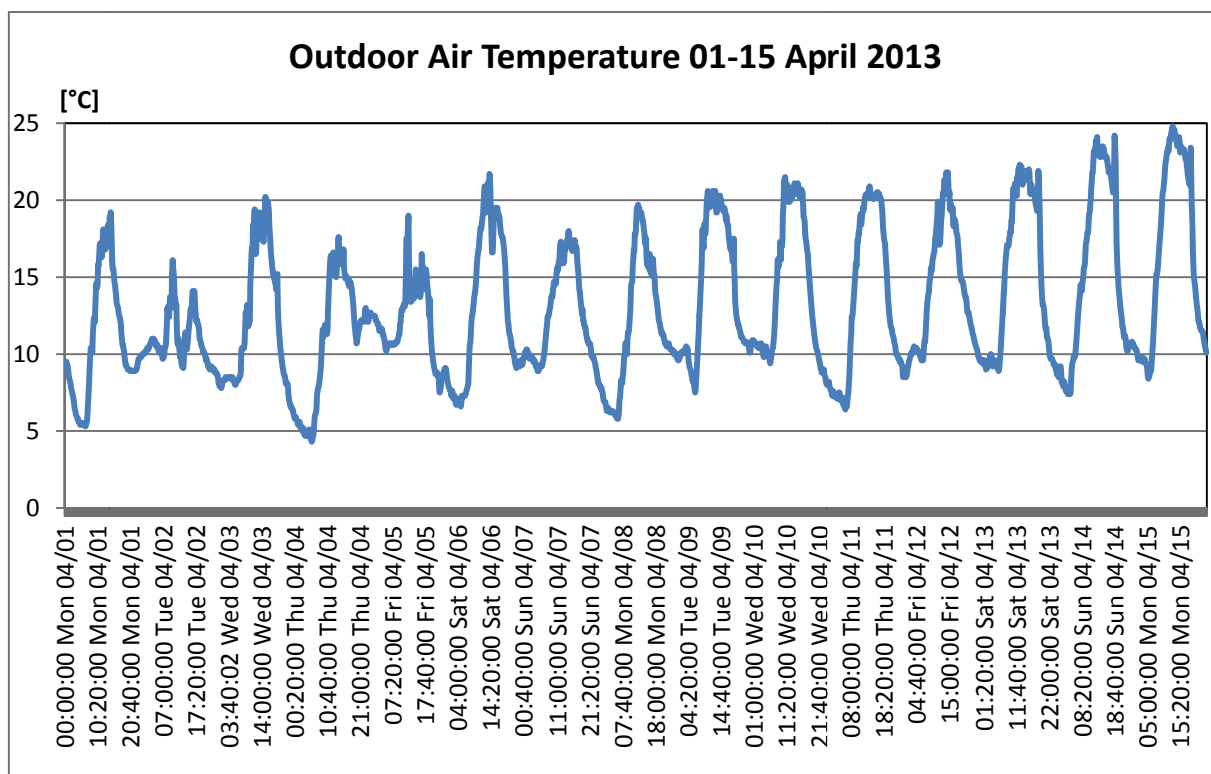


Figura 27. Andamento della temperatura esterna per il mese di Aprile 2013

Il fabbisogno energetico dell'edificio è in tutti i giorni inferiore al valore di 120 kWh. Tutto ciò determina per il mese di aprile una frazione solare maggiore rispetto ai precedenti due mesi. Il fabbisogno energetico dell'edificio è stato quindi soddisfatto per il 68% dal campo solare e per il restante 32% dalla caldaia integrativa (Figure 31).

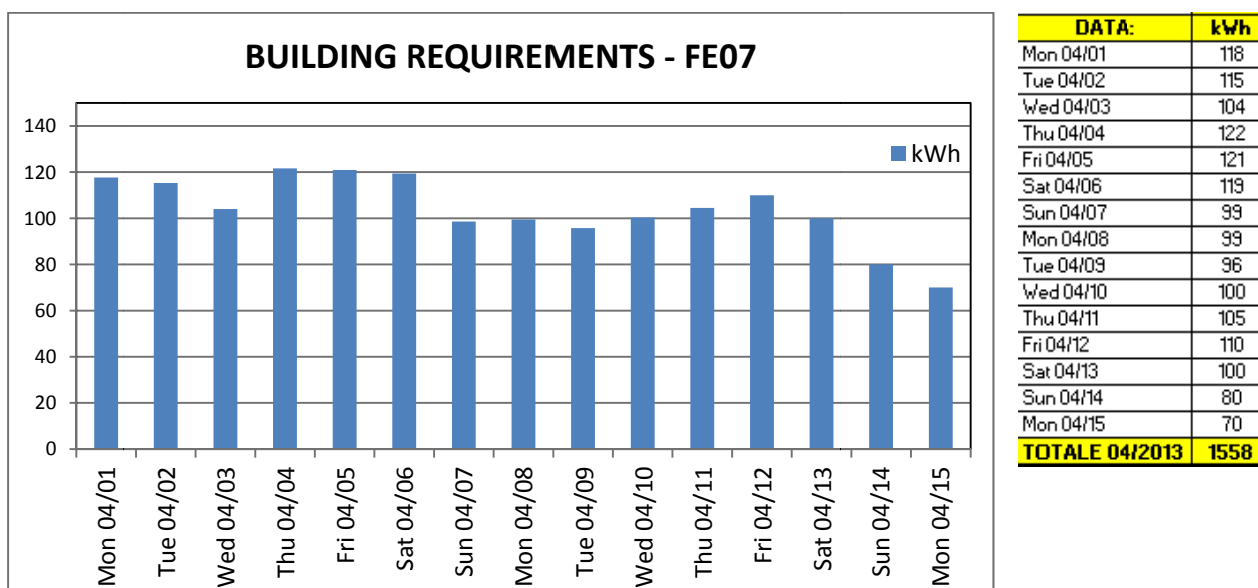


Figura 28. Fabbisogno dell'edificio (FE07) dall' 1 al 15 Aprile 2013

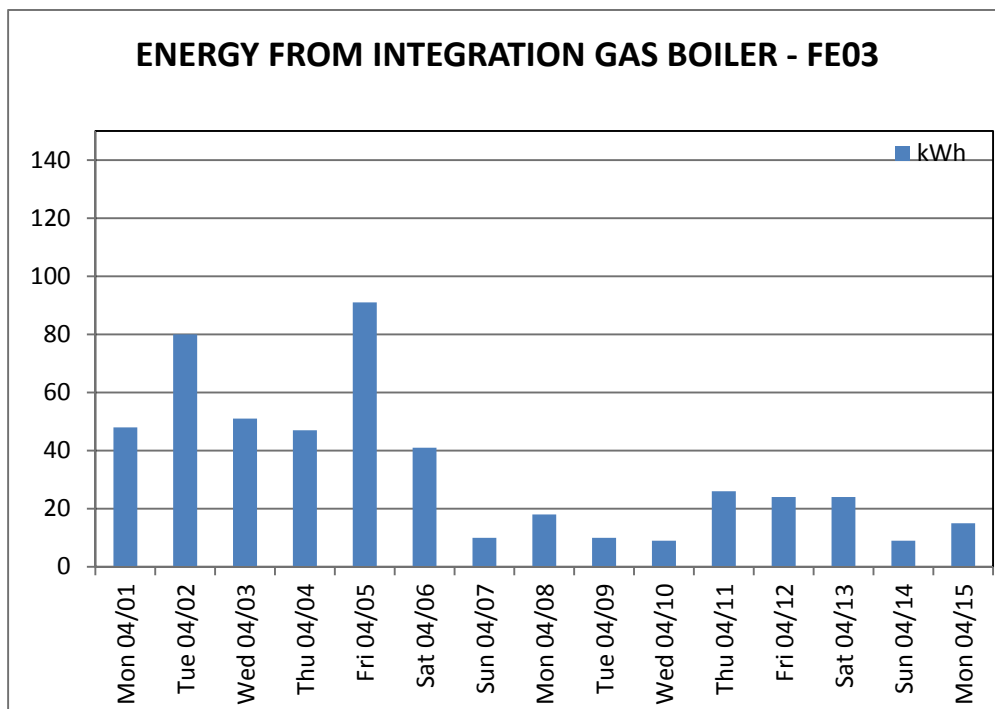


Figura 29. Energia termica fornita dalla caldaia integrativa (FE03) dall' 1 al 15 Aprile 2013

DATA:	kWh
Mon 04/01	48
Tue 04/02	80
Wed 04/03	51
Thu 04/04	47
Fri 04/05	91
Sat 04/06	41
Sun 04/07	10
Mon 04/08	18
Tue 04/09	10
Wed 04/10	9
Thu 04/11	26
Fri 04/12	24
Sat 04/13	24
Sun 04/14	9
Mon 04/15	15
TOTALE 04/2013	503

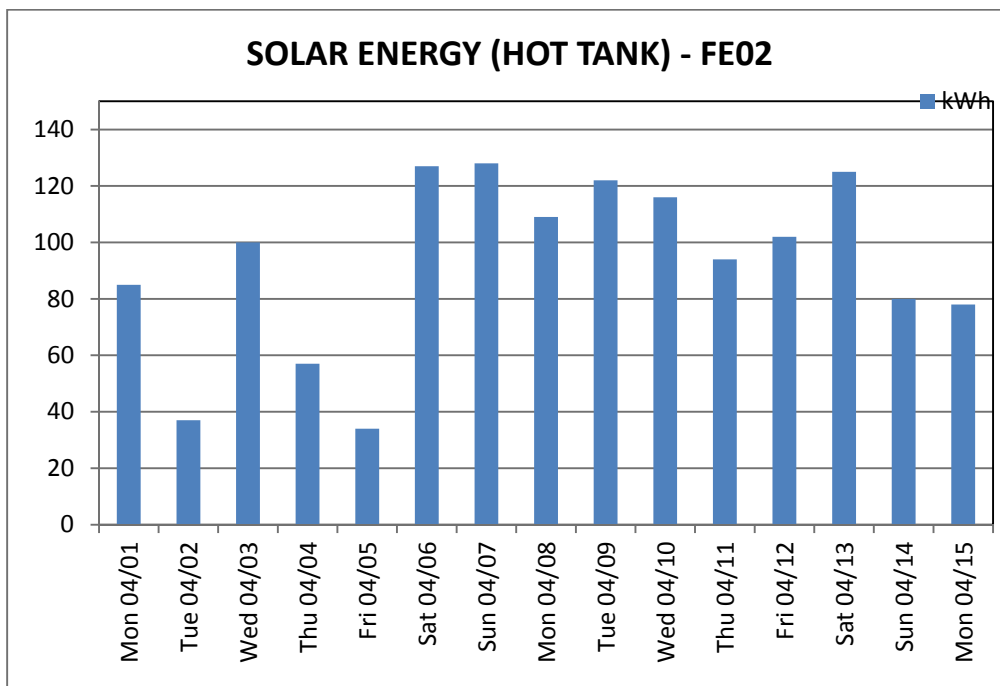


Figura 30. Energia termica fornita da campo solare stoccata nell'accumulo (FE02) dall' 1 al 15 Aprile 2013

DATA:	kWh
Mon 04/01	85
Tue 04/02	37
Wed 04/03	100
Thu 04/04	57
Fri 04/05	34
Sat 04/06	127
Sun 04/07	128
Mon 04/08	109
Tue 04/09	122
Wed 04/10	116
Thu 04/11	94
Fri 04/12	102
Sat 04/13	125
Sun 04/14	80
Mon 04/15	78
TOTALE 04/2013	1394

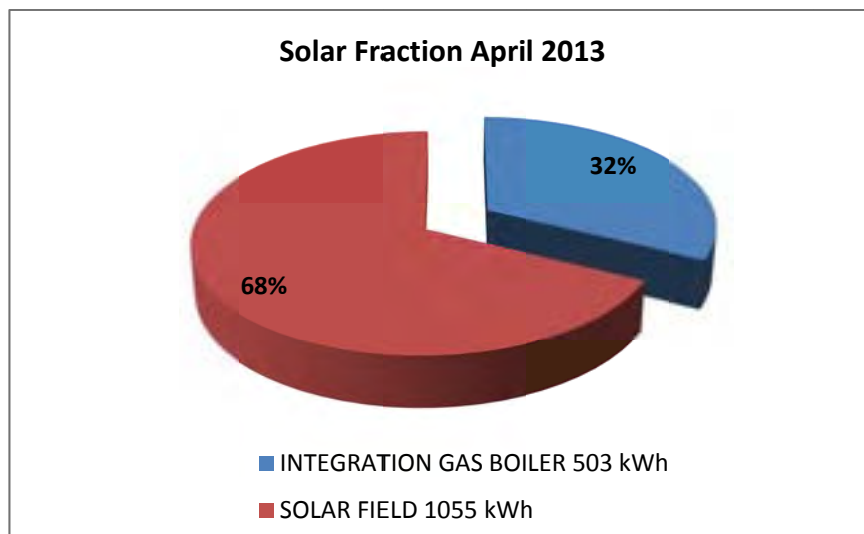


Figura 31. Frazione solare dall' 1 al 15 Aprile 2013

Dall'andamento delle temperature degli ambienti interni all'edificio si evince che come per marzo anche per il mese di aprile l'impianto è stato fatto funzionare oltre che nei giorni lavorativi anche nei giorni di sabato e domenica. L'orario di funzionamento è rimasto invariato rispetto a mese di marzo (funzionamento discontinuo ore 7 ore 17). La figura 32 sottostante mostra come le temperature degli ambienti sono state sempre mantenute all'interno di una banda prefissata indice dell'ottenimento delle condizioni di comfort termico interno.

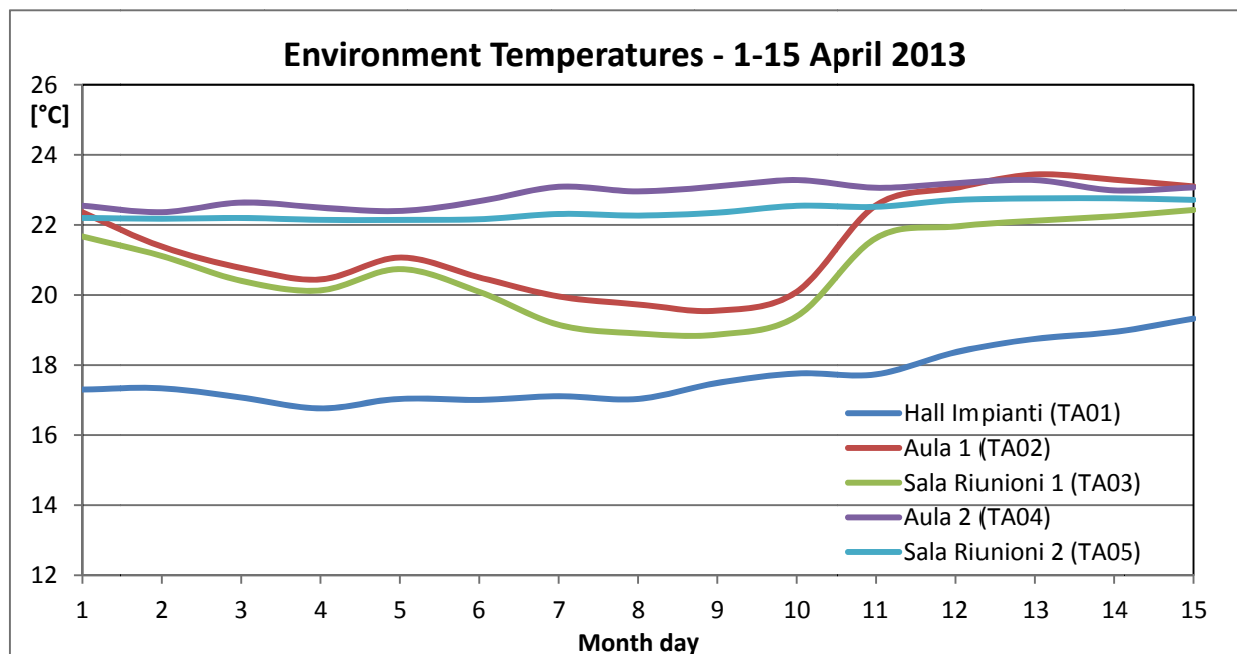


Figura 32. Andamento delle temperature degli ambienti interni all'edificio nel periodo 1-15 Aprile 2013

Una volta effettuata l'analisi del comportamento dell'impianto nei singoli mesi monitorati viene di seguito riassunta l'attività di monitoraggio relativo all'inverno 2013. La temperatura media mensile dell'aria esterna presenta un valore crescente dal mese di febbraio 2013 al mese di aprile 2013. Per effettuare una comparazione corretta è necessario rapportare ciascuna grandezza al numero dei giorni di ciascun mese. Il

Il mese di aprile è caratterizzato da una radiazione solare media giornaliera (328 kWh/giorno) maggiore rispetto a quella di febbraio (263 kWh/giorno) e di marzo; questo ultimo presenta infatti il valore di radiazione solare media giornaliera più basso (223 kWh/giorno). Un andamento irregolare della radiazione solare si ripercuote sulla produzione di energia realizzata dal campo solare influenzando negativamente l'efficienza dei collettori. Il mese di aprile 2013 presenta una maggiore quantità di energia dissipata attraverso il dry cooler in quanto tale mese è caratterizzato da temperature dell'aria esterna e radiazione solare incidente sui collettori maggiori rispetto a febbraio e a marzo e presenta quindi una minore richiesta energetica da parte dell'edificio (FE07). La frazione solare nel mese di aprile è quindi maggiore rispetto ai mesi precedenti (Figura 33).

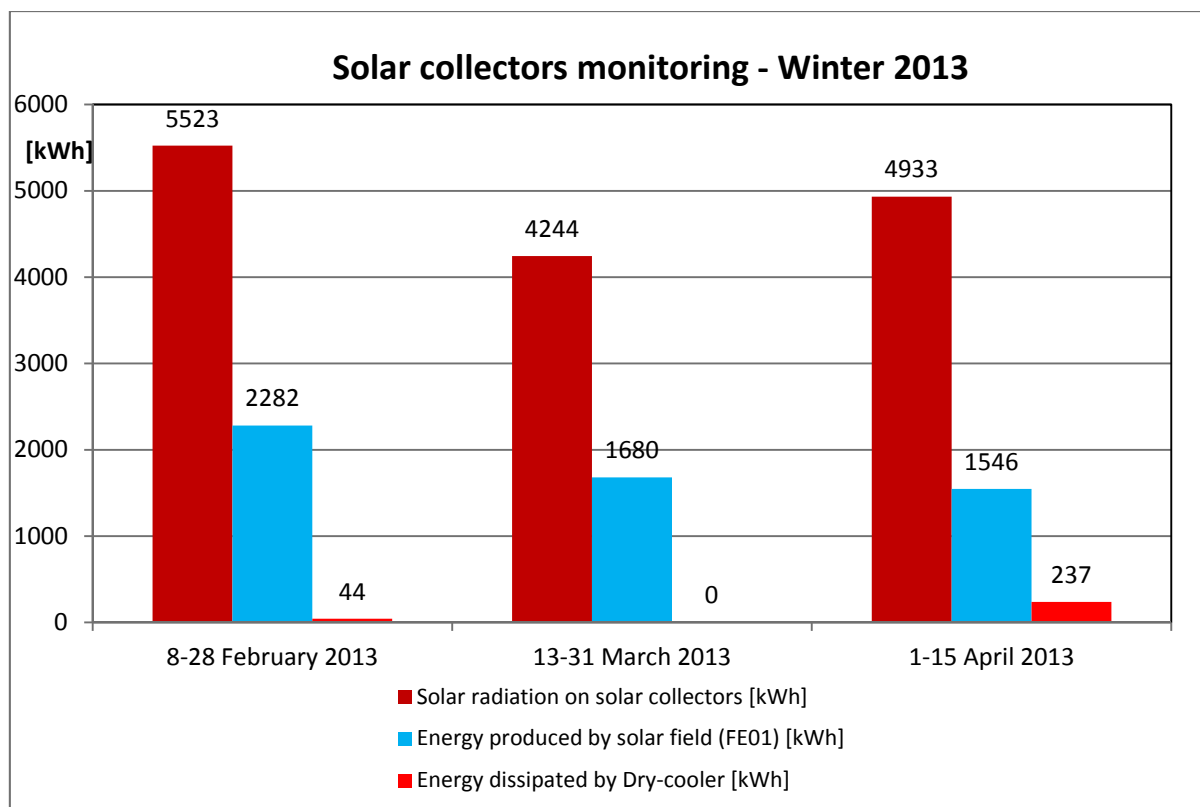


Figura 33. Radiazione solare incidente sul piano dei collettori solari termici durante il periodo di monitoraggio

L'andamento del flusso energetico e delle rispettive perdite energetiche a partire dalla radiazione solare incidente sui collettori solari fino al soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio è riportato in Figura 34-35.



Figura 34. Schema produzione e fornitura energia a partire dai collettori solari durante il monitoraggio invernale 2013

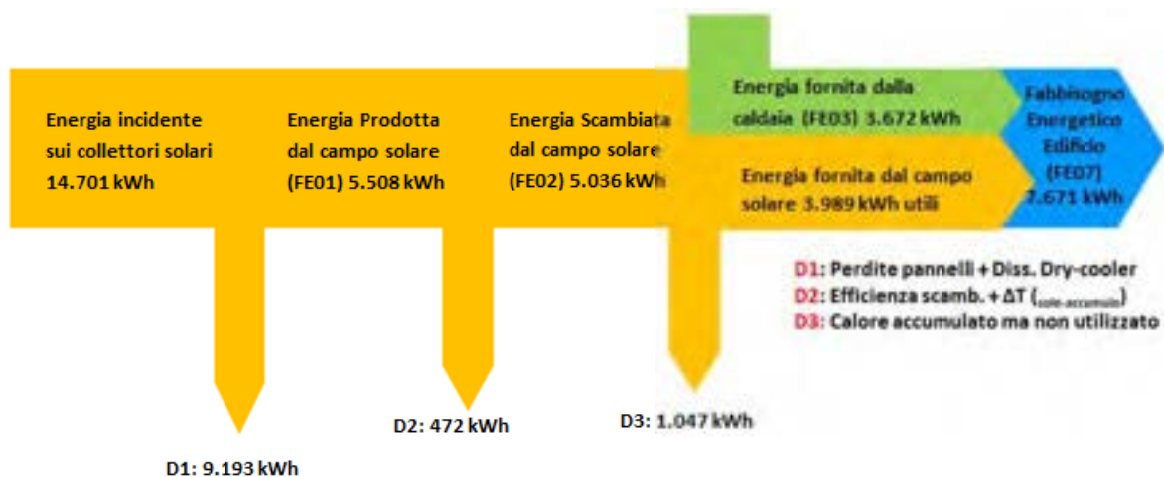


Figura 35. Diagramma del Flusso energetico di tutto il periodo di monitoraggio invernale 2013

La restante aliquota del fabbisogno energetico dell'edificio è soddisfatta ovviamente dalla caldaia integrativa che viene caratterizzata dalla misurazione della temperatura dell'acqua in ingresso ed in uscita dalla stessa e attraverso il contatermie FE03. Il fabbisogno energetico dell'edificio viene monitorato attraverso il contatermie FE07 posto sulla mandata del termodotto. In Figura 36 viene rappresentato il contributo della caldaia integrativa e del campo solare al soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio per ciascun mese monitorato.

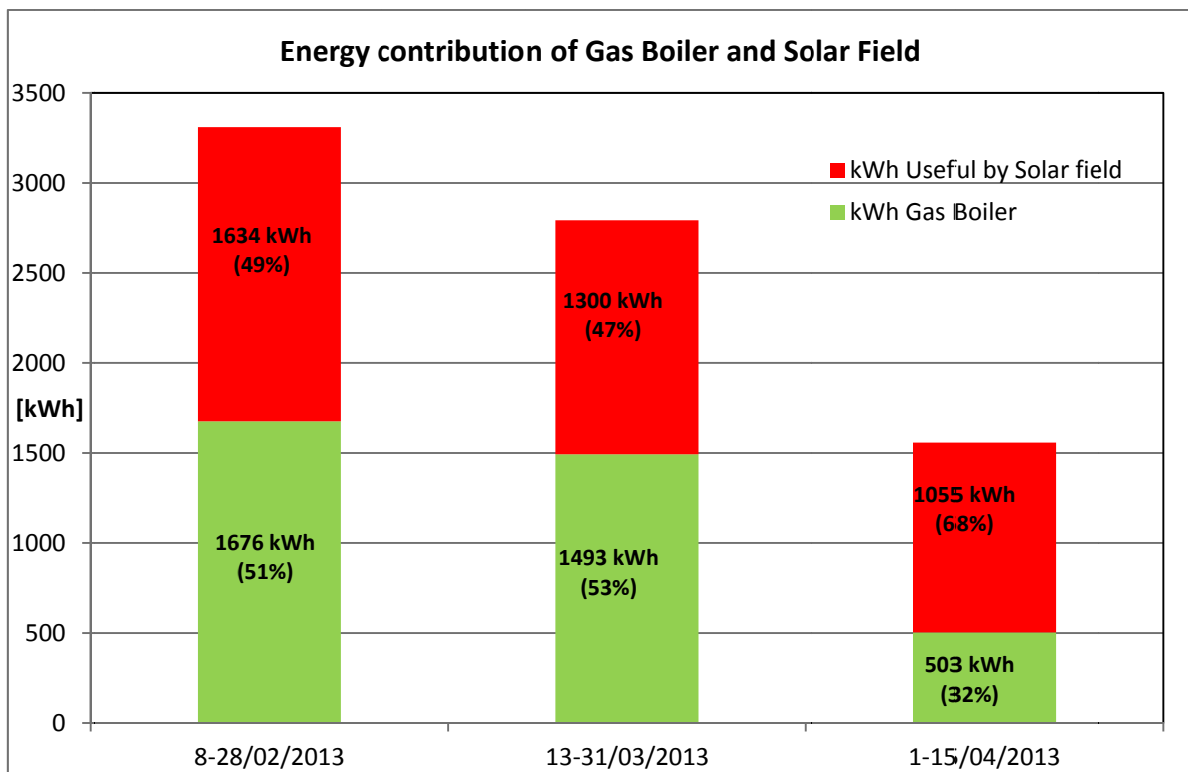


Figura 36. Contributi energetici della caldaia integrativa e del campo solare al fabbisogno energetico dell'edificio relativi all'inverno 2013

Il fabbisogno energetico dell'edificio nel mese di febbraio è maggiore rispetto agli altri mesi in quanto esso è stato caratterizzato, oltre che da un numero maggiore di giorni monitorati da condizioni meteorologiche più rigide, tali da determinare una temperatura dell'aria esterna media mensile di circa 6°C, con temperature sempre inferiori a 20°C. Nel mese di marzo, in seguito all'aumento della temperatura dell'aria esterna si è verificata una minor richiesta di energia da parte dell'edificio rispetto al mese precedente ma la frazione solare è diminuita a causa di una quantità minore di radiazione solare incidente sui collettori.

Riepilogando il comportamento dell'impianto di solar heating durante l'intero periodo di monitoraggio invernale 2013, si può calcolare la frazione solare dell'energia termica necessaria per il riscaldamento dell'edificio (Figura 37):

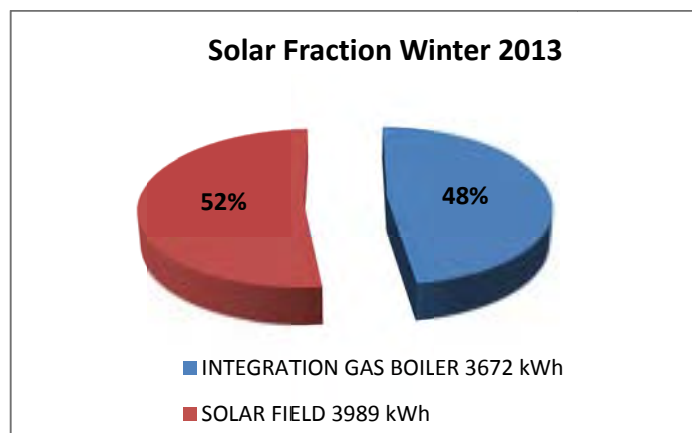


Figura 37. Frazione solare impianto di solar heating C.R. ENEA di Casaccia nell'inverno 2013

L'obiettivo finale del funzionamento dell'impianto di solar heating è il raggiungimento dei valori di setpoint di temperatura da parte di ciascun ambiente dell'edificio ed il mantenimento della stessa all'interno di un range prefissato. Tali temperature vengono acquisite ogni dieci minuti dal BMS ma, a causa della grande mole di dati, vengono di seguito riportate le sole medie giornaliere (Figura 38). Dal grafico si nota la presenza di punti di minimo in corrispondenza del mese di febbraio causato da un profilo di funzionamento in cui il sabato e la domenica l'impianto non viene fatto funzionare.

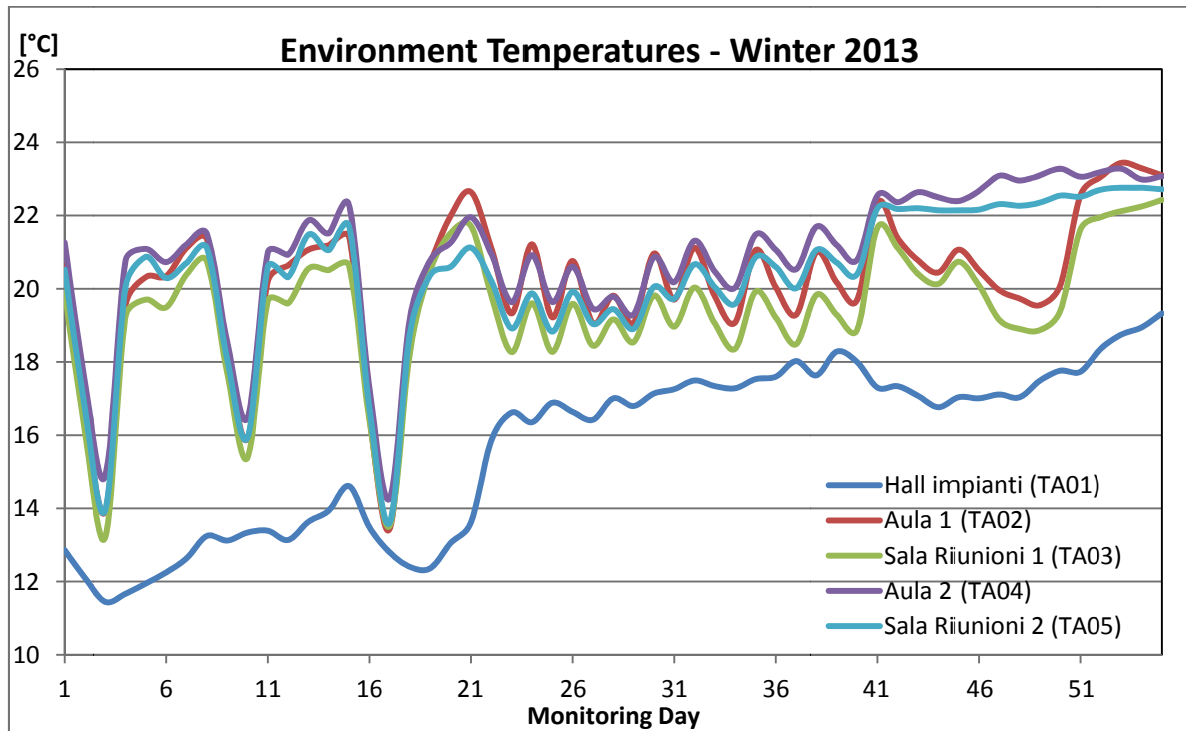


Figura 38. Temperature di ciascun ambiente costituente l'edificio (ore 6:00- ore 18:00)

È inoltre evidente che l'andamento delle temperature ambiente dipende dai setpoint fissati diversi per la hall impianti e gli altri ambienti. Per una miglior comprensione del grafico rappresentativo delle temperature ambiente è stata riportata l'enumerazione dei singoli giorni di monitoraggio in tabella 6.

Tabella 6a, 6b, 6c. Enumerazione dei giorni di monitoraggio

Month day	Monitoring day
08/02/2013	1
09/02/2013	2
10/02/2013	3
11/02/2013	4
12/02/2013	5
13/02/2013	6
14/02/2013	7
15/02/2013	8
16/02/2013	9
17/02/2013	10
18/02/2013	11
19/02/2013	12
20/02/2013	13
21/02/2013	14
22/02/2013	15
23/02/2013	16
24/02/2013	17
25/02/2013	18
26/02/2013	19
27/02/2013	20
28/02/2013	21

Month day	Monitoring day
13/03/2013	22
14/03/2013	23
15/03/2013	24
16/03/2013	25
17/03/2013	26
18/03/2013	27
19/03/2013	28
20/03/2013	29
21/03/2013	30
22/03/2013	31
23/03/2013	32
24/03/2013	33
25/03/2013	34
26/03/2013	35
27/03/2013	36
28/03/2013	37
29/03/2013	38
30/03/2013	39
31/03/2013	40

Month day	Monitoring day
01/04/2013	41
02/04/2013	42
03/04/2013	43
04/04/2013	44
05/04/2013	45
06/04/2013	46
07/04/2013	47
08/04/2013	48
09/04/2013	49
10/04/2013	50
11/04/2013	51
12/04/2013	52
13/04/2013	53
14/04/2013	54
15/04/2013	55

2.3 Confronto tra i risultati del monitoraggio invernale 2012 e del monitoraggio invernale 2013

Il confronto tra la campagna invernale 2012 e la campagna invernale 2013 differisce sostanzialmente, oltre che per le diverse condizioni metereologiche, a causa dell'istallazione di un accumulo a cambiamento di fase (avvenuta a marzo 2013) e della presenza di persone all'interno dell'edificio che hanno alcune volte influenzato negativamente l'attività di monitoraggio.

2.3.1 Confronto mesi di Febbraio 2012 e Febbraio 2013

il mese di febbraio 2013 ha una temperatura media mensile dell'aria esterna maggiore di circa un grado rispetto al mese di febbraio 2012 (Figura 39). Inoltre il funzionamento dell'impianto durante il mese di febbraio 2013 è regolamentato da una logica di regolazione differente e più raffinata rispetto a quella del mese di febbraio 2012. Tutto ciò si ripercuote sull'entità dello scostamento energetico tra i due mesi.

Mentre il mese di febbraio 2012 presentava un profilo di funzionamento relativo a tutti i giorni della settimana e prima continuo ed in seguito discontinuo, nel mese di febbraio 2013 l'impianto viene fatto funzionare in maniera discontinua (ore 7 – ore 17) e spento nei giorni di sabato e di domenica (Figura 40).

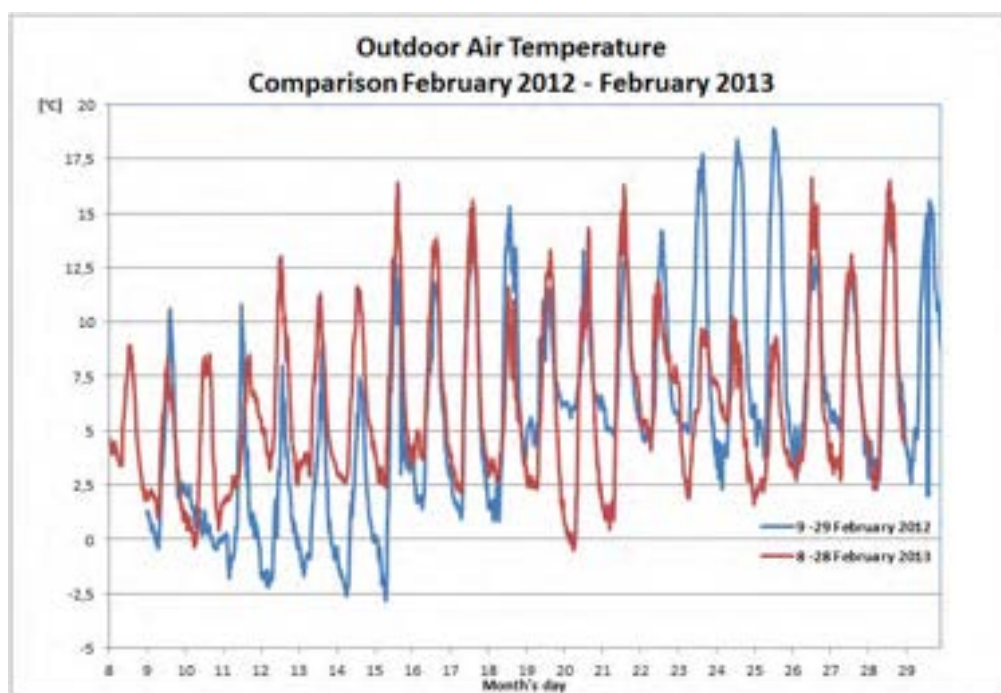


Figura 39. Confronto temperatura aria esterna nei mesi di febbraio 2012 e febbraio 2013

I picchi negativi delle temperature ambienti testimoniano lo spegnimento dell'impianto nei giorni di sabato e domenica a febbraio 2013. Dal grafico si nota la presenza di un minimo in corrispondenza del 21 febbraio 2012 causato da un fermo impianto, necessario per un intervento di manutenzione.

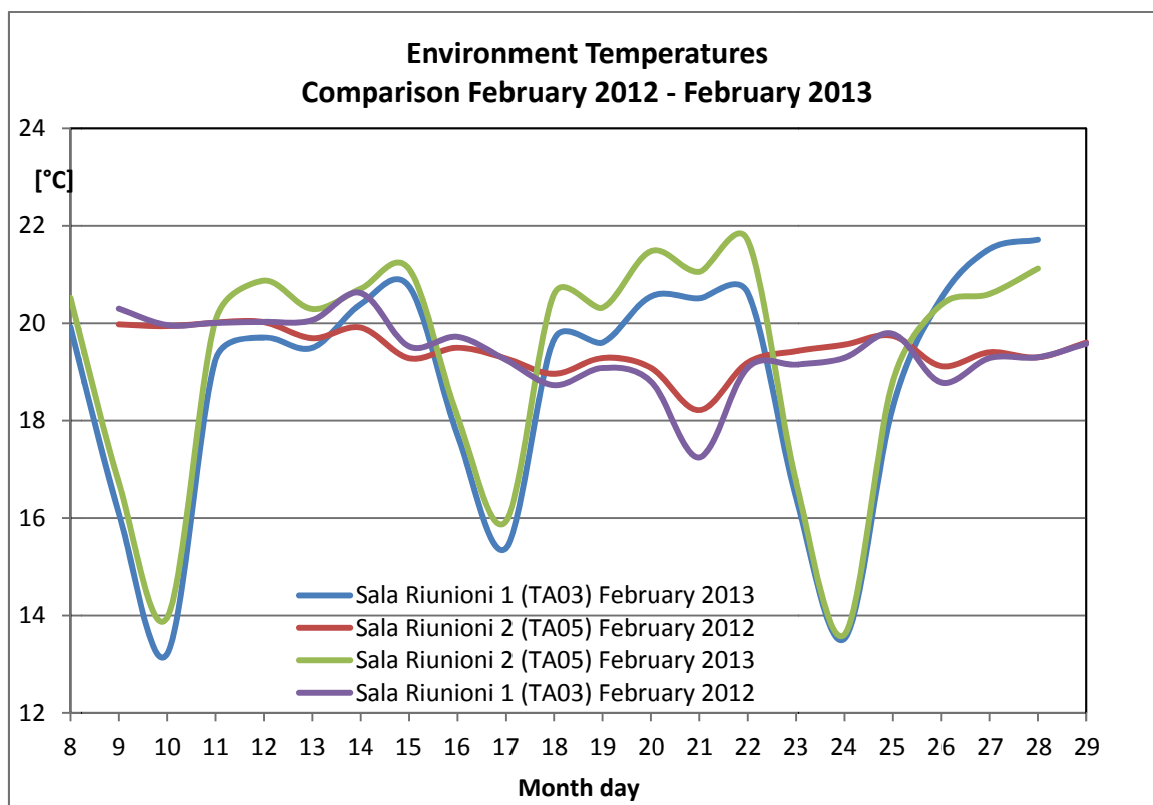


Figura 40. Confronto temperatura ambienti nei mesi di febbraio 2012 e febbraio 2013

Dal confronto energetico tra i due mesi (Figura 41) si nota subito che nonostante la radiazione solare incidente sui collettori solari e l'energia prodotta dal campo solare differiscono non di molto nei due mesi, l'energia termica dissipata dal dry cooler è decisamente inferiore nel mese di febbraio 2013. Ciò è giustificato anche dalla differente logica di regolazione impostata nei due mesi: il funzionamento dell'impianto a febbraio 2012 è infatti caratterizzato da una logica di regolazione meno raffinata ed attenta alla preservazione dell'energia termica stoccata nell'accumulo. L'energia termica immagazzinata nel serbatoio e fornita dal campo solare è infatti considerata "pregiata" ed è per questo motivo che si preferisce far intervenire, seconda la logica di regolazione 2013, la caldaia integrativa all'avviamento dell'impianto, per scopi quali il riscaldamento del termodotto e del contenuto d'acqua d'impianto presente all'interno dell'edificio: il mantenimento in temperatura dei vari ambienti è invece garantito utilizzando l'energia termica immagazzinata e prodotta gratuitamente con il sole. Nel mese di febbraio 2012 l'impianto ha funzionato anche il sabato e la domenica a differenza di quanto accade nel 2013.

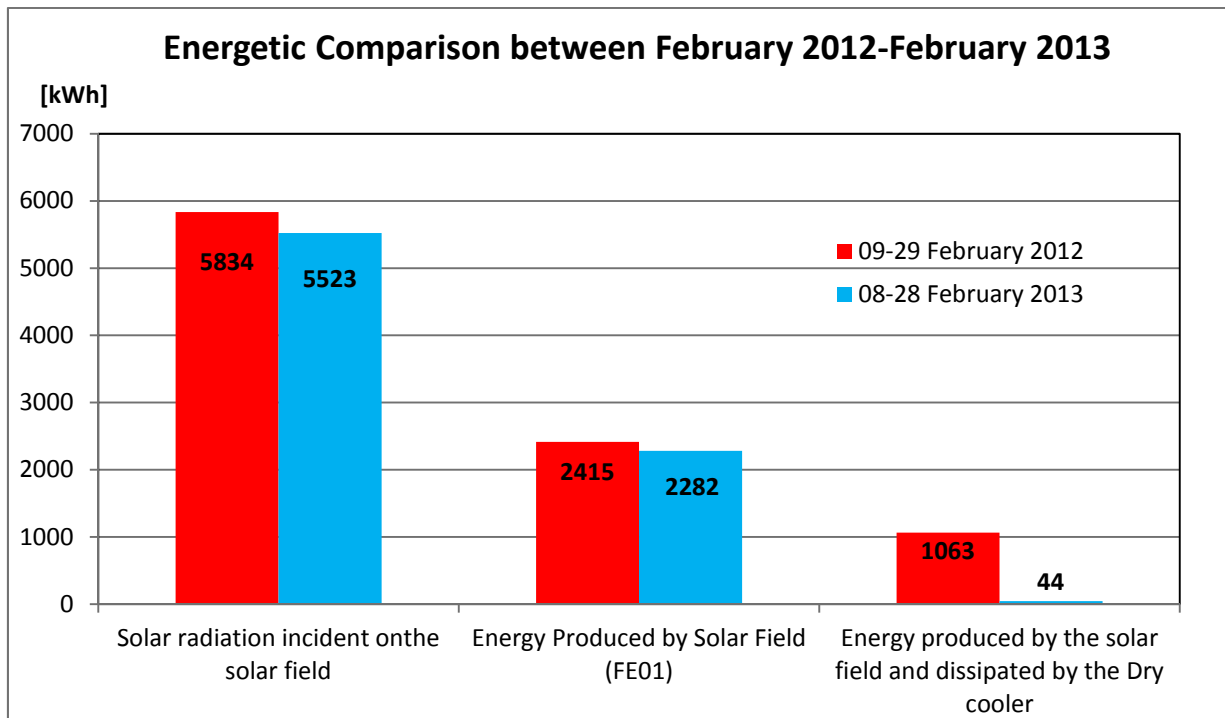


Figura 41. Confronto energetico tra i mesi di febbraio 2012 e febbraio 2013

Le temperature medie mensili dell'aria esterna sono per i due mesi circa pari a 6°C ma un setpoint (22 °C) maggiore per le temperature degli ambienti interni determina un fabbisogno energetico giornaliero maggiore nel mese di febbraio 2013 rispetto all'anno precedente (Figura 42).

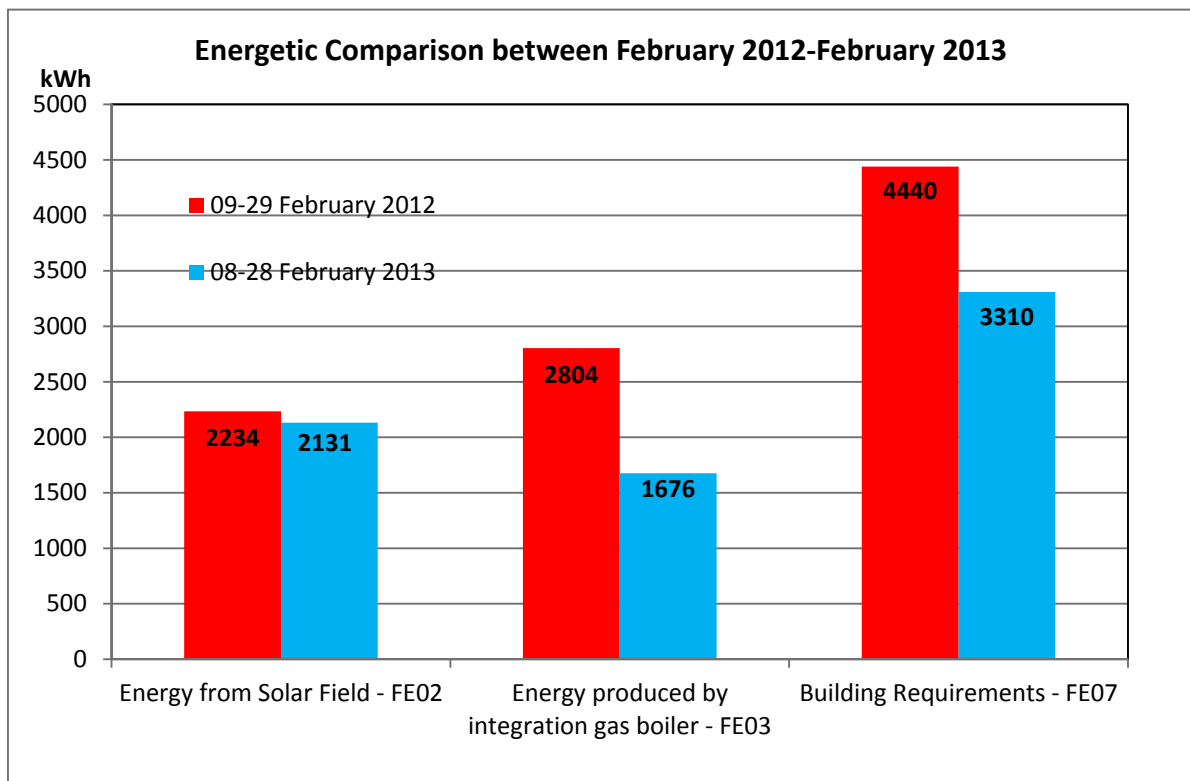


Figura 42: Confronto contatermie tra i mesi di febbraio 2012 e febbraio 2013

Da quanto precedentemente detto si evince che la frazione solare nel mese di febbraio 2013 è maggiore rispetto a quella del mese di febbraio 2012 il quale è stato caratterizzato dalla presenza di abbondanti nevicate (Figura 43).

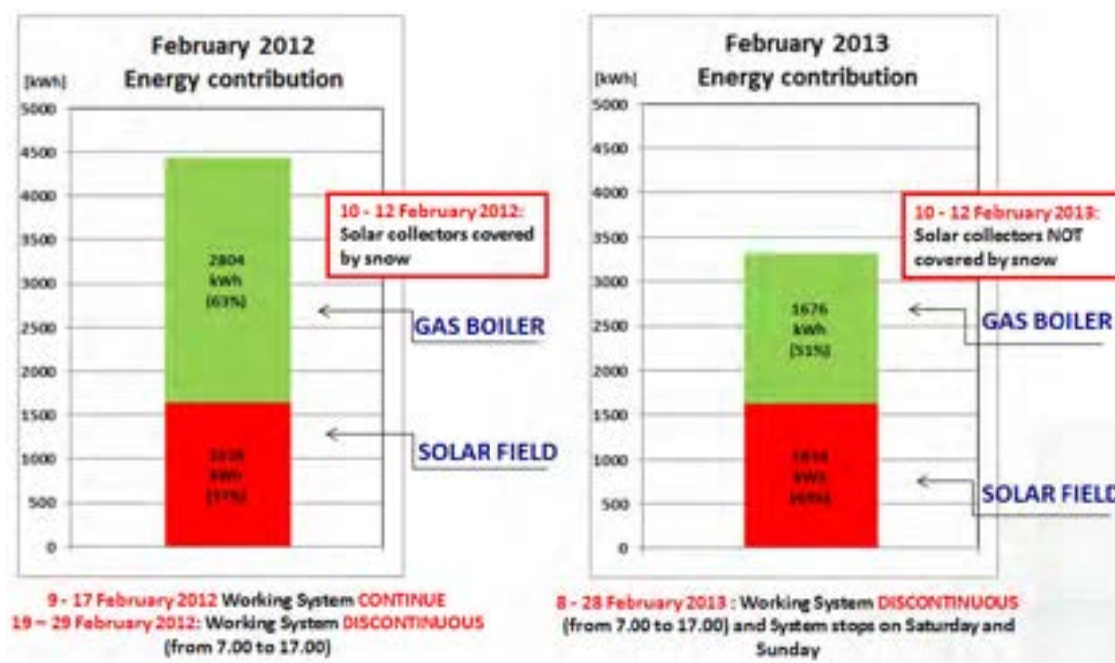


Figura 43. Confronto frazione solare nei mesi di febbraio 2012 e febbraio 2013

In Tabella 7 è riportata la tabella riepilogativa del confronto tra i mesi di febbraio 2012 e febbraio 2013.

Tabella 7. Confronto riepilogativo tra i mesi di febbraio 2012 e febbraio 2013

	9-29 FEBRUARY 2012	8-28 FEBRUARY 2013	
SOLAR RADIATION ON SOLAR COLLECTORS	5834,00	5523	[kWh]
MEDIUM OUTDOOR AIR TEMPERATURE	5,89	6,37	[°C]
ENVIRONMENT TEMPERATURE SET POINT (GROUND AND FIRST FLOOR)	20,00	22,00	[°C]
BUILDING REQUIREMENTS (FE07)	4.440,00	3.310,00	[kWh]
ENERGY FROM INTEGRATION GAS BOILER (FE03)	2.804,00	1.676,00	[kWh]
ENERGY FROM SOLAR FIELD	1.636,00	1.634,00	[kWh]
SOLAR FRACTION	37	49	%

2.3.2 Confronto mesi di Marzo 2012 e Marzo 2013

I mesi di marzo 2012 e marzo 2013 sono caratterizzati da uno stesso profilo di funzionamento dell'impianto di solar heating and cooling: dalle ore 7 alle 17 tutti i giorni della settimana. L'andamento della temperatura

dell'aria esterna mostra come il mese di marzo 2012 è stato caratterizzato da condizioni meno rigide rispetto al mese di marzo 2013 (Figura 44). I valori medi mensili della temperatura dell'aria esterna nei due mesi differiscono di 3°C e sono rispettivamente pari a 13°C per marzo 2012 e 10°C per marzo 2013.

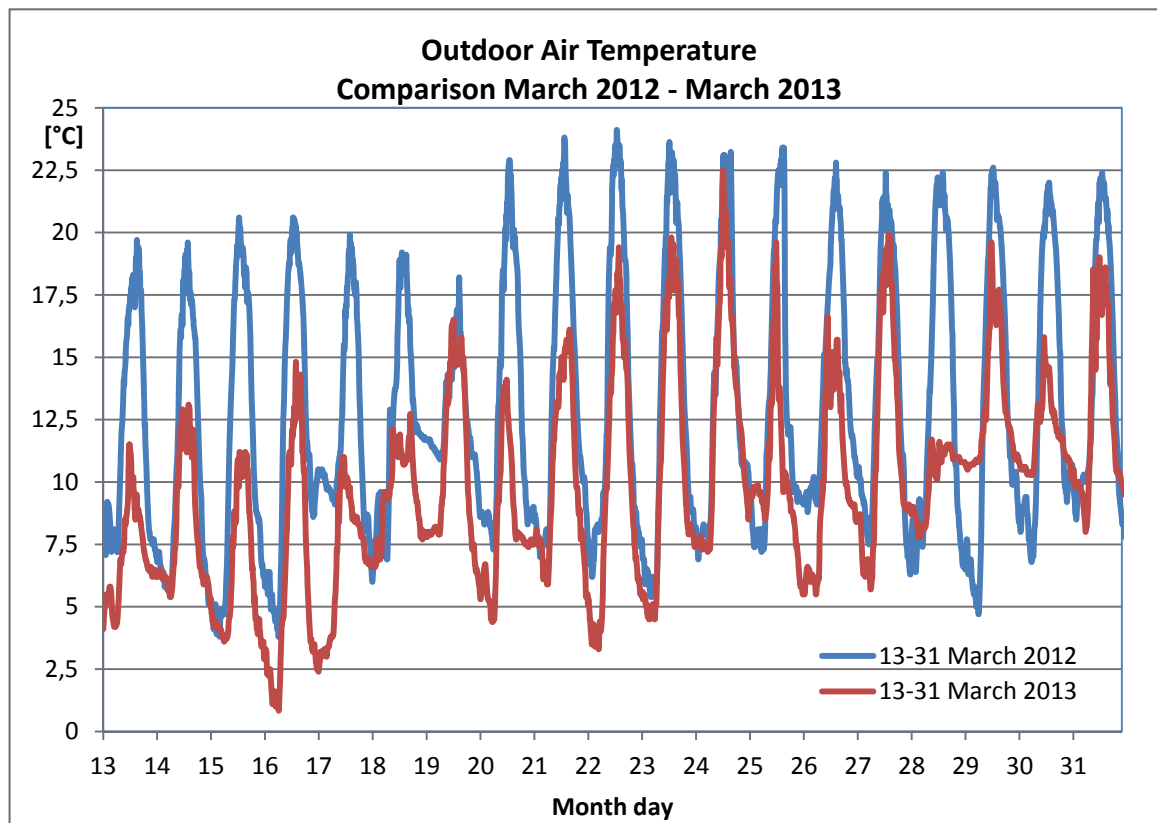


Figura 44. Confronto temperatura aria esterna nei mesi di marzo 2012 e marzo 2013

In Figura 45 è riportato l'andamento delle temperature di due ambienti interni per ciascun mese: sono state analizzate e confrontate le temperature delle due sale riunioni rispettivamente una situata al piano terra e l'altra al piano primo. Si nota l'assenza di picchi negativi essendo l'impianto in funzionamento anche il sabato e la domenica. Nel 2013 le temperature esaminate si collocano su livelli di temperatura maggiori essendo il setpoint della temperatura ambiente a marzo 2013 (22°C) maggiore rispetto all'anno precedente (20°C). Dal grafico risulta che in entrambi i mesi sono state garantite le condizioni di comfort all'interno degli ambienti occupati e che i valori assunti dalle temperature sono stati mantenuti all'interno di una banda.

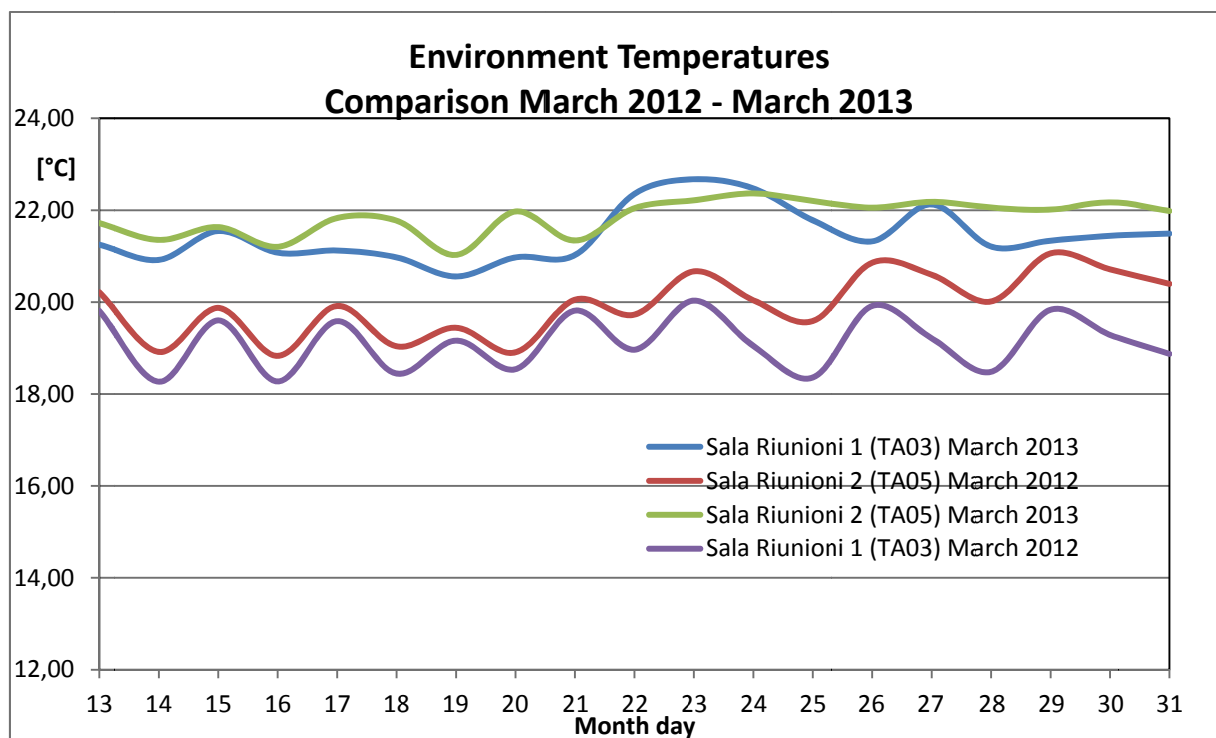


Figura 45. Confronto temperature ambienti interni nei mesi di marzo 2012 e marzo 2013

La radiazione solare incidente sui collettori solari è stata maggiore a marzo 2012 rispetto al mese di marzo 2013. Nonostante ciò l'energia termica inviata a scambiare con il circuito di carica dell'accumulo differisce di poco tra i due mesi in quanto l'energia dissipata nel mese di marzo 2013 è nulla (Figura 46).

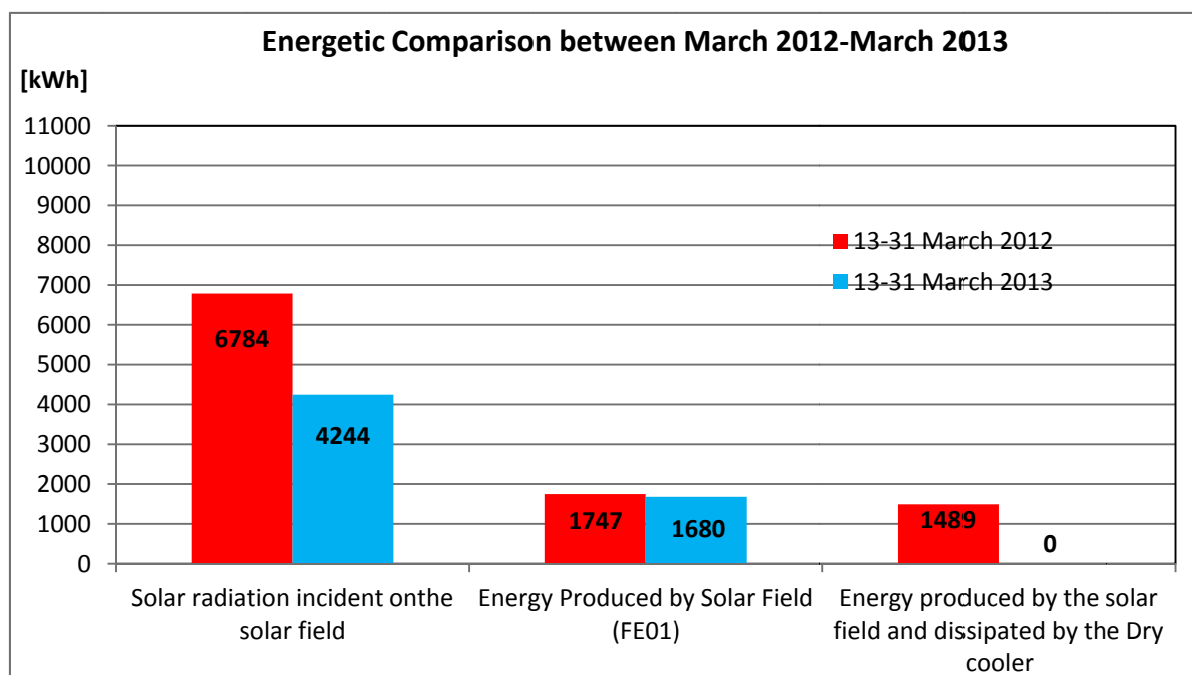


Figura 46. Confronto energetico tra i mesi di marzo 2012 e marzo 2013

A parità di radiazione solare incidente sui collettori durante il mese di marzo 2013 si riesce ad accumulare più energia rispetto al mese di marzo 2012 in quanto è minore l'energia termica dissipata dal dry cooler nonostante il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento dell'edificio è maggiore a marzo 2013 in quanto si hanno temperature esterne più rigide e un setpoint per le temperature ambienti maggiore (Figura 47).

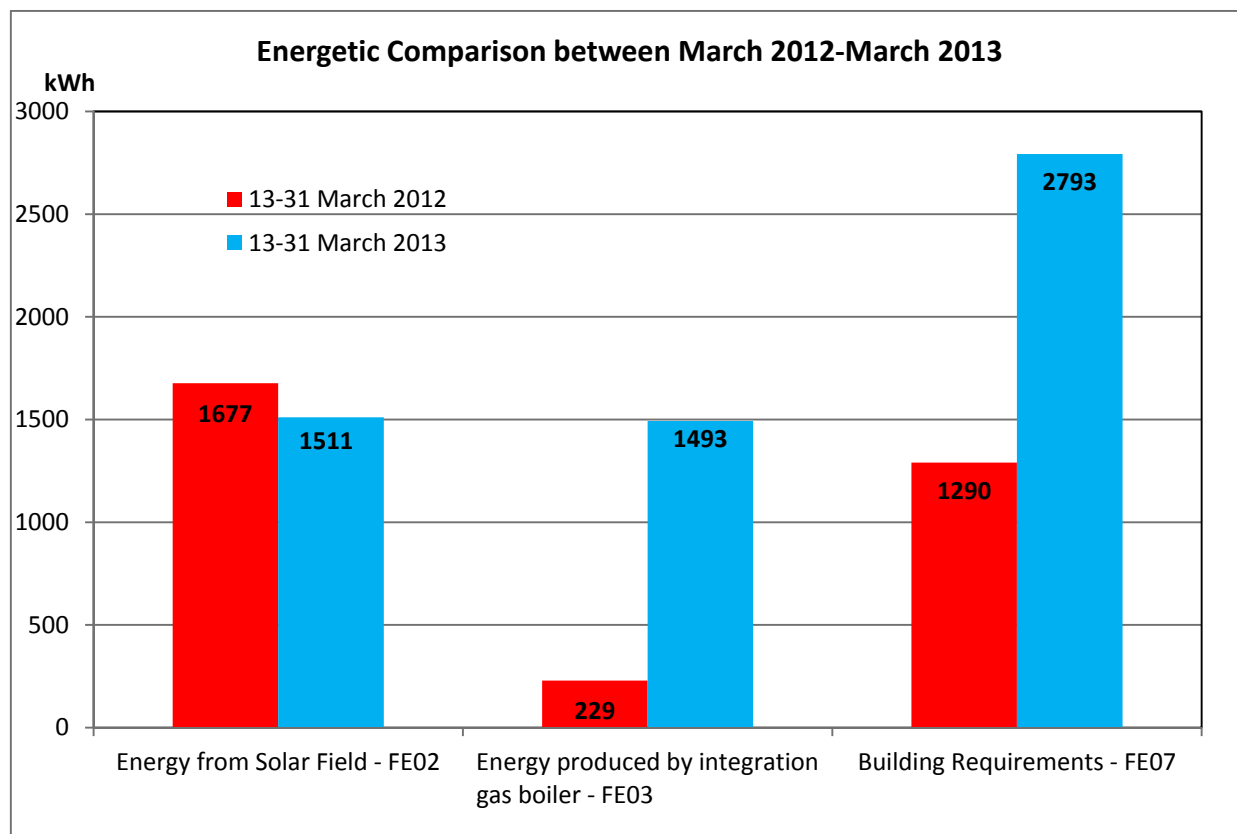


Figura 47. Confronto contatermie nei mesi di marzo 2012 e marzo 2013

Il maggior fabbisogno di energia per il riscaldamento dell'edificio e la minore energia incidente sul campo solare influenzano negativamente la frazione solare nel mese di marzo 2013 che è quindi minore della corrispondente frazione solare dell'anno precedente (Figura 48).

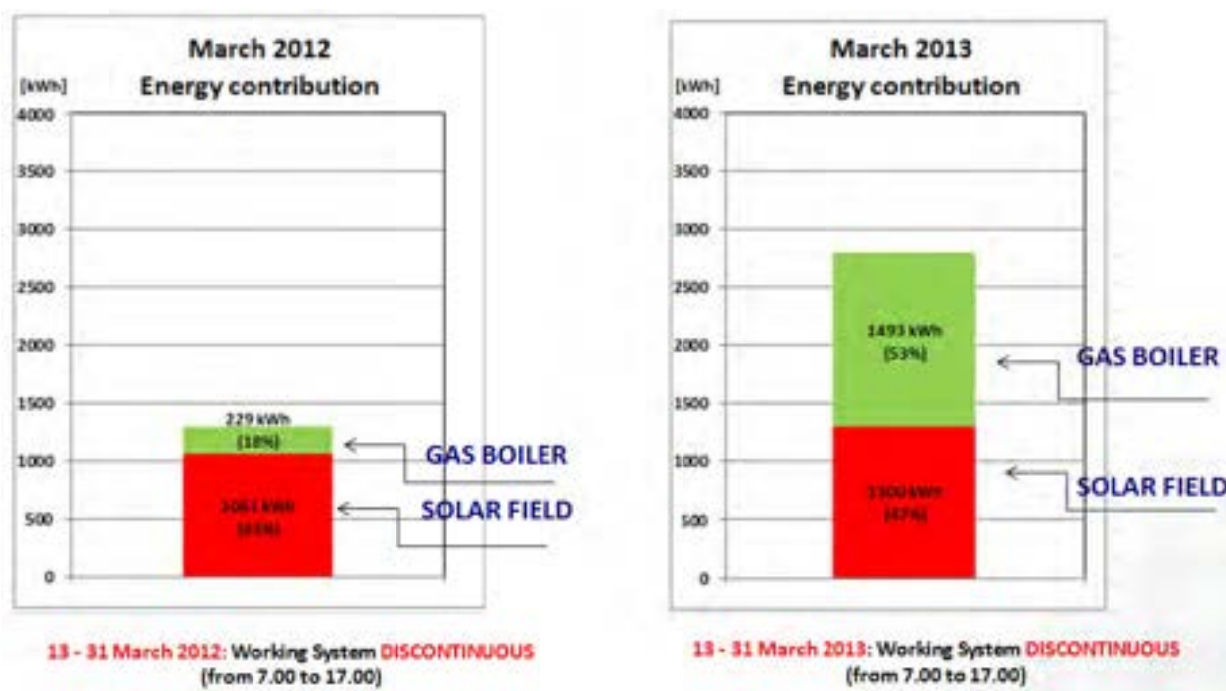


Figura 48. Confronto temperature ambienti interni nei mesi di marzo 2012 e marzo 2013

In Tabella 8 viene riportato il riepilogo del confronto tra il mese di marzo 2012 ed il mese di marzo 2013.

Tabella 8. Confronto riepilogativo nei mesi di marzo 2012 e marzo 2013

	13-31 MARCH 2012	13-31 MARCH 2013	
SOLAR RADIATION ON SOLAR COLLECTORS	6784,00	4244	[kWh]
MEDIUM OUTDOOR AIR TEMPERATURE	12,84	9,89	[°C]
ENVIRONMENT TEMPERATURE SET POINT (GROUND AND FIRST FLOOR)	20,00	22,00	[°C]
BUILDING REQUIREMENTS (FE07)	1.290,00	2.793,00	[kWh]
ENERGY FROM INTEGRATION GAS BOILER (FE03)	229,00	1.493,00	[kWh]
ENERGY FROM SOLAR FIELD	1.061,00	1.300,00	[kWh]
SOLAR FRACTION	82	47	%

2.3.3 Confronto mesi di Aprile 2012 e Aprile 2013

Il mese di aprile 2013 è caratterizzato da condizioni meteorologiche meno rigide rispetto al mese di aprile 2012: sia la radiazione solare che la temperatura media mensile dell'aria esterna presentano valori maggiori rispetto al caso del 2012. Il mese di aprile 2012 presenta valori inferiori della temperatura dell'aria esterna specialmente nella seconda metà del periodo monitorato (Figura 49).

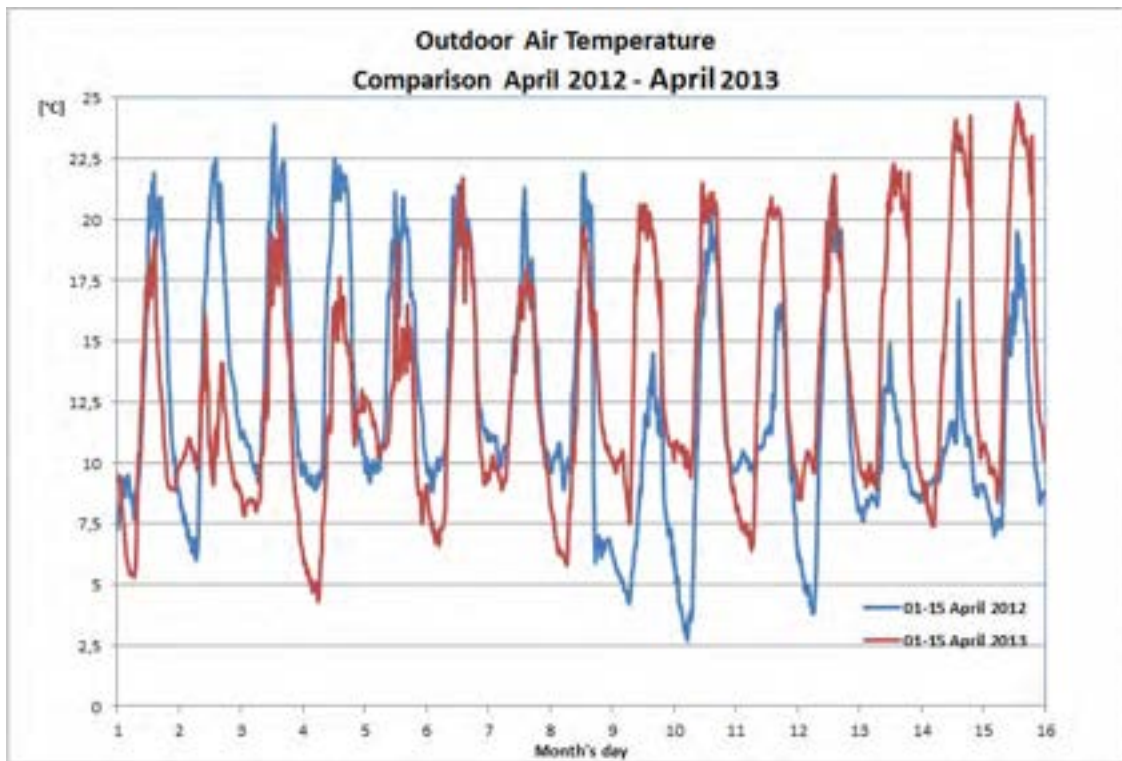


Figura 49. Confronto temperatura aria esterna nei mesi di aprile 2012 ed aprile 2013

Entrambi i mesi sono soggetti allo stesso profilo di funzionamento dell'impianto di solar heating and cooling. I valori di setpoint preimpostati per le temperature degli ambienti interni sono però differenti e sono rispettivamente 20°C per aprile 2012 e 22°C per aprile 2013 (Figura 50). Nel periodo monitorato di aprile 2013 la temperatura della sala riunioni del piano terra mostra un andamento differente ed uno scostamento dalla temperatura della sala riunioni del piano superiore dello stesso anno.

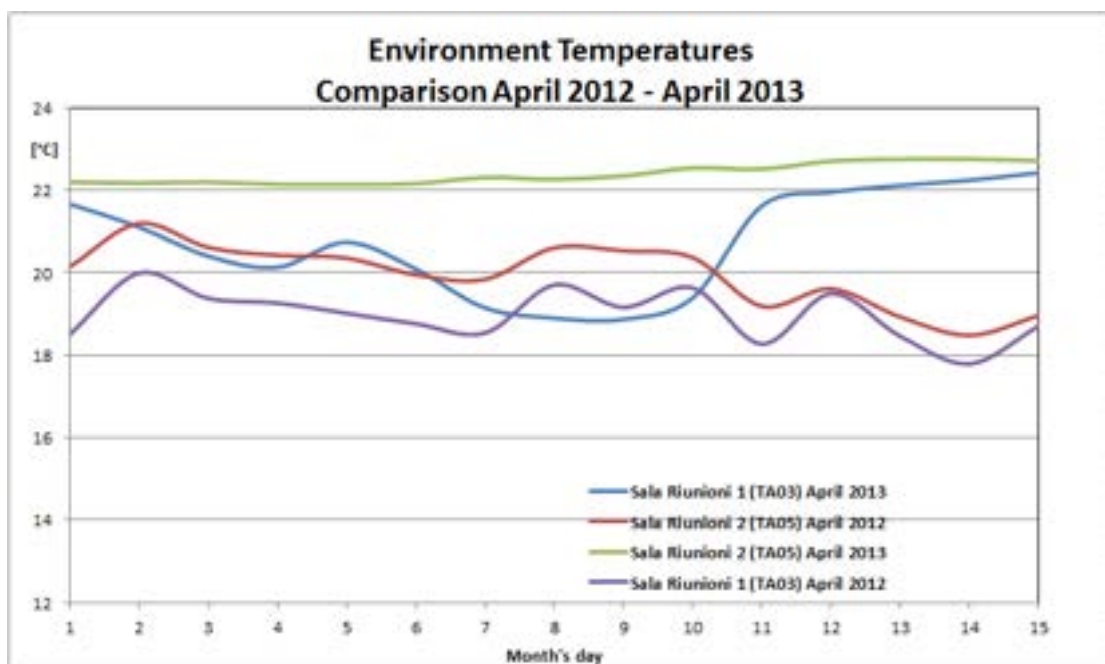


Figura 50: Confronto temperature ambienti nei mesi di aprile 2012 ed aprile 2013

La radiazione solare incidente sui collettori solari ad aprile 2013 è stata maggiore rispetto ad aprile 2012 ciò corrisponde ad una maggiore quantità di energia utile alla carica del serbatoio d'accumulo e di energia dissipata dal dry cooler (Figura 51-52).

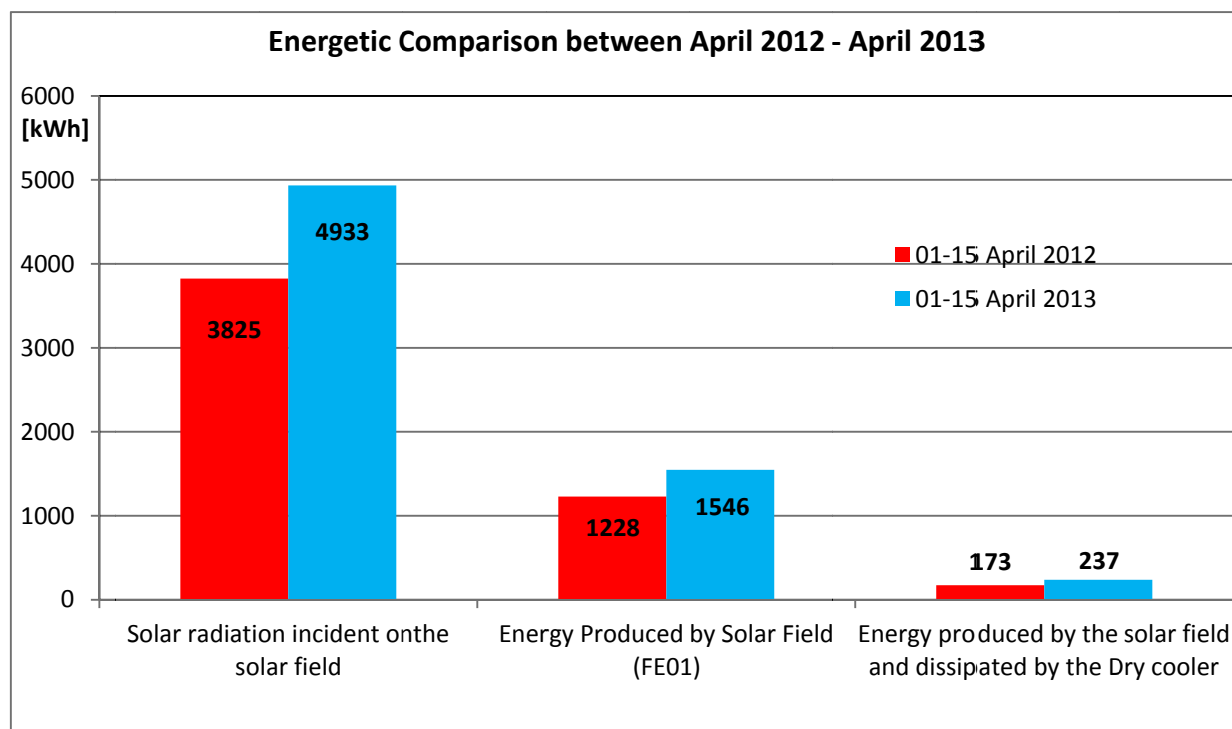


Figura 51. Confronto energetico tra i mesi di aprile 2012 ed aprile 2013

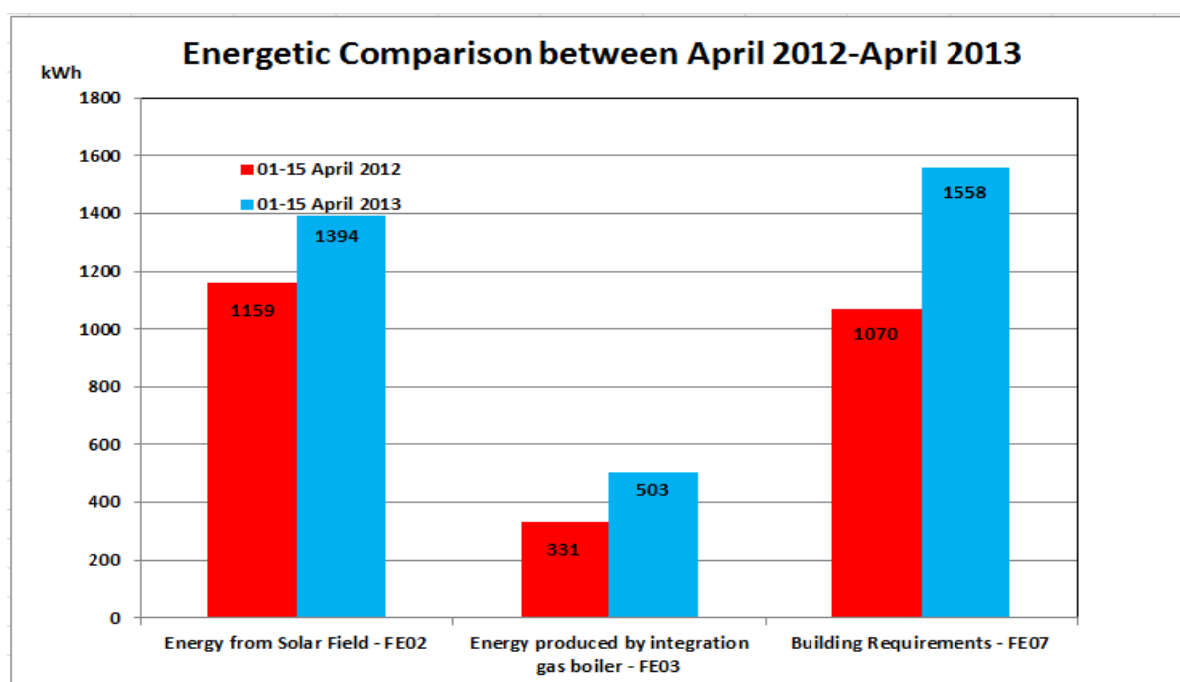


Figura 52. Confronto contatermie nei mesi di aprile 2012 ed aprile 2013

In particolare, rapportando le grandezze ai gradi giorno del mese si nota un comportamento simile dei due accumuli, in particolare leggermente peggiorativo per l'accumulo PCM, che pure presenta un ingombro inferiore di un terzo rispetto al serbatoio standard. Nonostante il fabbisogno energetico dell'edificio assume un valore maggiore ad aprile 2013, la frazione solare si mantiene simile ad aprile 2012 a causa di una maggior presenza di radiazione solare e di temperature dell'aria esterna più alte che incidono positivamente sul rendimento dei collettori solare termici (Figura 53).

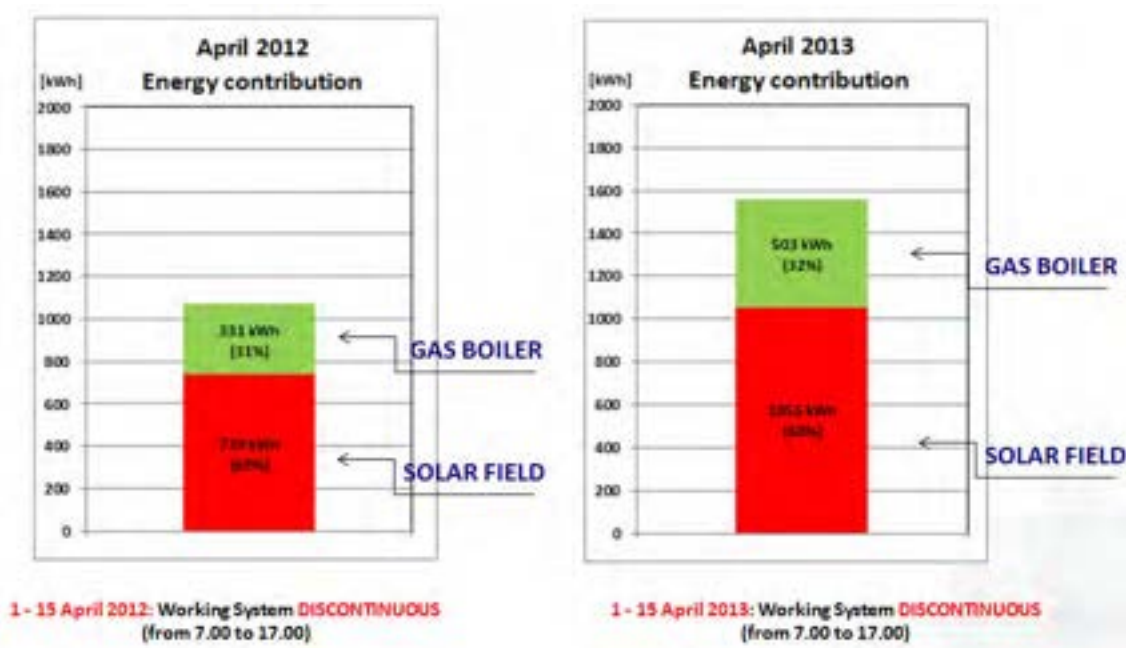


Figura 53. Confronto frazione solare nei mesi di aprile 2012 ed aprile 2013

In Tabella 9 viene riportato il riepilogo del confronto tra il mese di aprile 2012 ed il mese di aprile 2013.

Tabella 9. Confronto riepilogativo dei mesi di aprile 2012 ed aprile 2013

	1-15 APRIL 2012	1-15 APRIL 2013	
SOLAR RADIATION ON SOLAR COLLECTORS	3825,00	4933	[kWh]
MEDIUM OUTDOOR AIR TEMPERATURE	12,28	13,07	[°C]
ENVIRONMENT TEMPERATURE SET POINT (GROUND AND FIRST FLOOR)	20,00	22,00	[°C]
BUILDING REQUIREMENTS (FE07)	1.070,00	1.557,60	[kWh]
ENERGY FROM INTEGRATION GAS BOILER (FE03)	331,00	503,00	[kWh]
ENERGY FROM SOLAR FIELD	739,00	1.054,60	[kWh]
SOLAR FRACTION	69	68	%

In Figura 53 ed in Figura 54 viene riassunto il confronto tra i risultati del monitoraggio invernale 2012 ed i risultati relativi al monitoraggio invernale 2013.

In Figura 54 si nota come la radiazione solare incidente sui pannelli è stata maggiore nell'inverno del 2012 rispetto a quella dell'inverno successivo. Nonostante ciò, a causa di una minore quantità di energia termica dissipata attraverso il dry cooler, è stato possibile inviare a scambiare con il circuito di carica dell'accumulo una quantità di energia (FE01) leggermente maggiore. Ciò può essere giustificato anche da temperature globalmente meno rigide nel corso dell'inverno 2013 in cui, ad esempio, non si sono verificate nevicate come nel precedente inverno.

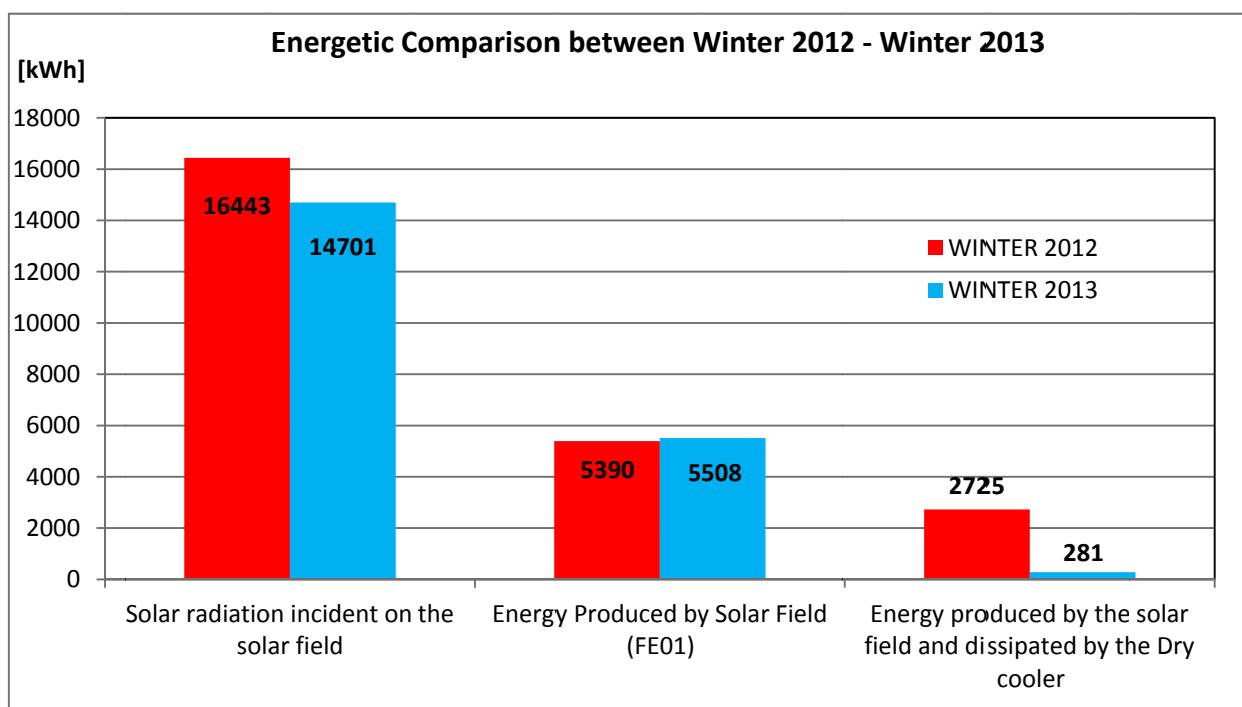


Figura 54. Confronto energetico riepilogativo comparativo tra le due campagne invernali 2012 e 2013

Nell'inverno del 2013 si è stoccata all'interno del serbatoio d'accumulo una quantità di energia termica quasi uguale a quella dell'inverno 2012 nonostante questo ultimo è stato caratterizzato da un minor valore di radiazione solare incidente sui collettori. I setpoint per le temperature ambienti maggiori nel 2013 rispetto al 2012 hanno determinato un fabbisogno di energia per il riscaldamento dell'edificio nel 2013 di non molto superiore rispetto al 2012 caratterizzato invece da condizioni climatiche più gravose (Figura 55). Le condizioni meteorologiche meno rigide e la presenza di un accumulo PCM hanno quindi influenzato in maniera positiva la frazione solare nell'inverno 2013 che è quindi simile a quella del precedente inverno nonostante questo ultimo è stato caratterizzato da un valore maggiore di radiazione solare incidente sui pannelli.

In Figura 56 viene quindi riportata la frazione solare relativa del monitoraggio invernale 2012 e del monitoraggio invernale 2013. Nel primo caso essa è pari al 51% mentre nel 2013 ammonta al 52% dell'energia termica richiesta per il riscaldamento degli ambienti interni all'edificio F-92.

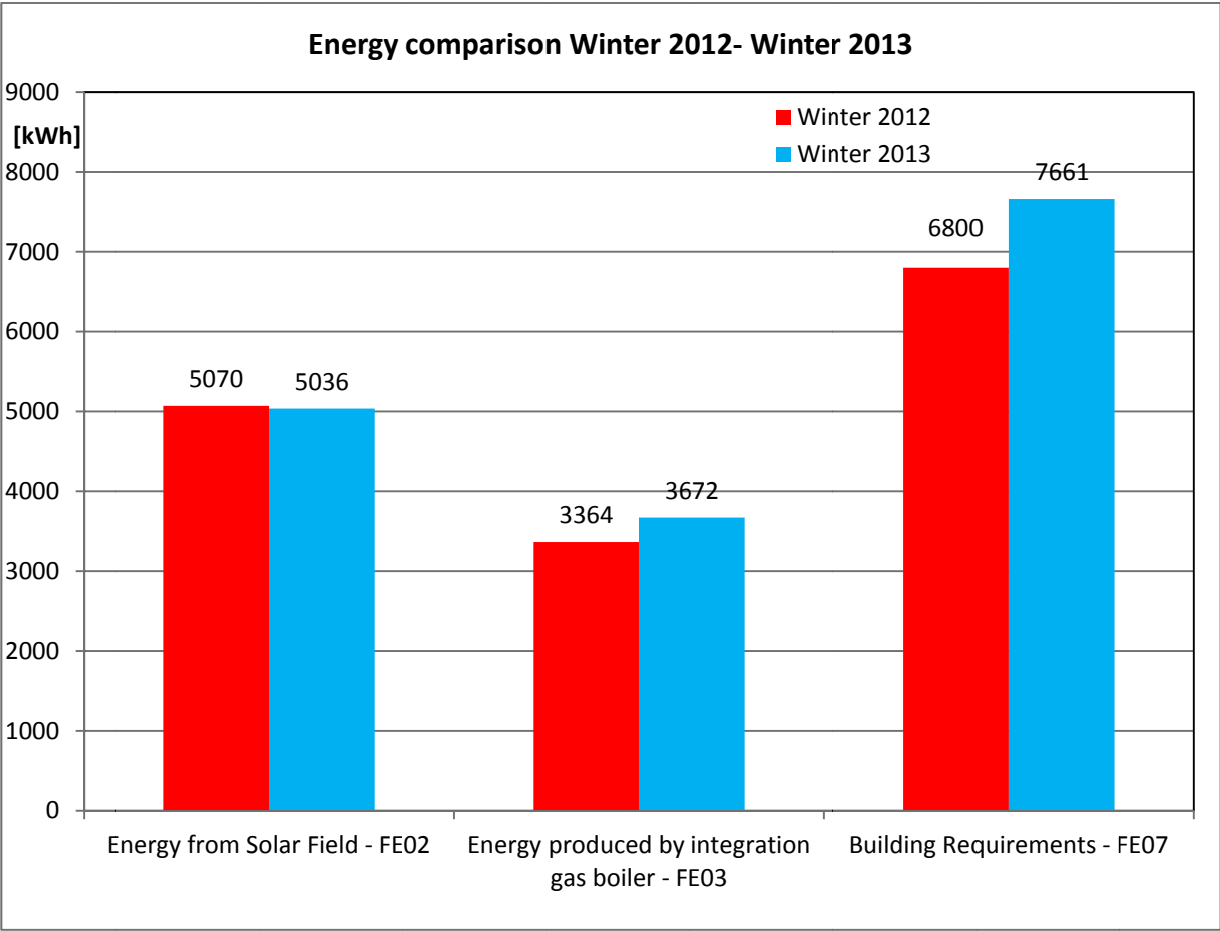


Figura 55. Confronto contatermie riepilogativo comparativo tra le due campagne invernali 2012 e 2013

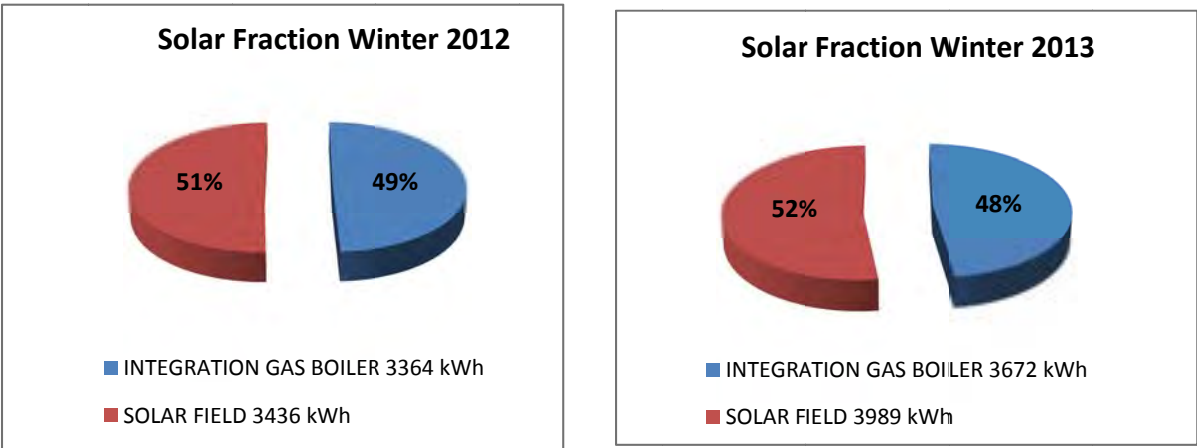


Figura 56. Confronto frazioni solari riepilogativo comparativo tra le due campagne invernali 2012 e 2013

2.4 Analisi serbatoio d'accumulo a cambiamento di fase (PCM)

In tale paragrafo viene riportata l'analisi energetica del serbatoio d'accumulo a cambiamento di fase. Di seguito vengono presentati sinteticamente i risultati della campagna di acquisizione dati nel periodo dal 13 marzo al 15 aprile 2013, necessari alla valutazione prestazionale del nuovo serbatoio di accumulo caldo installato a servizio dell'impianto (accumulo del tipo a cambiamento di fase, di capacità pari a 1000 litri, in sostituzione dell'accumulo tradizionale avente capacità pari a 1500 litri). Per un'analisi più dettagliata si rimanda al rapporto tecnico specifico (Allegato A del Rapporto Tecnico). In Tabella 10 vengono sinteticamente presentate le energie termiche giornaliere rilevate:

- energia termica fornita all'accumulo dal campo collettori (FE02)
- energia termica fornita dall'accumulo PCM all'edificio F-92 (TANK_TO_LOAD)
- energia termica fornita dalla caldaia all'edificio F-92 (FE03)
- fabbisogno edificio F-92 (FE07)

TABELLA 10. Energie termiche rilevate nel periodo 13 marzo – 15 aprile 2013: Energia termica fornita all'accumulo dal campo collettori (FE02), energia termica fornita dall'accumulo PCM all'edificio F-92 (TANK_TO_LOAD), energia termica fornita dalla caldaia all'edificio F-92 (FE03) e fabbisogno edificio F-92 (FE07)

	FE02	TANK_TO_LOAD	FE03	FE07
DATA	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
13/03/2013	7	0	132	130
14/03/2013	98	93	107	200
15/03/2013	123	110	80	190
16/03/2013	176	149	51	200
17/03/2013	21	31	119	150
18/03/2013	5	0	131	130
19/03/2013	157	133	67	200
20/03/2013	17	30	100	130
21/03/2013	178	147	43	190
22/03/2013	156	119	31	150
23/03/2013	110	110	30	140
24/03/2013	93	91	39	130
25/03/2013	29	28	82	110
26/03/2013	38	39	111	150
27/03/2013	134	91	35	126
28/03/2013	0	15	78	93
29/03/2013	45	28	104	132
30/03/2013	11	2	96	98
31/03/2013	113	87	57	144
TOTALE 13-31 marzo	1512	1303	1493	2793

	FE02	TANK_TO_LOAD	FE03	FE07
DATA	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
01/04/2013	85	70	48	118
02/04/2013	37	35	80	115
03/04/2013	100	53	51	104
04/04/2013	57	75	47	122
05/04/2013	34	30	91	121
06/04/2013	127	78	41	119
07/04/2013	128	89	10	99
08/04/2013	108	81	18	99
09/04/2013	122	86	10	96
10/04/2013	116	91	9	100
11/04/2013	94	79	26	105
12/04/2013	103	84	24	108
13/04/2013	125	76	24	100
14/04/2013	80	71	9	80
15/04/2013	78	55	15	70
TOTALE 01-15 aprile	1394	1053	503	1556

	FE02	TANK_TO_LOAD	FE03	FE07
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
TOTALE PERIODO	2906	2355	1997	4349

I dati sopra riportati:

- sono stati ottenuti da dati orari rilevati da misuratori di flusso CONTATERMIE tranne che per l'energia fornita dall'accumulo PCM, TANK_TO_LOAD, che risulta calcolata come differenza tra FE07 e FE03;
- sono stati confrontati nel paragrafo successivo per confrontare il diverso comportamento dell'accumulo con PCM rispetto alla soluzione con accumulo standard.

Tabella 11. Accumulo PCM: caratteristiche fisiche tubi utilizzati tipo S46

DESCRIZIONE		2013
NUMERO DI TUBI PCM	[-]	120
LUNGHEZZA TUBO PCM	[mm]	1000
DIAMETRO TUBO PCM	[mm]	50
MASSA TUBO PCM	[kg/tubo]	2.8
VOLUME TOTALE TUBI PCM	[l]	236
CALORE SPECIFICO PCM	[kJ/(kg °C)]	2.41
CALORE LATENTE PER TUBO	[kJ/tubo]	532.8

In Tabella 11 sono riportate le caratteristiche fisiche e termodinamiche utilizzate nelle valutazioni che seguono relative all'accumulo: i 120 tubi sono stati posati all'interno dell'accumulo da 1000 l nominali nella parte inferiore come evidenziato in Figura 57. Nella figura 57 si nota:

- disco di 840 mm di diametro e 15 mm di spessore per l'appoggio dei tubi posto ad un'altezza di 315 mm dal pavimento;
- 2 piastre forate (121 fori) per la tenuta in posizione dei 120 tubi PCM (1 foro centrale risulta non utilizzato).

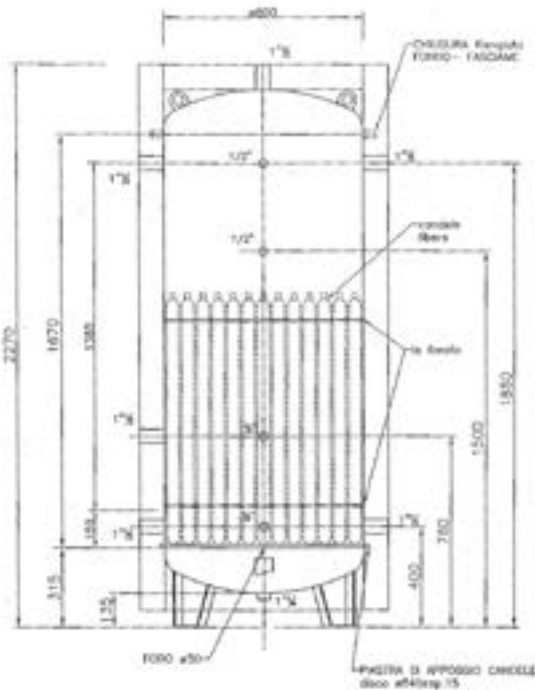


Figura 57. Accumulo PCM, vista in sezione e vista centrale termofrigorifera con accumulo PCM

La capacità teorica dell'accumulo valutata considerando sia il calore sensibile che quello latente è presentata in Tabella 3; nel caso specifico l'accumulo standard 2012 ha solo la componente sensibile¹, mentre l'accumulo con PCM ha sia la componente sensibile (considerando sia l'acqua che il PCM) che quella latente dei PCM.

(Nota ¹: L'energia sensibile viene calcolata considerando la temperatura minima di 30 °C e la temperatura massima dell'accumulo di 95 °C prevista dalla logica dell'impianto)

Dal confronto emerge che l'accumulo con PCM ha una capacità teorica di 300 MJ (83,3 kWh) che risulta quindi inferiore del 25% rispetto a quella dell'accumulo tradizionale di 408 MJ (113,3 kWh). La componente sensibile del solo volume d'acqua rappresenta il 61%: la restante parte è ripartita tra latente (21%, 17,8 kWh) e sensibile (18%, 14,7 kWh) (vedi Tabella 12 e Figura 58).

Tabella 12. Accumulo std vs accumulo PCM. Capacità termica teorica

		CAPACITA' TERMICA LATENTE SERBATOIO	CAPACITA' TERMICA SENSIBILE SERBATOIO	CAPACITA' TERMICA TOTALE
SERBATOIO STD		[MJ/m3]	[MJ/m3]	[MJ/m3]
		0	272	272
		[MJ]	[MJ]	[MJ]
		0	408	408
SERBATOIO PCM*	ACQUA	[MJ/m3]	[MJ/m3]	[MJ/m3]
		0	201	201
		[MJ]	[MJ]	[MJ]
		0	183	183
	TUBI PCM	[MJ/m3]	[MJ/m3]	[MJ/m3]
		71	58	129
		[MJ]	[MJ]	[MJ]
		64	53	117

* Volume considerato pari alla somma del volume d'acqua e del volume dei tubi PCM

ACCUMULO PCM

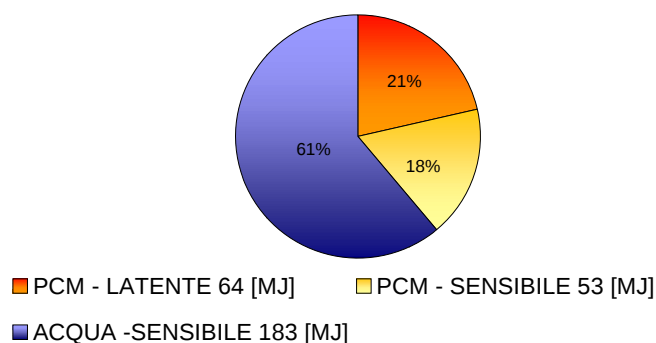


Figura 58. Accumulo PCM: dettaglio capacità teorica di accumulo

CONFRONTO 2012-2013

Di seguito viene presentata l'analisi dei dati sperimentali ottenuti sull'impianto nel periodo 13 marzo – 15 aprile 2012 e 2013. Tale analisi viene qui solo brevemente commentata; maggiori dettagli saranno disponibili nella versione estesa della presente relazione.

In Tabella 13 e Tabella 14 vengono riassunti alcuni parametri di confronto:

- Temperatura media periodo: i giorni del mese di marzo 2012 sono stati nettamente più caldi dell'equivalente periodo del 2013 con una differenza in media di 3,3 °C. Viceversa i giorni del mese di aprile risultano più confrontabili avendo temperature medie che si discostano di 1 °C;
- Volume accumulo caldo: per il 2012 è stato utilizzato un accumulo standard ad acqua da 1500 l; per il 2013 è stato costruito un accumulo predisposto per contenere 120 tubi PCM da 1 m di lunghezza per 50 mm di diametro. Il volume occupato dai tubi PCM è stimato in 236 l riducendo a 671 l il volume reale di acqua dell'accumulo (di cui 254 l tra il fasciame dei tubi PCM e separati dal volume superiore d'acqua da una piastra per la tenuta in sede dell'accumulo, vedi Figura 57).

Tabella 13. Accumulo std vs accumulo PCM. Caratteristiche fisiche

DESCRIZIONE		2012	2013
VOLUME NOMINALE	[l]	1500	1000
VOLUME INTERNO UTILE TOTALE	[l]	1500	906
VOLUME TOTALE PCM	[l]	-	236
VOLUME INTERNO ACQUA	[l]	1500	671
VOLUME ACQUA A CONTATTO TRA PCM	[l]	0	254
VOLUME ACQUA SOPRA PCM	[l]	0	416
ALTEZZA UTILE	[l]	-	1850
DIAMETRO INTERNO	[l]	-	790

- Temperatura edificio e correzione con gradi giorno: la temperatura di setpoint dell'edificio è stata aumentata da 20 °C del 2012 a 22 °C del 2013. Tale differenza di temperatura comporta un carico termico richiesto dall'edificio tendenzialmente superiore per il 2013 rispetto all'anno precedente: al fine di garantire la bontà del confronto tra periodi di anni diversi abbiamo corretto il fabbisogno dell'edificio (FE07) e il contributo dell'accumulo al fabbisogno dell'edificio (TANK_TO_LOAD) dividendoli per i gradi giorno del relativo periodo². Dalla tabella i giorni di aprile 2012-2013 risultano avere un indice FE07/GG più simile, rispettivamente di 12,6 kWh/GG e 11,9 kWh/GG, rispetto ai giorni di marzo; il periodo di aprile risulta quindi maggiormente adatto al confronto. Se consideriamo l'indice relativo al contributo dell'accumulo al riscaldamento dell'edificio (TANK_TO_LOAD/GG) otteniamo un valore per il 2013 pari a 8 kWh/GG, in linea con gli 8,7 kWh/GG del 2012.
(Nota ²: Gradi Giorno (GG) calcolati come sommatoria nel periodo considerato (13-31 marzo, 1-15 aprile) della differenze positive tra temperatura interna di setpoint e temperatura media giornaliera nelle 24 ore)
- SOLAR FRACTION: il contributo dell'accumulo al fabbisogno dell'edificio nei primi 15 giorni di aprile (periodo preferibile per il confronto) è risultato pressoché simile con una percentuale di 69% per il 2012 e di 68% per il 2013. La percentuale di utilizzo dell'energia solare data dall'accumulo (TANK_TO_LOAD/FE02) risulta pari a 76% nel caso di accumulo con PCM (2013) contro il 64 % dell'accumulo std (2012): tale dato, come già visto, è in parte condizionato da una temperatura di

setpoint 2013 dell'edificio superiore di 2 °C rispetto al valore utilizzato nel 2012 contro un aumento della temperatura media dell'aria esterna di circa 1 °C dal 2012 al 2013.

Tabella 14. Accumulo std vs accumulo PCM. Confronto

	MARZO 2012	MARZO 2013			APRILE 2012	APRILE 2013	
TEMPERATURA MEDIA PERIODO	14.3	11.0	[°C]	TEMPERATURA MEDIA PERIODO	13.3	14.3	[°C]
VOLUME ACCUMULO	1500	906	[l]	VOLUME ACCUMULO	1500	906	[l]
TEMPERATURA INTERNA EDIFICIO	20.0	22.0	[°C]	TEMPERATURA INTERNA EDIFICIO	20.0	22.0	[°C]
FE07/GG	12.0	13.4	[kWh/GG]	FE07/GG	12.6	11.9	[kWh/GG]
TANK_TO_LOAD/GG	9.9	6.2	[kWh/GG]	TANK_TO_LOAD/GG	8.7	8.0	[kWh/GG]
FE07	1 290	2 793	[kWh]	FE07	1 070	1 556	[kWh]
FE03	229	1 493	[kWh]	FE03	331	503	[kWh]
FE02	1 677	1 512	[kWh]	FE02	1 159	1 394	[kWh]
TANK_TO_LOAD	1 061	1 303	[kWh]	TANK_TO_LOAD	739	1 053	[kWh]
SOLAR FRACTION	82%	47%	%	SOLAR FRACTION	69%	68%	%

Per l'osservazione dettagliata del funzionamento dell'accumulo nell'arco delle 24 ore si è partiti dalla configurazione 2012 analizzata utilizzando un grafico del tipo in Figura 3. La figura rappresenta l'andamento dei profili di temperatura sul lato alto (TE07 – curva arancione) e sul lato basso (TE08 – curva azzurra) dell'accumulo in funzione dell'energia termica immessa (area rossa) e prelevata (area blu); la linea tratteggiata nera rappresenta il bilancio orario tra energia immessa e prelevata dall'accumulo.

Le grandezze rappresentate nei grafici che seguono sono le seguenti:

- TE07 – temperatura parte alta accumulo (valore medio nei 10 minuti)
- TE08 – temperatura parte bassa accumulo (valore medio nei 10 minuti)
- FE02 – apporto energia termica collettori solari all'accumulo (valore medio orario)
- TANK_TO_LOAD – contributo accumulo solare al fabbisogno edificio

Nell'esempio considerato abbiamo:

- ✓ Tra le 7:20 e le 8:40 (intervallo 3-4) la temperatura sulla parte alta dell'accumulo rimane invariata intorno ai 73 °C a fronte di una richiesta di calore da parte dell'edificio. Nella parte inferiore dell'accumulo invece la temperatura si abbassa da 55,9 °C a 40,5 °C (intervallo 3-4) come conseguenza del prelievo di calore per 27 kWh. Se consideriamo che tutto il volume d'acqua sia ad una temperatura media di circa 65-70 °C otteniamo che circa 2/3 dell'energia sensibile dell'accumulo viene utilizzata.
- ✓ Tra le 8:40 e le 10:20 (intervallo 4-1) la temperatura superiore dell'accumulo si porta a 43,4 °C (quella inferiore rimane pressoché costante) a fronte di un prelievo netto di 19 kWh (vedi linea tratteggiata); tale valore è coerente con l'energia residua dell'accumulo (1/3 su 45 kWh).
- ✓ Tra le 10:20 e le 15:00 la temperatura superiore passa da 43,6 °C a 75,3 °C e quella inferiore da 40,5 °C a 74,0 °C con profili con pendenza abbastanza costante.
- ✓ Dopo le 15:00 un flusso netto in uscita di calore di 5 kWh porta la temperatura a ridursi di circa 3 °C; si osserva poi, dopo una prima riduzione netta della TE08 per effetto della stratificazione e della presenza delle connessioni in/out, che i profili di temperatura TE08 e TE07 decrescono con la stessa leggera pendenza rispettivamente da 75,3 °C a 69,4 °C e da 63 °C a 50,3 °C fino alle ore 7:00 del giorno successivo (nel grafico la curva viene troncata alle ore 24:00).

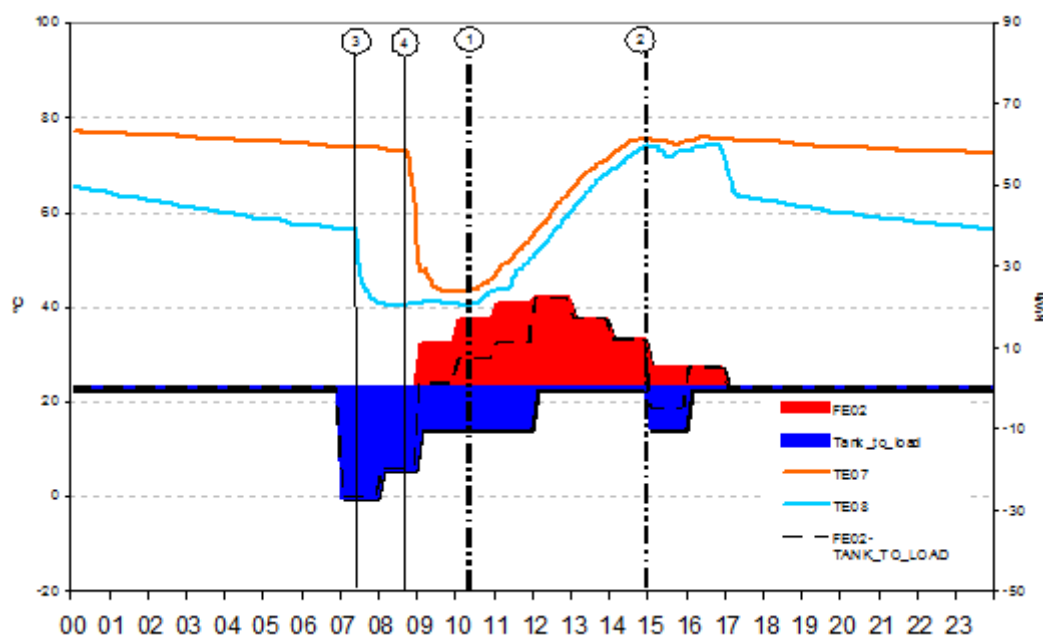


Figura 59. Accumulo STD - 2 aprile 2012. Carica dell'accumulo (1-2)

Estrapolando i dati ottenuti durante la campagna di misura del 2012 è stato possibile costruire la Tabella 15 in sono stati messi a confronto 4 giorni nell'intervallo temporale dal 13 marzo al 15 aprile come segue:

- **FUNZIONAMENTO GIORNALIERO:** è riportata l'energia fornita dal solare all'accumulo (FE02) e quella che l'accumulo ha fornito all'edificio (TANK_TO_LOAD) nell'arco delle 24 ore; per differenza viene calcolato il contributo netto all'accumulo.
- **FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO:** nell'arco della giornata è stato isolato l'intervallo (vedi Figura 59, intervallo 1-2) in cui l'accumulo si carica per effetto dell'apporto solare con o senza contemporaneo prelievo di calore verso l'utenza. E' stato quindi calcolato il calore netto fornito all'accumulo mediante 1° principio della termodinamica³ utilizzando la temperatura media all'inizio del processo e alla fine (TANK - TOTALE CALCOLATO).
(Nota ³: Vengono trascurate le perdite di calore per dissipazione attraverso il contenitore)
- Il dato confrontato con il valore misurato dal misuratore CONTATERMIE (TANK - TOTALE MISURATO) risulta avere uno scostamento percentuale sul valore misurato sempre in difetto (calore calcolato con profili di temperatura inferiore a quello desunto dalle misure con contatori) compreso tra l'11% e il 18%. Tale minor calore può attribuirsi in parte all'effetto delle dispersioni termiche sulla linea tra scambiatore solare SC01 ed accumulo ed in parte alle dispersioni termiche lungo la linea tra accumulo e termodotto⁴.
(Nota ⁴: Il calore fornito dall'accumulo, TANK_TO_LOAD, viene stimato come differenza tra fabbisogno dell'edificio, misurato all'inizio del termodotto dalla sonda FE07, e calore fornito dalla caldaia FE03; quindi il calore calcolato come differenza ingloba anche le dispersioni di calore lungo la linea tra sonda FE03 (locale caldaia) e scambiatore SC02)

Tabella 15. Fase di carica dell'accumulo durante la climatizzazione invernale dell'edificio (anno 2012): confronto tra energia accumulata calcolata sulla base dei dati di temperatura e misurata con

CONTATERMIE

			15/03/2012	29/03/2012	02/04/2012	12/04/2012		
FUNZIONAMENTO GIORNALIERO		FE02	[kWh]	149.1	140.2	110	133	
			[MJ]	536.8	504.7	396	478.8	
		TANK_TO_LOAD	[kWh]	-93.0	-63.0	-87	-89	
			[MJ]	-334.8	-226.8	-313.2	-320.4	
		TANK	[kWh]	56.1	77.2	23	44	
			[MJ]	202.0	277.9	82.8	158.4	
FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO 2012	INIZIO	TIME	[h]	10.00	10.30	10.20	9.00	
		TE07	[°C]	41.3	48.5	43.6	35.7	
		TE08	[°C]	36.4	43.0	40.5	33.2	
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	38.9	45.8	42.05	34.45	
	FINE	TIME	[h]	16.00	17.00	15.00	17.10	
		TE07	[°C]	81.8	93.9	75.3	70.1	
		TE08	[°C]	79.8	92.6	74.0	68.1	
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	80.8	93.3	74.7	69.1	
	ENERGIE	A - TANK - TOTALE CALCOLATO		[kWh]	73.2	82.9	56.9	60.4
				[MJ]	263.5	298.3	204.7	217.6
		FE02		[kWh]	118.1	111.1	89.0	131.0
				[MJ]	425.2	400.0	320.4	471.6
		TANK_TO_LOAD		[kWh]	-30.0	-10.0	-20.0	-63.0
				[MJ]	-108.0	-36.0	-72.0	-226.8
		B - TANK - TOTALE MISURATO		[kWh]	88.1	101.1	69.0	68.0
				[MJ]	317.2	364.0	248.4	244.8
		TANK - TOTALE [A-B]	[kWh]	-14.9	-18.2	-12.1	-7.6	
			[%]	-16.9%	-18.0%	-17.6%	-11.1%	

La stessa metodologia seguita per il 2012 è stata applicata in Tabella 16 per l'anno 2013 considerando 6 giorni selezionati nell'intervallo dal 13 marzo al 15 aprile per l'impianto con accumulo PCM. Come già fatto in precedenza, nell'arco della giornata è stato isolato l'intervallo (Figura 60, intervallo 1-2) in cui l'accumulo si carica per effetto dell'apporto solare con o senza contemporaneo prelievo di calore verso l'utenza.

E' stato quindi calcolato il calore netto fornito all'accumulo mediante 1° principio della termodinamica⁵ utilizzando la temperatura media all'inizio e alla fine del processo (TANK – SENSIBILE). Il dato confrontato con il valore estrapolato (TANK – TOTALE) come somma algebrica tra l'energia FE02 e TANK_TO_LOAD risulta in questo caso avere uno scostamento non trascurabile e sempre positivo variabile da 10,4 a 19,3 kWh.

(Nota ⁵: Al lordo di eventuali perdite per dissipazione attraverso l'involucro del serbatoio)

Tale scostamento è indicato alla voce PCM [B-A] ed è attribuibile al contributo latente/sensibile dei PCM. Tuttavia, il contributo così stimato va corretto per lo scostamento percentuale medio rilevato nelle misure dell'accumulo standard nel 2012 (vedi Tabella 15). Il risultato è evidenziato alla voce PCM [B'-A] il contributo varia ora tra 2.1 e 10.6 kWh: sulla totale energia accumulata, la quota relativa ai PCM varia, per tutti i giorni considerati, tra 5 e 34% in funzione del calore accumulato e dello stato dei tubi di calore all'inizio del processo di carica.

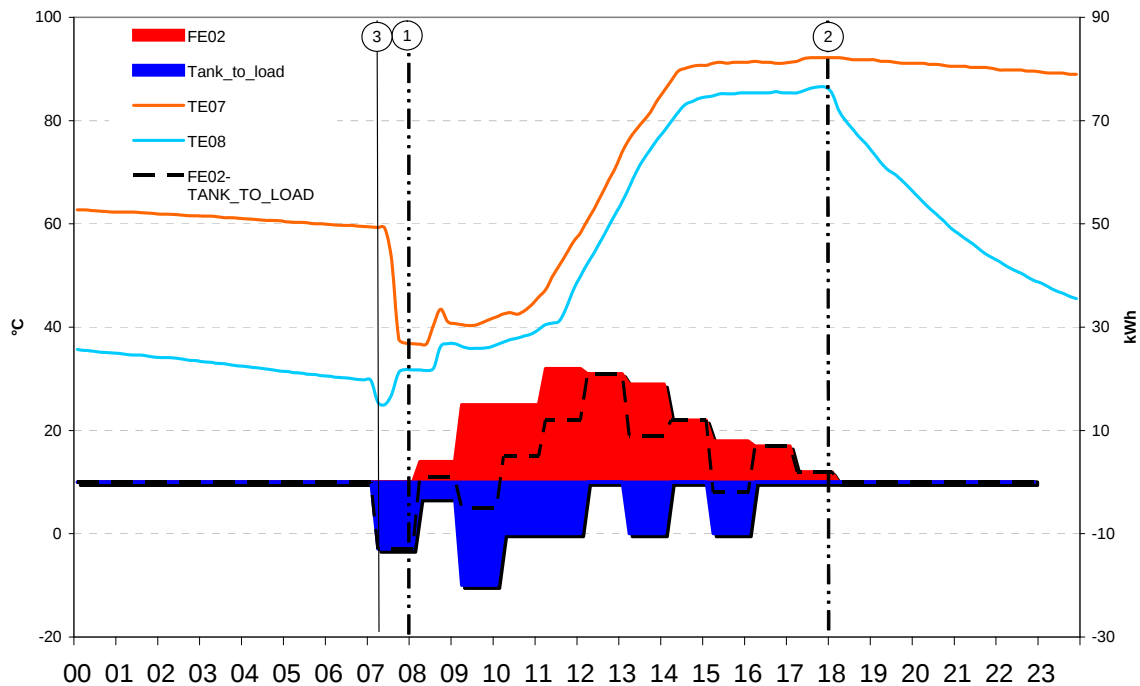


Figura 60. Accumulo PCM - 13 aprile 2013. Carica dell'accumulo (1-2)

Tabella 16. Fase di carica dell'accumulo durante la climatizzazione invernale dell'edificio (anno 2013). Confronto tra energia accumulata calcolata sulla base dei dati di temperatura e misurata con CONTATERMIE

			16/03/2013	21/03/2013	22/03/2013	13/04/2013	14/04/2013	15/04/2013	
FUNZIONAMENTO O GIORNALIERO		FE02	[kWh]	176.0	178.1	156	125.0	80	78.1
			[MJ]	633.6	641.16	561.6	450.0	288	281.16
		TANK_TO_LOAD	[kWh]	-156.0	-155	-125.7	-76.0	-71	-55
			[MJ]	-561.6	-558	-452.52	-273.6	-255.6	-198
		TANK - TOTALE	[kWh]	20.0	23.1	30.3	49.0	9	23.1
			[MJ]	72.0	83.16	109.08	176.4	32.4	83.16
FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO 2013	INIZIO	TIME	[h]	10.00	10.00	10.00	8.00	9.00	8.20
		TE07	[°C]	39.0	39.8	40.9	36.8	44.8	38
		TE08	[°C]	31.5	32.7	34.4	31.7	39.5	35.7
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	36.2	37.1	38.4	34.9	42.8	37.1
	FINE	TIME	[h]	15.30	15.30	16.30	18.00	13.20	15.30
		TE07	[°C]	64.8	66.2	77.7	92.2	92.6	93.0
		TE08	[°C]	58.7	59.9	70.8	85.4	86.0	86.5
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	62.5	63.8	75.1	89.6	90.1	90.5
	A - TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	20.5	20.8	28.6	42.7	36.9	41.7	
		[MJ]	74.0	75.0	102.9	153.8	132.9	150.0	
	ENERGIE	FE02	[kWh]	133.0	131.1	119.0	125.0	68.0	72.1
			[MJ]	478.8	472.0	428.4	450.0	244.8	259.6
		TANK_TO_LOAD	[kWh]	-96.0	-100	-80.0	-63.0	-20.0	-20.0
			[MJ]	-345.6	-360	-288.0	-226.8	-72.0	-72.0
		B - TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	37.0	31.1	39.0	62.0	48.0	52.1
			[MJ]	133.2	112.0	140.4	223.2	172.8	187.6
		B' - TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO	[kWh]	31.1	26.2	32.8	52.1	40.4	43.8
			[MJ]	112.0	94.1	118.1	187.7	145.3	157.7
	PCM [B-A]		[kWh]	16.5	10.3	10.4	19.3	11.1	10.4
			[MJ]	59.2	37.0	37.5	69.4	39.9	37.5
	PCM CORRETTO [B'-A]		[kWh]	10.6	5.3	4.2	9.4	3.5	2.1
			[MJ]	38.0	19.1	15.1	33.9	12.4	7.7
	PCM CORRETTO / TANK - TOT.MISURATO CORRETTO [(B'-A)/B']		[%]	34%	20%	13%	18%	9%	5%

PROCESSO DI CARICA E SCARICA DEL SERBATOIO PCM

I risultati relativi al processo di carica diurna e scarica serale dell'accumulo PCM, effettuati a partire dal 16 aprile e fino al 5 maggio 2013, vengono illustrati in Figura 5 (19 aprile 2013):

- L'accumulo alle ore 8:20 si trova ad una temperatura nella parte più calda inferiore a 40 °C⁶. Siamo quindi al di sotto della temperatura di fusione caratteristica del PCM pari a 46 °C. Il PCM è in fase solida.
(Nota ⁶: In particolare, la temperatura si mantiene sotto i 43 °C a partire dalle 2:00, quindi per più di 6 ore)
- Nella prima fase di carica diurna (1-2) l'accumulo riceve dalle ore 8:20 alle ore 13:00 energia pari a 60 kWh rappresentata dall'area rossa nella parte inferiore del grafico; tale energia porta la temperatura interna media dell'accumulo da 36,4 °C a 90,4 °C. La pendenza simile tra i due profili di temperatura non mette in evidenza la presenza del PCM nella parte bassa dell'accumulo. Tuttavia, il calore sensibile fornito al volume interno effettivo d'acqua di 671 l è pari a 42,1 kWh. La differenza di energia tra 42,1 kWh e 60 kWh (17,9 kWh) è imputabile all'effetto di carica dei PCM.

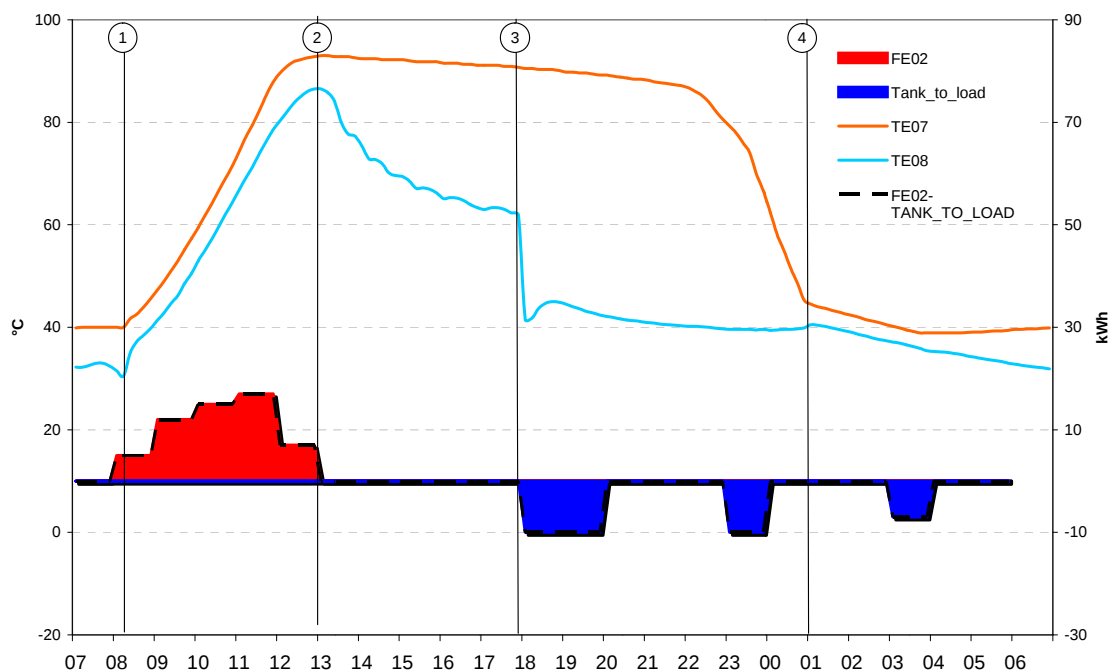


Figura 61. Accumulo PCM - 19 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2); 1° scarica accumulo (2-3); 2° scarica accumulo (3-4)

- Nelle successive 5 ore (2-3) non vi sono flussi di calore in ingresso o uscita dall'accumulo e la temperatura della parte alta rimane pressoché inalterata fino alle ore 18:00 abbassandosi leggermente a 90,7 °C.
- Nello stesso intervallo di tempo la temperatura della parte inferiore dell'accumulo varia invece vistosamente portandosi alle ore 18:00 al valore di 61,9 °C (1° FASE DI SCARICA DELL'ACCUMULO); questo effetto può essere principalmente ricondotto all'assorbimento di calore latente/sensibile (surriscaldamento di parte del PCM fuso) dei tubi PCM. Il profilo non è ben definito e si notano dei punti in cui la temperatura tende a rimanere costante per poi ridiscendere: possiamo quindi ipotizzare che vi sia l'effetto di fusione del PCM nella parte inferiore del tubo unito alla successiva

migrazione del materiale fuso verso la parte superiore. Tale processo induce uno scambio discontinuo e quindi un profilo irregolare.

- Inoltre, se andiamo a considerare il volume di acqua presente tra il fasciame di tubi (separato tra l'altro dalla parte superiore dell'accumulo da una piastra per la tenuta in posizione dei tubi) troviamo che esso è pari a 254 l. Ipotizzando che l'energia scambiata tra acqua e tubi sia relativa alla metà inferiore dei tubi (127 l) otteniamo un'energia assorbita pari a circa 14,3 MJ (pari a 4 kWh, che sommati ai precedenti 17,9 kWh sono l'energia necessaria ai PCM per passare da 40 °C a completa fusione⁷).
(Nota ⁷: Possiamo ipotizzare che i PCM siano solidi o quasi completamente solidi all'inizio del processo di carica essendo l'acqua nell'accumulo nella parte più bassa rimasta ad una temperatura intorno ai 40 °C per 9-10 ore e con un prelievo di 10 kWh tra le 21:00 e le 22:00 del 18/04/2013 e la temperatura della parte alta sotto i 40 °C per 5 ore)
- Tra le 18:00 e le 20:00 (3-4) vengono prelevati dall'accumulo 20 kWh di energia termica (vedi area blue) che si traducono in un abbassamento brusco della temperatura inferiore dell'accumulo da 61,9 °C a 41,8 °C. Nello stesso arco di tempo, però, si nota anche un aumento momentaneo della temperatura (45,0 °C) probabilmente dovuto al rimescolamento tra acqua immessa e acqua dell'accumulo. Se consideriamo la temperatura di ritorno dal termodotto intorno ai 45 °C⁸ possiamo stimare un prelievo d'acqua di circa 400 l pari al volume d'acqua sopra i PCM.
(Nota ⁸: Le temperature di mandata e ritorno termodotto rilevate dalle sonde di temperatura TE19 e TE20 sono molto simili e con valore costante intorno ai 45-46 °C)
- Tra le 20:00 e le 22:30 l'accumulo rimane ben stratificato fino ad un ulteriore prelievo di energia di 10 kWh tra le 23:00 e le 24:00: se consideriamo la temperatura di ritorno dal termodotto verso l'accumulo di 45°C otteniamo un prelievo d'acqua dall'accumulo di circa 200 l; tale quantità d'acqua unita a quella già prelevata prima delle 20:00 è pari a circa il 90% del volume d'acqua dell'accumulo; infatti, si assiste ad una progressiva riduzione di temperatura (2° FASE DI SCARICA DELL'ACCUMULO), per effetto del rimescolamento interno, fino ad una temperatura di 45,3 °C prossima a quella della parte bassa dell'accumulo di 39,9 °C. Tale riduzione è marginalmente legata alla presenza nell'accumulo dei PCM (2,8 kWh).

Nella Tabella 17 vengono presentati i dati della campagna di misura sull'impianto con accumulo PCM riassunti ed elaborati per 6 giorni, selezionati nell'intervallo dal 16 aprile al 5 maggio 2013 come già fatto per i dati dell'impianto in fase di climatizzazione invernale. Il totale calore corretto accumulato dai tubi PCM, calcolato come differenza tra energia netta accumulata misurata (TANK TOTALE MISURATO = FE02 + TANK_TO_LOAD) ed energia netta accumulata calcolata (come incremento di temperatura dell'accumulo tra l'inizio e la fine dell'intervallo considerato) risulta variabile tra 12,2 e 19,9 kWh. Se consideriamo solo la fase di carica dell'accumulo (intervallo 1-2) notiamo come il contributo corretto dei PCM è tutto sommato costante e compreso tra 20 e 24% del totale calore accumulato. Essendo il contributo latente pari al 21% della totale capacità termica è verosimile che in qualche caso i PCM riescano completamente a fondere portandosi a lavorare a temperatura superiore ai 46 °C nella parte inferiore.

Tabella 17. Fase di carica e scarica diurna dell'accumulo: stima del contributo del PCM

				19/04/2013	24/04/2013	28/04/2013	29/04/2013	03/05/2013	04/05/2013
FASE DI CARICA ACCUMULO	INIZIO	ORA	[h]	8.20	9.00	8.00	8.30	8.00	8.00
		TE07	[°C]	40	38.3	36.2	40.6	39.9	40.8
		TE08	[°C]	30.5	25.8	24	32.1	29.7	31.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	36.4	33.6	31.6	37.4	36.0	37.4
	FINE	ORA	[h]	13.00	13.20	13.30	13.00	12.50	12.50
		TE07	[°C]	92.8	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0
		TE08	[°C]	86.5	85.4	85.8	85.8	83.9	84.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	90.4	90.1	90.3	90.3	89.5	89.9
	TOTALE	FE02	[kWh]	60.0	61.7	62.0	55.0	56.0	55.1
			[MJ]	216.0	222.0	223.2	198.0	201.6	198.4
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	60.0	61.7	62.0	55.0	56.0	55.1
			[MJ]	216.0	222.0	223.2	198.0	201.6	198.4
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	42.1	44.1	45.8	41.3	41.8	41.0	
		[MJ]	151.7	158.9	164.9	148.6	150.3	147.5	
		0 - PCM	[kWh]	17.9	17.5	16.2	13.7	14.2	14.1
			[MJ]	64.3	63.1	58.3	49.4	51.3	50.9
1° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	ORA	[h]	13.00	13.20	13.30	13.00	12.50	12.50
		TE07	[°C]	92.8	93	93	93	93	93
		TE08	[°C]	86.5	85.4	85.8	85.8	83.9	84.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	90.4	90.1	90.3	90.3	89.5	89.9
	FINE	ORA	[h]	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
		TE07	[°C]	90.7	90.9	91.1	90.9	90.5	90.5
		TE08	[°C]	61.9	62.3	63.6	65.7	61.1	62.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	85.3	85.6	86.0	86.2	85.0	85.3
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	-4.0	-3.5	-3.3	-3.2	-3.5	-3.6	
		[MJ]	-14.3	-12.8	-12.1	-11.4	-12.7	-12.8	
		1 - PCM	[kWh]	4.0	3.5	3.3	3.2	3.5	3.6
			[MJ]	14.3	12.8	12.1	11.4	12.7	12.8
2° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	TIME	[h]	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
		TE07	[°C]	90.7	90.9	91.1	90.9	90.5	90.5
		TE08	[°C]	61.9	62.3	63.6	65.7	61.1	62.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	85.3	85.6	86.0	86.2	85.0	85.3
	FINE	TIME	[h]	1.00	20.00	20.00	1.30	1.30	1.20
		TE07	[°C]	45.3	42.4	39.8	43.8	45.3	44.2
		TE08	[°C]	39.9	39.5	37.4	40.5	39.5	39.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	43.3	41.3	38.9	42.5	43.1	42.5
	TOTALE	TANK_TO_LOAD	[kWh]	-30.0	-40.0	-40.0	-30.0	-30.0	-30.0
			[MJ]	-108.0	-144.0	-144.0	-108.0	-108.0	-108.0
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	-30.0	-40.0	-40.0	-30.0	-30.0	-30.0
			[MJ]	-108.0	-144.0	-144.0	-108.0	-108.0	-108.0
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	-32.8	-34.5	-36.7	-34.1	-32.7	-33.4	
		[MJ]	-118.2	-124.3	-132.3	-122.6	-117.8	-120.3	
		2 - PCM	[kWh]	2.8	-5.5	-3.3	4.1	2.7	3.4
			[MJ]	10.2	-19.7	-11.7	14.6	9.8	12.3
	A - TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	30.0	21.7	22.0	25.0	26.0	25.1	
		[MJ]	108.0	78.0	79.2	90.0	93.6	90.4	
	A' - TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO	[kWh]	25.2	18.2	18.5	21.0	21.9	21.1	
		[MJ]	90.8	65.6	66.6	75.7	78.7	76.0	
B - TANK - TOTALE CALCOLATO	[kWh]	5.3	6.0	5.7	4.0	5.5	4.0		
	[MJ]	19.3	21.7	20.6	14.5	19.9	14.3		
PCM TOTALE [0+1+2] [A-B]	[kWh]	24.7	15.6	16.3	21.0	20.5	21.1		
	[MJ]	88.7	56.3	58.6	75.5	73.7	76.0		
PCM TOTALE CORRETTO[A'-B]	[kWh]	19.9	12.2	12.8	17.0	16.3	17.1		
	[MJ]	71.6	43.8	46.0	61.2	58.9	61.6		
0-PCM / TANK TOTALE MISURATO CORRETTO (FASE DI CARICA)			[%]	24%	22%	21%	20%	20%	21%

La campagna di misure considerata è composta di 2 fasi:

1. misure con funzionamento in climatizzazione invernale (dal 13 marzo al 15 aprile);
2. misure con processo di carica/scarica controllato dell'impianto.

A valle della prima fase è stato possibile confrontare i dati con quelli del 2012 già rilevati in precedenza: emerge un comportamento simile per il periodo 1-15 aprile che risulta essere più confrontabile dal punto di vista delle condizioni meteorologiche. In particolare, i valori assunti dall'indice "energia fornita all'utenza per grado giorno" confermano il comportamento simile dei due accumuli (leggermente peggiorativo per l'accumulo PCM, che pure presenta un ingombro inferiore di un terzo rispetto al serbatoio std). Se osserviamo la massima energia accumulata, troviamo 82,9 kWh per l'accumulo standard e 62 kWh per quello PCM: quindi esattamente proporzionale alle capacità teoriche calcolate (vedi Tabella 3).

La seconda fase ha permesso di analizzare nel dettaglio il comportamento dei tubi PCM in fase di carica, già evidenziato durante la climatizzazione invernale dell'edificio: su un potenziale di accumulo di 32 kWh (di cui latenti 17,8 kWh) si riescono a raggiungere 17,9 kWh (14,4 kWh corretti) con la 1° fase di carica alla quale si aggiungono altri 6,8 kWh (5,5 kWh corretti) nelle successive fasi di scarica dell'accumulo (carica dei PCM). Osservando anche il calore accumulato dai PCM durante la carica/scarica in fase di climatizzazione dell'edificio si ottengono 10,6 kWh: risulta quindi utilizzata una quantità di calore inferiore al calore latente di fusione/solidificazione dei PCM.

3 Il solar cooling

I dati sperimentali relativi al monitoraggio estivo dell'impianto sono stati acquisiti durante il periodo 01 giugno-15 settembre 2012, per il quale si è deciso di far funzionare l'impianto in modo intermittente (funzionamento intermittente: ore 9.00-19.00). Le grandezze indagate riguardano sia la produzione di acqua calda utilizzata per alimentare termicamente il gruppo frigo ad assorbimento, e quindi la parte d'impianto costituita dall'accumulo caldo originario, dal campo solare, dalla caldaia integrativa e dai rispettivi scambiatori di calore, sia la produzione di acqua refrigerata e quindi la parte d'impianto costituita dal gruppo frigo, dall'accumulo freddo e dal termodotto.

Durante il monitoraggio estivo, oltre a quanto riportato in Tabella 18 per il periodo invernale, è stato necessario anche monitorare i contatermie a servizio del gruppo frigo ad assorbimento:

Tabella 18. Codici identificativi contatermie installati per monitoraggio estivo

Legenda	
Month/Day	Istante di acquisizione
FE04	Energia termica smaltita da torre evaporativa [kWh]
FE05	Energia termica in ingresso al gruppo frigo [kWh]
FE06	Energia frigorifera prodotta [kWh]

Di seguito si riporta uno schema semplificato di funzionamento dell'impianto in modalità cooling nel quale vengono evidenziati i contatermie per la contabilizzazione dei flussi energetici relativi alla produzione di energia termica e di energia frigorifera (Figura 62).

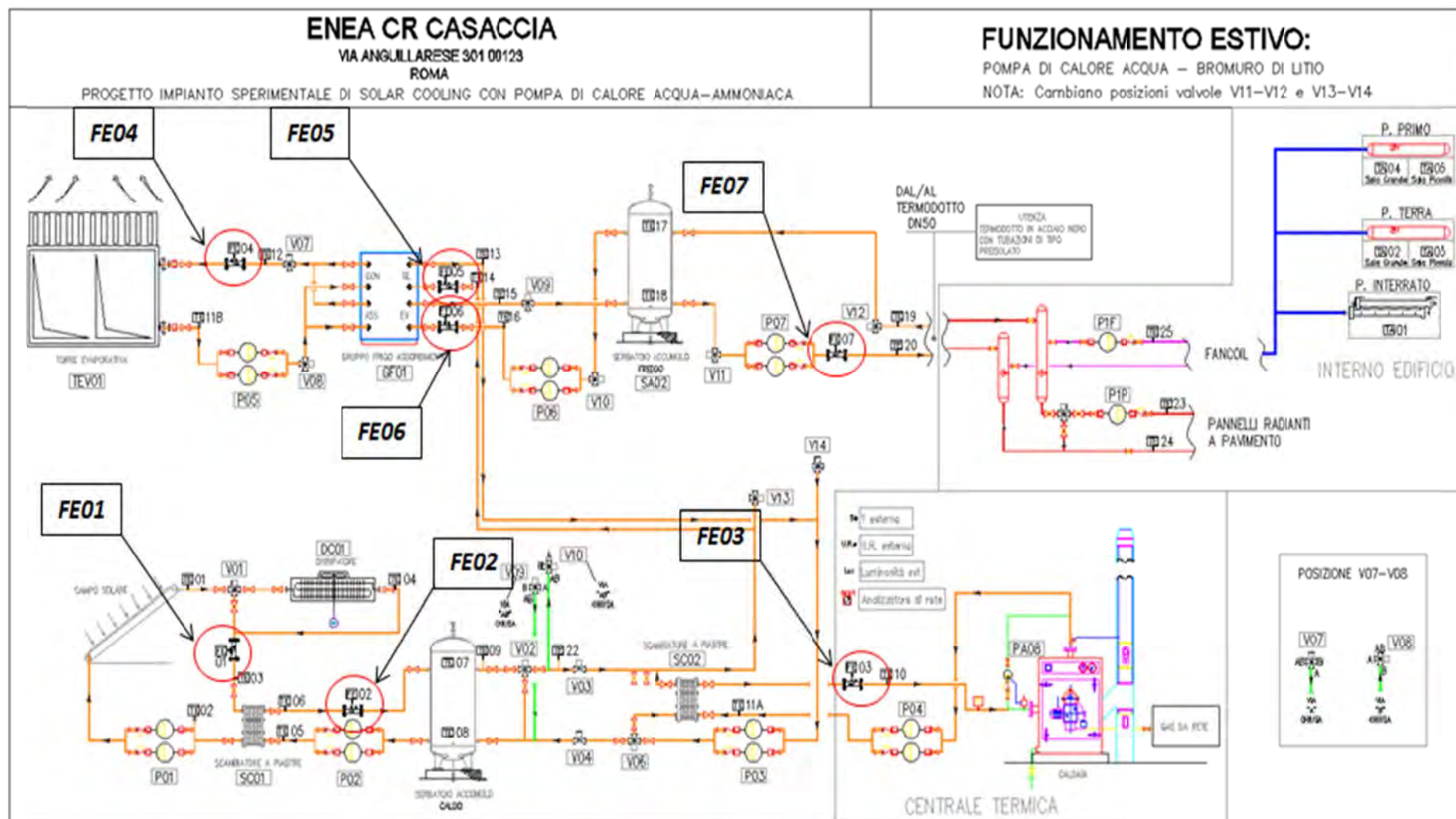


Figura 62. Schema semplificato impianto in modalità solar cooling situato presso il CR Enea Casaccia (Roma), con dettaglio contatermie

3.1 Analisi dati sperimentali del monitoraggio estivo 2012

Il primo monitoraggio estivo dell'impianto di solar heating and cooling posto a servizio dell'edificio F-92 è stata effettuato durante il periodo compreso tra l'1 giugno 2012 ed il 15 settembre 2012 in accordo con quanto stabilito dal D.P.R. 412/93 per la zona climatica D in cui l'impianto risulta essere ubicato. Il monitoraggio estivo effettuato nel 2012 è stato caratterizzato dalla presenza del serbatoio d'accumulo classico essendo la sostituzione di questo ultimo avvenuta nel mese di marzo del 2013. Di seguito è riportata l'analisi dettagliata mensilmente del monitoraggio estivo 2012 dell'impianto funzionante in modalità cooling.

3.1.1 Periodo di monitoraggio 1 Giugno -30 Giugno 2012

Il primo mese monitorato con l'impianto funzionante in modalità cooling è stato caratterizzato da una diffusa nuvolosità e da temperature dell'aria esterna contenute, soprattutto nei primi 15 giorni del mese caratterizzati da una bassa richiesta di energia frigorifera da parte dell'edificio (Tabella 19). Il profilo di funzionamento dell'impianto è di tipo discontinuo cioè dalle ore 9 alle ore 19.

Tabella 19. Riepilogo prestazioni dell'impianto durante il mese di Giugno 2012

JUNE 2012

Thermal energy to Absorption chiller (FE05)	3200	kWh	100%
Energy contribution of gas boiler (FE03)	854	kWh	27%
Energy contribution of solar field	2346	kWh	73%
Cool energy produced by absorption chiller (FE06)	1882	kWh	
Energy dissipated by evaporative tower (FE04)	5232	kWh	
Energy produced by solar field and stored in tank (FE02)	3516	kWh	
Energy building request (FE07)	1490	kWh	
COPmedium Absorption chiller	0,588	[-]	

L'andamento dell'energia frigorifera prodotta dal gruppo frigo ad assorbimento rispecchia l'andamento della richiesta dell'edificio; in Figura 63 sono riassunti gli output e gli input energetici al gruppo frigo ad assorbimento: energia termica richiesta dal gruppo frigo ad assorbimento, necessaria per la produzione di acqua refrigerata, energia termica dissipata dalla torre evaporativa per chiudere il ciclo termodinamico ed infine l'energia frigorifera prodotta dal chile. In Figura 106 è fornito un riepilogo del funzionamento del gruppo frigo ad assorbimento per il mese considerato per il quale il COP reale medio in funzionamento è stato $COP=0,588$; da notare come questo coefficiente sia molto dipendente dalla modalità di funzionamento della macchina: nei primi 15 giorni del mese i frequenti on-off a cui la macchina è stata sottoposta, a causa delle basse richieste d'acqua refrigerata da parte dell'edificio, hanno portato ad un $COP=0,54$; invece nella seconda metà del mese, con l'arrivo di un "clima più estivo" e le conseguenti maggiori richieste di energia frigorifera, le prestazioni della macchina sono migliorate con il raggiungimento di un $COP=0,61$. Il mese di giugno 2012 è stato infatti caratterizzato da una bassa temperatura media mensile dell'aria esterna ($24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

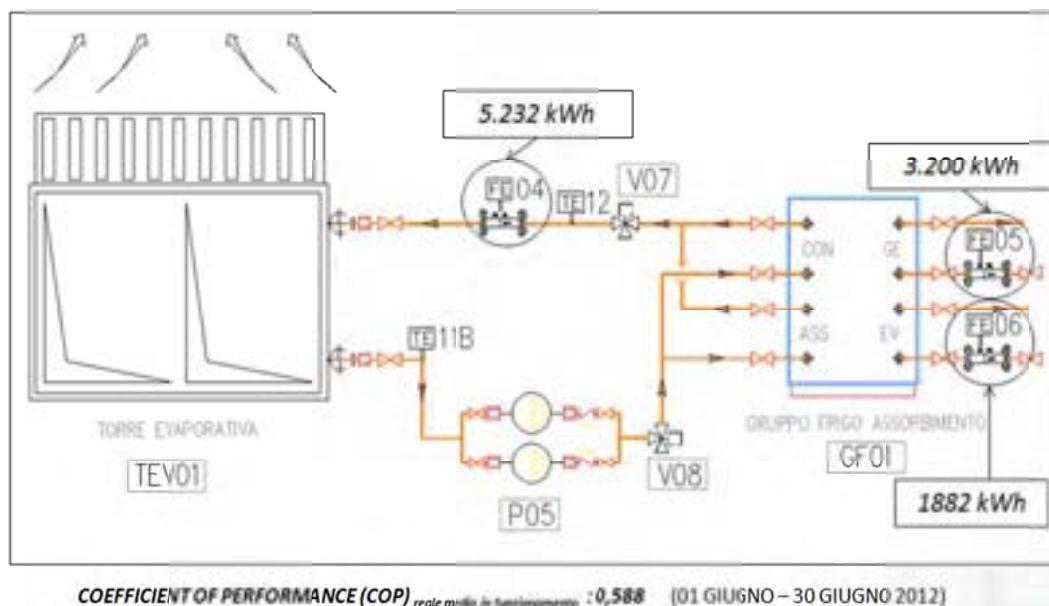


Figura 63. COP gruppo frigo assorbimento dall' 1 al 30 Giugno 2012

L'energia termica in ingresso all'assorbitore è prodotta, a seconda dell'irradianza solare incidente sui pannelli, dal campo solare oppure dalla caldaia integrativa. Per il mese di Giugno il fabbisogno di energia termica dell'assorbitore è stato coperto per il 73% dal campo solare e per il resto dalla caldaia (Figura 64).

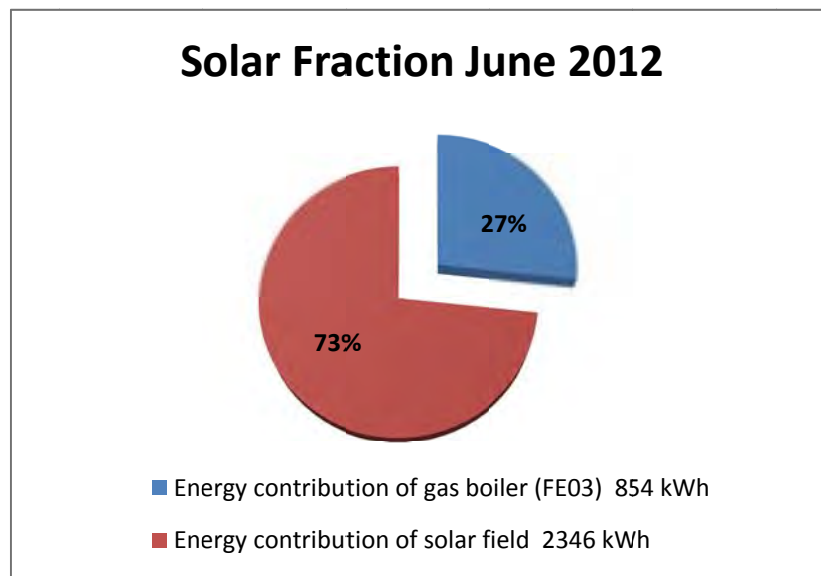


Figura 64. Frazione solare ottenuta per il periodo 1 al 30 Giugno 2012

3.1.2 Periodo di monitoraggio 1 Luglio -31 Luglio 2012

A luglio 2012 il clima è migliorato, con giornate prevalentemente soleggiate e con temperature in linea con i valori stagionali. Il valore della temperatura media mensile dell'aria esterna si è infatti attestato al valore di 27°C. Il fabbisogno energetico dell'edificio è stato maggiore rispetto al mese precedente (Tabella 20), ma la macchina è stata in grado di fornire l'acqua refrigerata necessaria (Figura 65), per mantenere le temperature di comfort desiderate nei vari ambienti. Questo giustifica una maggiore richiesta di energia termica da parte del gruppo frigo ad assorbimento e di conseguenza una quota maggiore di energia

dissipata dalla torre evaporativa (Figure 108). Il profilo di funzionamento dell'impianto è di tipo discontinuo cioè dalle ore 9 alle ore 19.

Tabella 20. Riepilogo prestazioni dell'impianto durante il mese di Luglio 2012

JULY 2012

Thermal energy to Absorption chiller (FE05)	4688	kWh	100%
Energy contribution of gas boiler (FE03)	1719	kWh	37%
Energy contribution of solar field	2969	kWh	63%
Cool energy produced by absorption chiller (FE06)	2833	kWh	
Energy dissipated by evaporative tower (FE04)	7898	kWh	
Energy produced by solar field and stored in tank (FE02)	4051	kWh	
Energy building request (FE07)	2480	kWh	
COPmedium Absorption chiller	0,604	[-]	

Durante il mese di luglio 2012 il funzionamento della macchina è stato più regolare senza continui cicli di accensione e spegnimento che ne hanno invece caratterizzato il funzionamento per buona parte del mese di Giugno: si è ottenuto quindi un COP=0,6 (Figura 65).

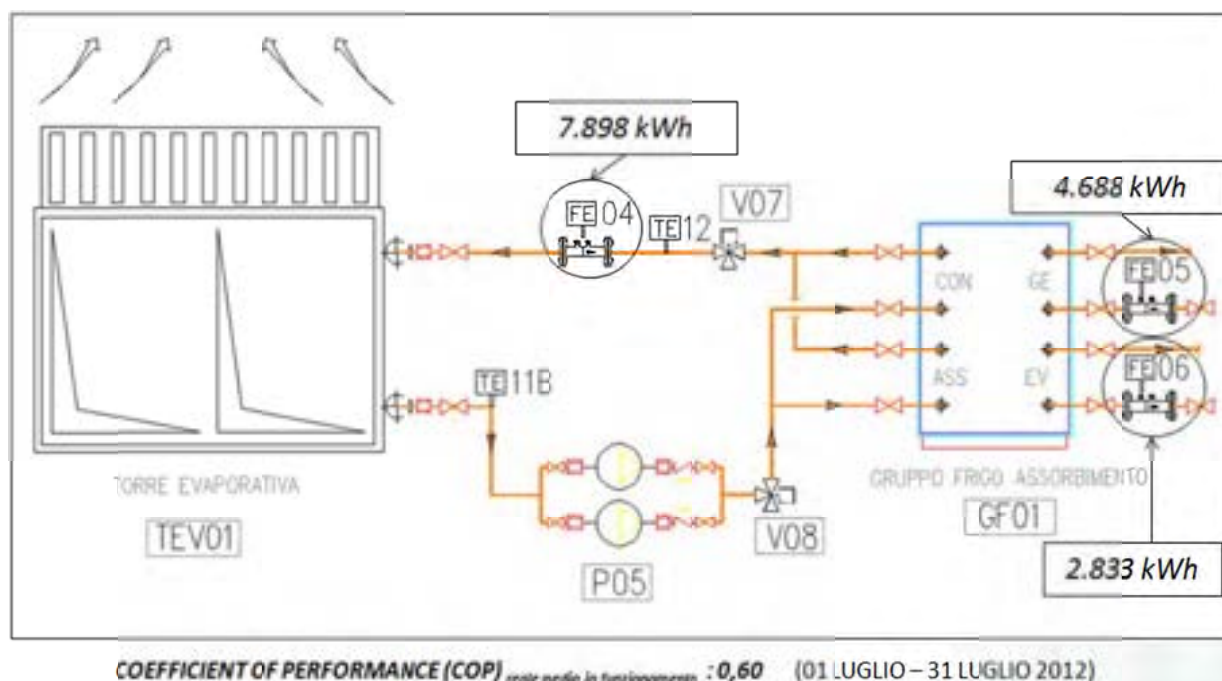


Figura 65. COP gruppo frigo assorbimento dall' 1 al 31 Luglio 2012

Anche per il suddetto mese il fabbisogno del gruppo frigo ad assorbimento è stato coperto per buona parte dal campo solare per un'aliquota del 63% (Figura 66); durante il monitoraggio si è verificato un problema con il contatermie FE02 che in alcuni giorni non ha fornito la lettura dell'energia accumulata nel serbatoio: per sopperire a questa mancanza di dati se ne è effettuata una stima, tenendo conto dei dati dello stesso contatermie in giorni simili.

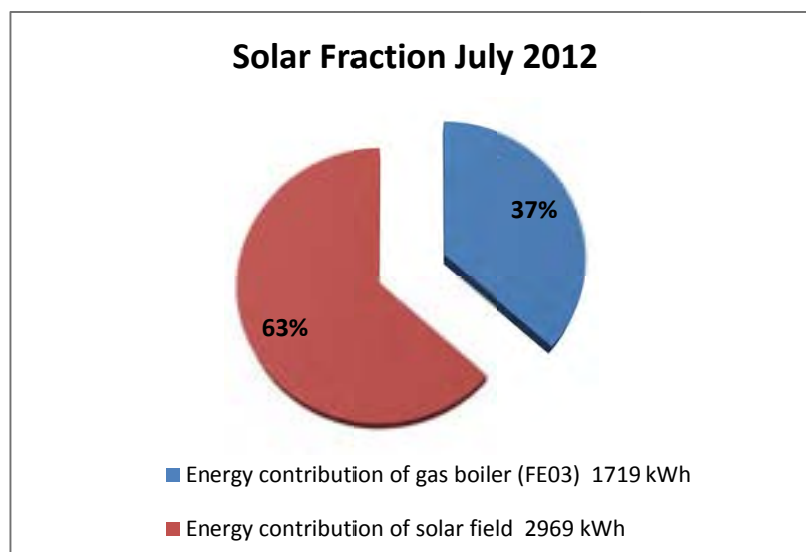


Figura 66. Frazione solare dall' 1 al 31 Luglio 2012

3.1.3 Periodo di monitoraggio 1 Agosto -31 Agosto 2012

Il mese di Agosto 2012 ha mostrato caratteristiche simili a quelle del mese di Luglio 2012, sia per le condizioni climatiche che per le modalità di lavoro della macchina e anche del campo solare. Da segnalare in seguito ad un intervento di manutenzione l'impianto è stato spento il 21 Agosto dalle ore 9 alle ore 14, ed il 22 Agosto per tutto il giorno. Inoltre il giorno 26 Agosto il bruciatore della caldaia è andato in blocco fino al giorno dopo, il che ha fatto sì che il gruppo frigo ad assorbimento funzionasse solo con il campo solare. Il profilo di funzionamento dell'impianto è di tipo discontinuo cioè dalle ore 9 alle ore 19.

Tabella 21. Riepilogo prestazioni dell'impianto durante il mese di Agosto 2012

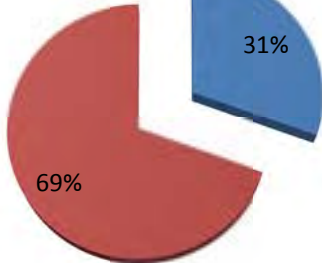
AUGUST 2012

Thermal energy to Absorption chiller (FE05)	4144	kWh	100%
Energy contribution of gas boiler (FE03)	1268	kWh	31%
Energy contribution of solar field	2876	kWh	69%
Cool energy produced by absorption chiller (FE06)	2487	kWh	
Energy dissipated by evaporative tower (FE04)	7166	kWh	
Energy produced by solar field and stored in tank (FE02)	4026	kWh	
Energy building request (FE07)	2170	kWh	
COPmedium Absorption chiller	0,600	[-]	

In seguito a condizioni al contorno molto simili tra il mese di luglio 2012 e di agosto 2012, anche le prestazioni del gruppo frigo ad assorbimento risultano essere simili e sono infatti riassunte da uno stesso valore del COP di 0,6 (Figura 67).



Solar Fraction August 2012



A 3D pie chart titled 'Solar Fraction August 2012'. The chart is divided into two segments: a large red segment representing 69% and a smaller blue segment representing 31%. The segments are slightly exploded from each other. The red segment is labeled '69%' and the blue segment is labeled '31%'. Below the chart is a legend with two entries: a blue square followed by 'Energy contribution of gas boiler (FE03) 1268 kWh' and a red square followed by 'Energy contribution of solar field 2876 kWh'.

Energy Source	Contribution (%)	Energy (kWh)
Energy contribution of gas boiler (FE03)	31%	1268 kWh
Energy contribution of solar field	69%	2876 kWh

Figura 68. Frazione solare dall' 1 al 31 Agosto 2012

Il monitoraggio estivo si è concluso con i primi 15 giorni del mese di Settembre, periodo caratterizzato da precipitazioni e frequente nuvolosità con un repentino abbassamento delle temperature. Il profilo di funzionamento dell'impianto è di tipo discontinuo cioè dalle ore 9 alle ore 19.

Tabella 22. Riepilogo prestazioni dell'impianto durante il mese di Settembre 2012

SEPTEMBER 2012

Thermal energy to Absorption chiller (FE05)	1534	kWh	100%
Energy contribution of gas boiler (FE03)	816	kWh	53%
Energy contribution of solar field	718	kWh	47%
Cool energy produced by absorption chiller (FE06)	829	kWh	
Energy dissipated by evaporative tower (FE04)	2485	kWh	
Energy produced by solar field and stored in tank (FE02)	1221	kWh	
Energy building request (FE07)	660	kWh	
COPmedium Absorption chiller	0,540	[-]	

Di conseguenza il fabbisogno dell'edificio è stato minore, minore la produzione dell'acqua refrigerata e minore la richiesta del gruppo frigo (Tabella 22).

In seguito ad un funzionamento intermittente della macchina, il COP è stato basso rispetto ai mesi precedenti (Figura 69).

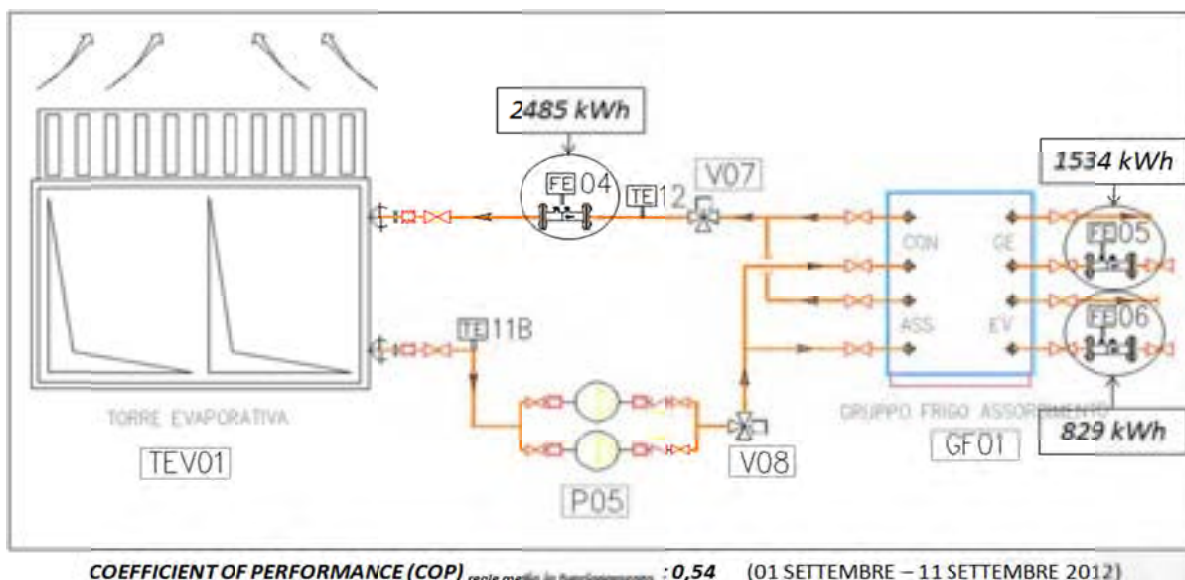


Figura 69. COP gruppo frigo assorbimento dall' 1 al 15 Settembre 2012

Il peggioramento delle condizioni meteo ha fatto sì che il fabbisogno dell'assorbitore fosse soddisfatto in maggior parte dalla caldaia (Figura 70); anche nel mese di settembre si sono verificati dei malfunzionamenti della caldaia che caldaia è stata ferma tutto il giorno 9 a causa del blocco bruciatore, mentre giorno 10 si è verificato un problema che ha interessato il contatermie FE03: esso non ha fornito la lettura dei kWh prodotti quindi il valore di energia corrispondente è stato stimato.

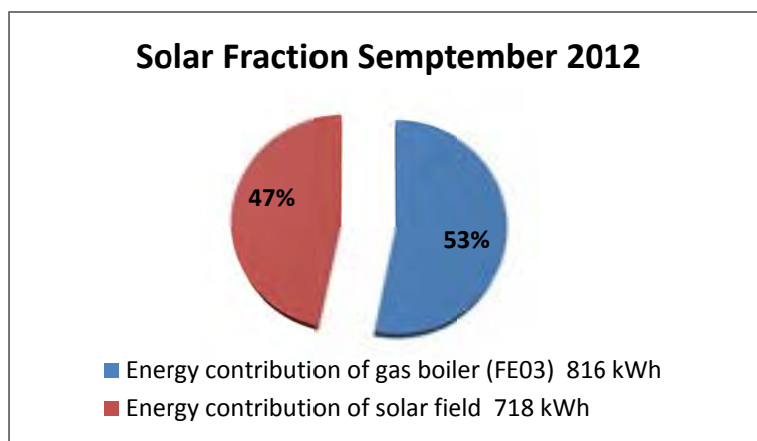


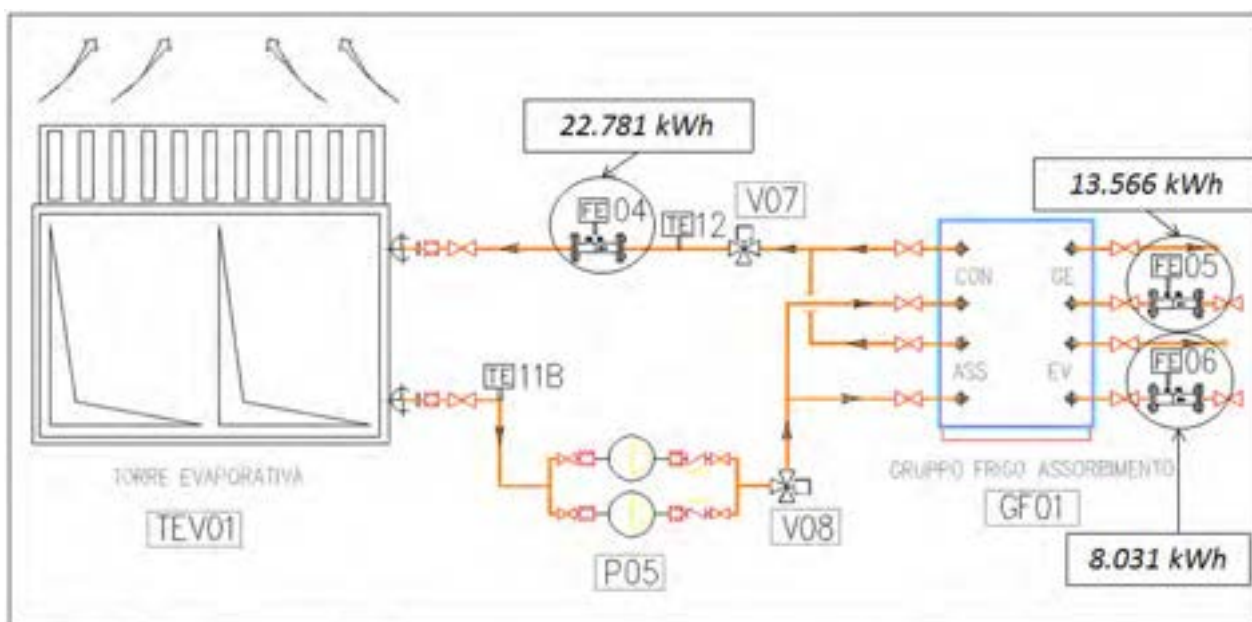
Figura 70. Frazione solare dall' 1 al 15 Settembre 2012

Di seguito vengono riassunti i risultati della stagione estiva 2012 di monitoraggio dell'impianto in modalità solar cooling: i contatermie utilizzati per il monitoraggio dell'impianto consentono di valutare l'energia fornita dal campo solare e l'aliquota fornita invece dalla caldaia integrativa (Figura 71).



Figura 71. Schema produzione e fornitura energia a partire dai collettori solari (estate)

In Figura 72 si riportano i flussi energetici necessari alla valutazione del COP (Coefficient of performance), nelle reali condizioni di funzionamento, del gruppo frigo ad assorbimento:



COEFFICIENT OF PERFORMANCE (COP) *media mensile in funzionamento* : **0,59** (01 GIUGNO – 15 SETTEMBRE 2012)

Figura 72. Valutazione prestazioni reali gruppo frigo ad assorbimento durante il periodo estivo 2012

Rispetto al valore di targa ($COP=0,7$), si è constatato un rendimento inferiore ($COP_{medio}=0,59$) rispetto al valore atteso poiché non sempre il gruppo frigo ha lavorato in condizioni nominali di funzionamento ($T_{acqua\ calda\ in}=88^{\circ}C$). Lavorando con temperatura dell'acqua inferiori, il gruppo riduce di molto il COP (Figura 73):

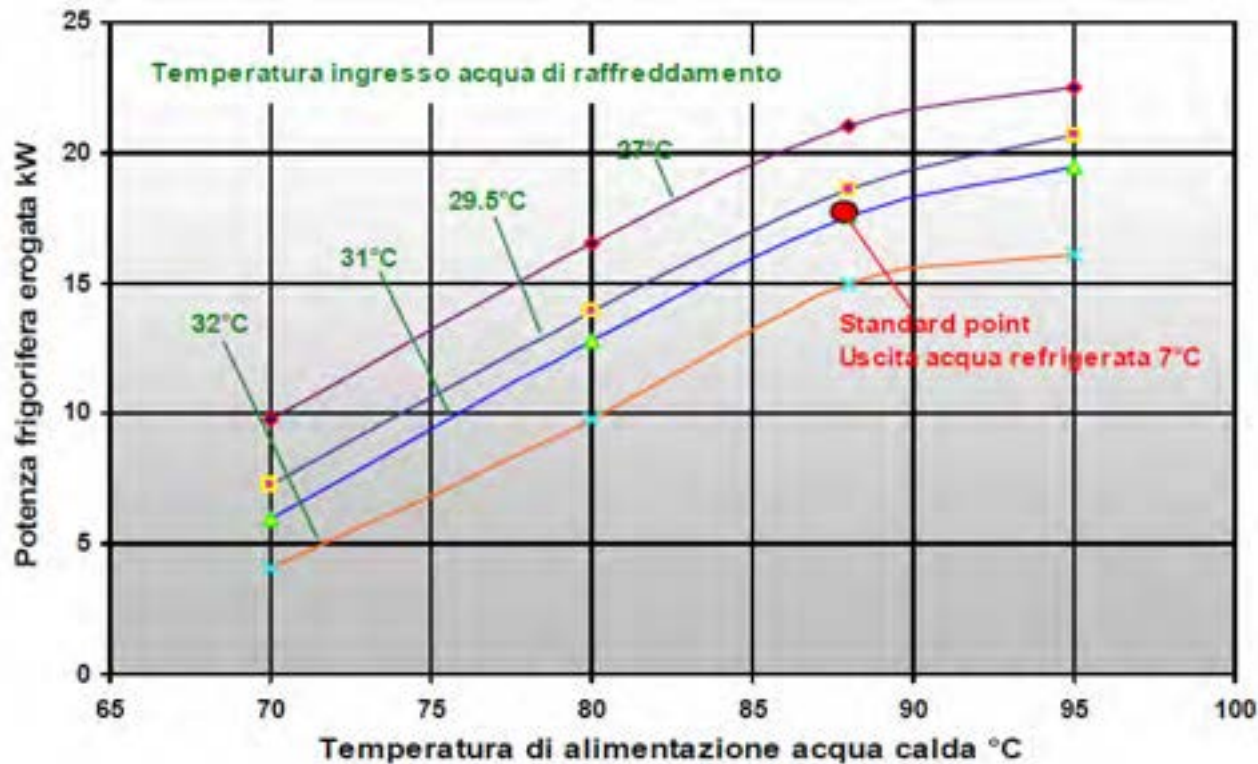


Figura 73. Curve caratteristiche di prestazione gruppo frigo YAZAKI mod. WFC-SC5

Fonte: Documentazione Tecnica Maya – Yazaki WSC – SC 5

Ipotizzando una temperatura media di alimentazione acqua calda pari a $T_{\text{acqua calda in}} = 80^{\circ}\text{C}$ ed ipotizzando una temperatura in ingresso acqua di raffreddamento pari a $T_{\text{acqua raffr in}} = 32^{\circ}\text{C}$ si ha una potenza frigorifera

erogata dal gruppo pari a $P_f = 10$ kW, contro i 17,6 kW che si hanno in funzionamento nominale della macchina. Questo esempio serve solo per evidenziare quanto decadano le prestazioni del gruppo frigo se in funzionamento reale ci si discosta dai valori di targa di funzionamento della macchina. Una riduzione del COP è anche legata al funzionamento non a regime della macchina: nei primi quindici giorni di giugno, così come in buona parte del mese di settembre, la macchina era soggetta a ripetuti on/off in quanto il carico frigorifero richiesto dall'utenza era inferiore rispetto a quanto prodotto dalla macchina.

Nei mesi monitorati, le condizioni meteo e termo igrometriche esterne variano, determinando una diversa radiazione solare incidente sui collettori. È da notare come, a differenza del periodo invernale durante il quale la quota di energia dissipata con il dry-cooler era significativa, durante il periodo estivo l'energia termica dissipata è praticamente trascurabile. Questo aspetto è legato al dimensionamento del campo solare, effettuato per garantire durante il periodo estivo l'energia termica necessaria per il funzionamento del gruppo frigo ad assorbimento. L'energia termica prodotta dal campo solare risulta invece essere esuberante per effettuare il riscaldamento dell'edificio (Figura 74).

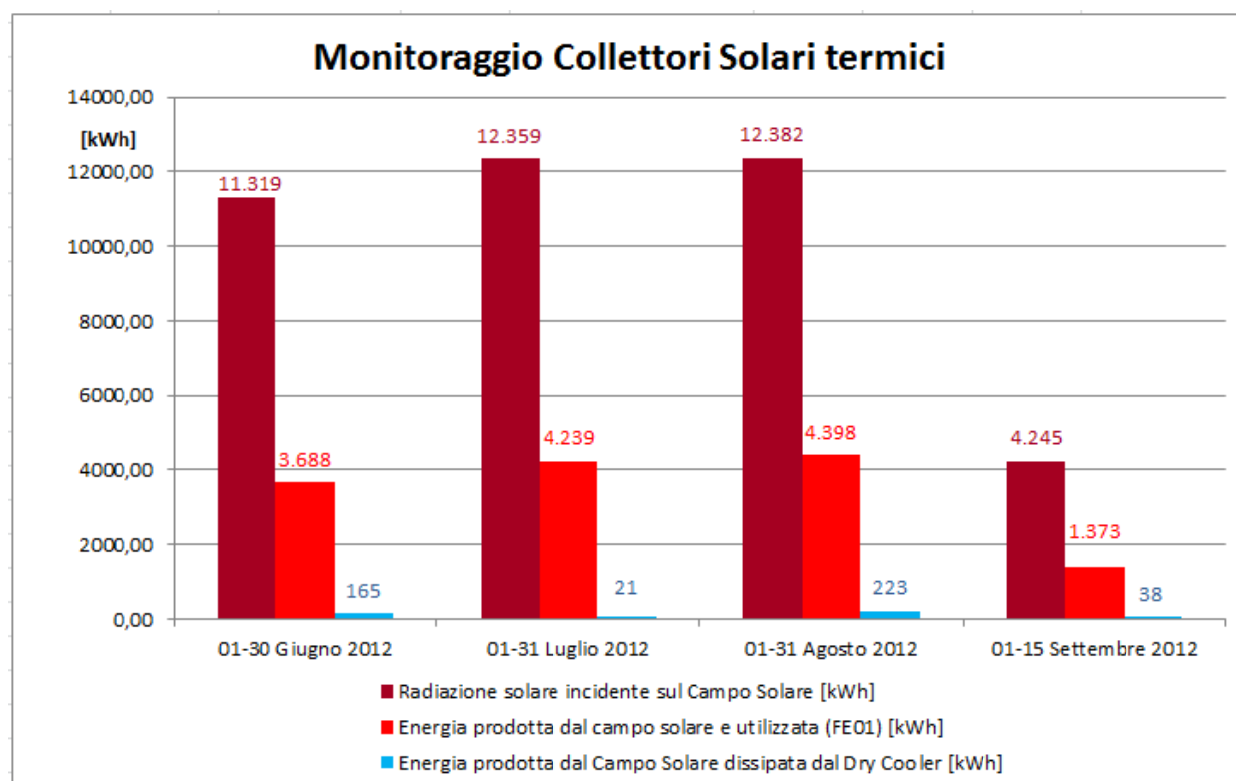


Figura 74. Radiazione solare incidente sul piano dei collettori solari termici durante il periodo di monitoraggio estivo 2012

Nella Figura 75 si riporta l'energia effettivamente fornita dal campo solare per alimentare il gruppo frigo, depurata dalle perdite precedentemente descritte ($A+B=D1$ e $D2_a+D2_b=D2$) e considerando che l'energia termica scambiata tra il circuito primario solare e l'accumulo differisce da quella effettivamente utilizzata (kWh utili solari) a causa della temperatura dell'acqua accumulata, non sempre sufficiente ad alimentare il gruppo frigo ($T_{min}=80^{\circ}\text{C}$) (Calore accumulato ma non utilizzato: $D3$).

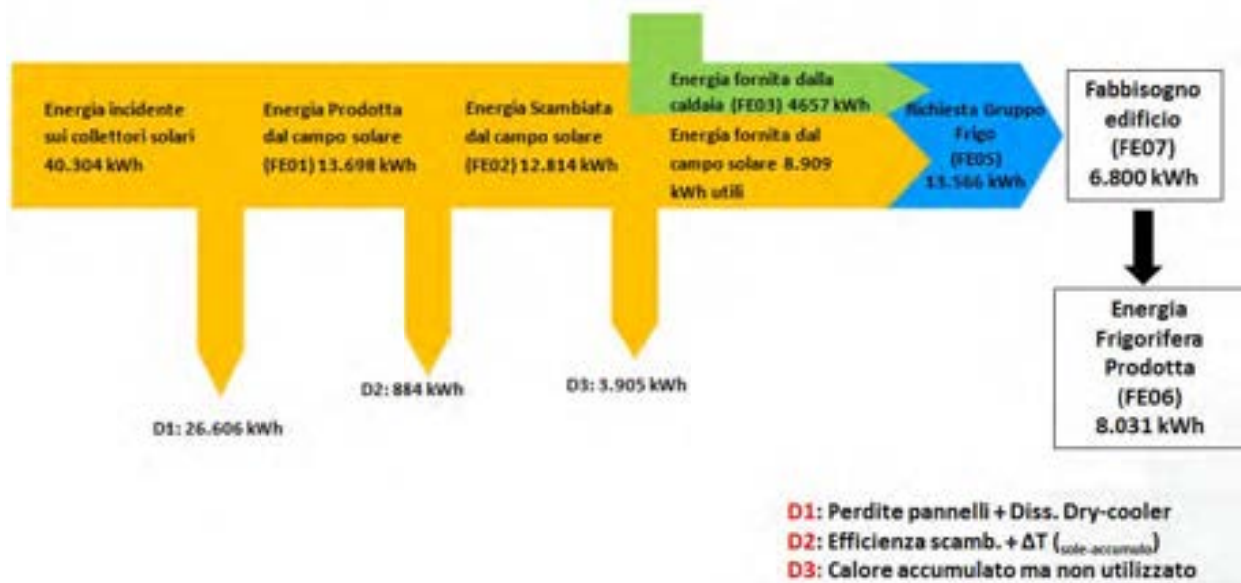


Figura 75. Diagramma del Flusso energetico di tutto il periodo di monitoraggio estivo 2012

In Figura 76 si riporta, per i vari mesi monitorati, il contributo termico al gruppo frigo ad assorbimento fornito rispettivamente dal campo solare e dalla caldaia integrativa:

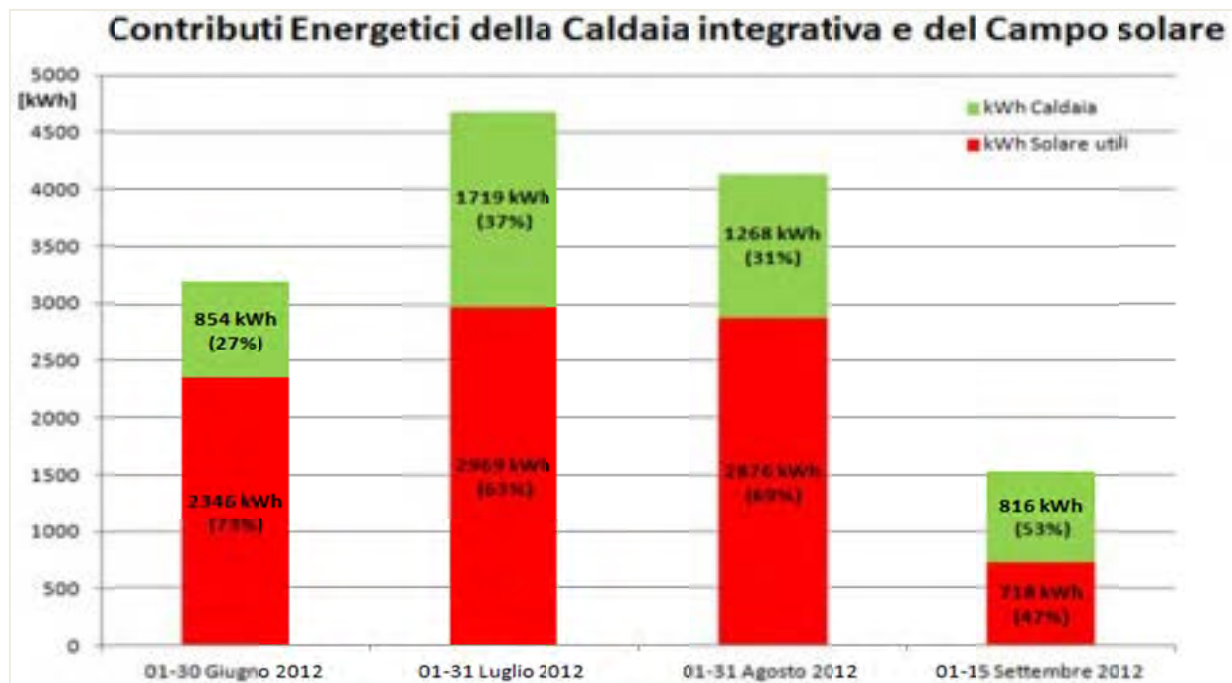


Figura 76. Contributi energetici della caldaia integrativa e del campo solare in ingresso al gruppo frigo ad assorbimento per il periodo di monitoraggio estivo 2012

Riepilogando il comportamento dell'impianto di solar cooling durante l'intero periodo di monitoraggio, si può calcolare la frazione solare dell'energia in ingresso al gruppo frigo (Figura 77):



Figura 77. Frazione solare impianto di solar cooling C.R. ENEA di Casaccia per il periodo estivo 2012

La frazione solare sopra riportata è stata ottenuta sempre garantendo le condizioni di comfort termigrometrico all'interno degli ambienti serviti dall'impianto di solar cooling (Figura 78-Tabella 23):

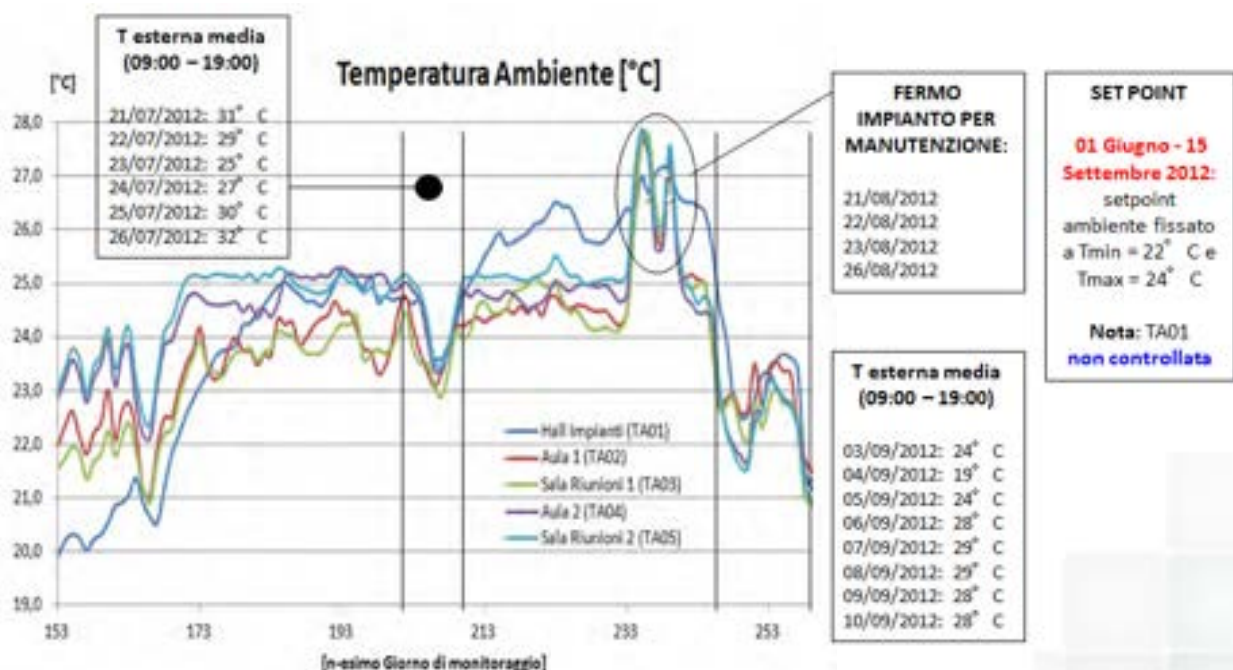


Figura 78. Frazione solare impianto di solar cooling C.R. ENEA di Casaccia

La logica di regolazione gestisce il mantenimento della temperatura di set point ambiente mediante l'impianto a pannelli radianti a pavimento (alimentato con acqua in ingresso a $T_{in \text{ pannelli}} = 14^{\circ} \text{ C}$) ed effettua il raggiungimento del set point con l'impianto a ventilconvettori (alimentato con acqua in ingresso a $T_{in \text{ fancoil}} = 7^{\circ} \text{ C}$): questa soluzione ha consentito di ottimizzare la produzione di acqua refrigerata necessitando di acqua molto fredda solo nelle ore più calde della giornata, quando il contributo dell'energia termica, in ingresso al gruppo frigo, è prodotta quasi interamente dal campo solare. La caldaia entrerà in funzione solo

quando le temperature nei vari ambienti non sono soddisfatte e l'accumulo freddo è stato quasi del tutto utilizzato.

Tabella 23. Numerazione giorni di monitoraggio nel periodo estivo 2012

Month day	Monitoring Day	Month day	Monitoring Day	Month day	Monitoring Day	Month day	Monitoring Day
01/06/2012	153	01/07/2012	183	01/08/2012	214	01/09/2012	245
02/06/2012	154	02/07/2012	184	02/08/2012	215	02/09/2012	246
03/06/2012	155	03/07/2012	185	03/08/2012	216	03/09/2012	247
04/06/2012	156	04/07/2012	186	04/08/2012	217	04/09/2012	248
05/06/2012	157	05/07/2012	187	05/08/2012	218	05/09/2012	249
06/06/2012	158	06/07/2012	188	06/08/2012	219	06/09/2012	250
07/06/2012	159	07/07/2012	189	07/08/2012	220	07/09/2012	251
08/06/2012	160	08/07/2012	190	08/08/2012	221	08/09/2012	252
09/06/2012	161	09/07/2012	191	09/08/2012	222	09/09/2012	253
10/06/2012	162	10/07/2012	192	10/08/2012	223	10/09/2012	254
11/06/2012	163	11/07/2012	193	11/08/2012	224	11/09/2012	255
12/06/2012	164	12/07/2012	194	12/08/2012	225	12/09/2012	256
13/06/2012	165	13/07/2012	195	13/08/2012	226	13/09/2012	257
14/06/2012	166	14/07/2012	196	14/08/2012	227	14/09/2012	258
15/06/2012	167	15/07/2012	197	15/08/2012	228	15/09/2012	259
16/06/2012	168	16/07/2012	198	16/08/2012	229		
17/06/2012	169	17/07/2012	199	17/08/2012	230		
18/06/2012	170	18/07/2012	200	18/08/2012	231		
19/06/2012	171	19/07/2012	201	19/08/2012	232		
20/06/2012	172	20/07/2012	202	20/08/2012	233		
21/06/2012	173	21/07/2012	203	21/08/2012	234		
22/06/2012	174	22/07/2012	204	22/08/2012	235		
23/06/2012	175	23/07/2012	205	23/08/2012	236		
24/06/2012	176	24/07/2012	206	24/08/2012	237		
25/06/2012	177	25/07/2012	207	25/08/2012	238		
26/06/2012	178	26/07/2012	208	26/08/2012	239		
27/06/2012	179	27/07/2012	209	27/08/2012	240		
28/06/2012	180	28/07/2012	210	28/08/2012	241		
29/06/2012	181	29/07/2012	211	29/08/2012	242		
30/06/2012	182	30/07/2012	212	30/08/2012	243		
		31/07/2012	213	31/08/2012	244		

3.2 Analisi dati sperimentali del monitoraggio estivo 2013

Il monitoraggio estivo effettuato nell'anno 2013 è relativo al periodo compreso tra il primo giugno ed il 31 agosto 2013. Tale periodo di funzionamento è caratterizzato dalla presenza di un accumulo innovativo del tipo a cambiamento di fase (PCM) installato nel mese di marzo 2013. Oltre alle differenti condizioni climatiche e di occupazione dell'edificio i risultati ottenuti nel monitoraggio estivo del 2013 differiscono rispetto al 2012 anche per la presenza dell'accumulo PCM.

3.2.1 Periodo di monitoraggio 1 Giugno -30 Giugno 2013

Il mese di giugno 2013 non è stato caratterizzato da un clima tipicamente estivo per la maggior parte del tempo. La temperatura media mensile dell'aria esterna è pari infatti a 23 °C circa e nei primi e negli ultimi giorni del mese la temperatura dell'aria esterna non ha raggiunto nemmeno i 30°C se non per un breve periodo nelle ore centrali della giornata (Figura 79). Nei primi giorni del mese ciò si traduce nell'assenza di richiesta di energia frigorifera da parte dell'edificio e quindi nel mancato funzionamento del gruppo frigo ad assorbimento e dell'annessa torre evaporativa. Il funzionamento dell'impianto è stato di tipo discontinuo (dalle ore 7.00 alle ore 18.00) per tutti i giorni della settimana.

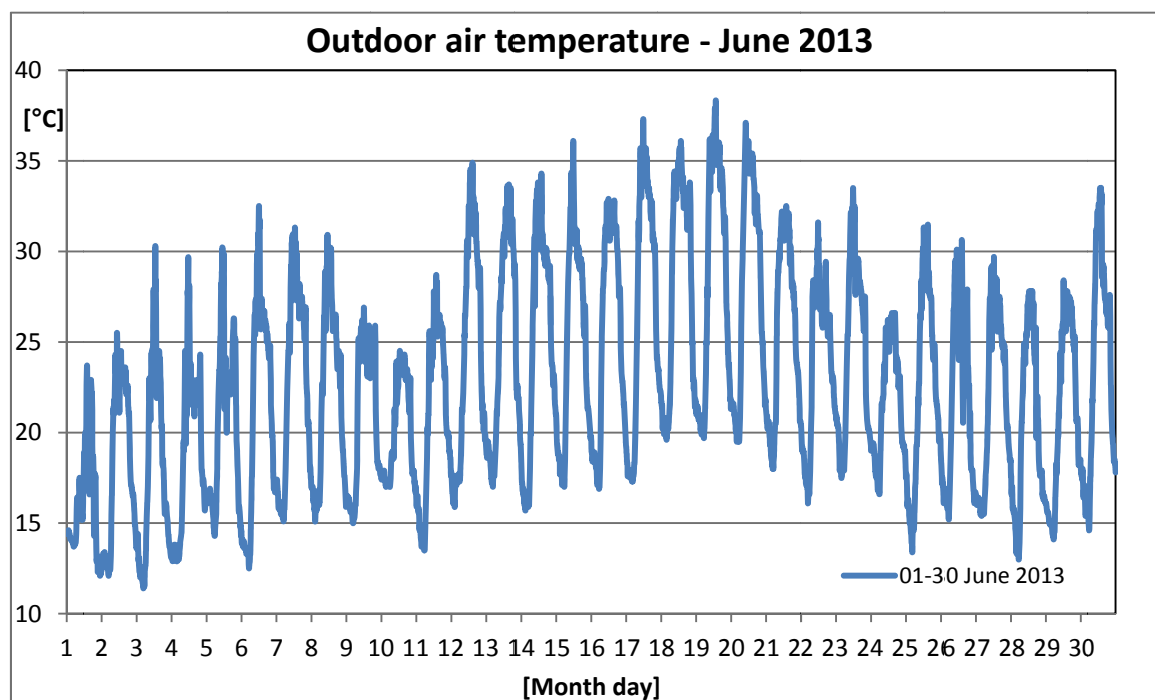


Figura 79. Andamento temperatura aria esterna nel mese di Giugno 2013

I giorni centrali del mese di giugno presentano invece una temperatura dell'aria esterna maggiore di 30°C sono quindi caratterizzati da una certa richiesta di energia frigorifera da parte dell'edificio (Figura 80) che raggiunge poi valori maggiori negli ultimi giorni del mese.

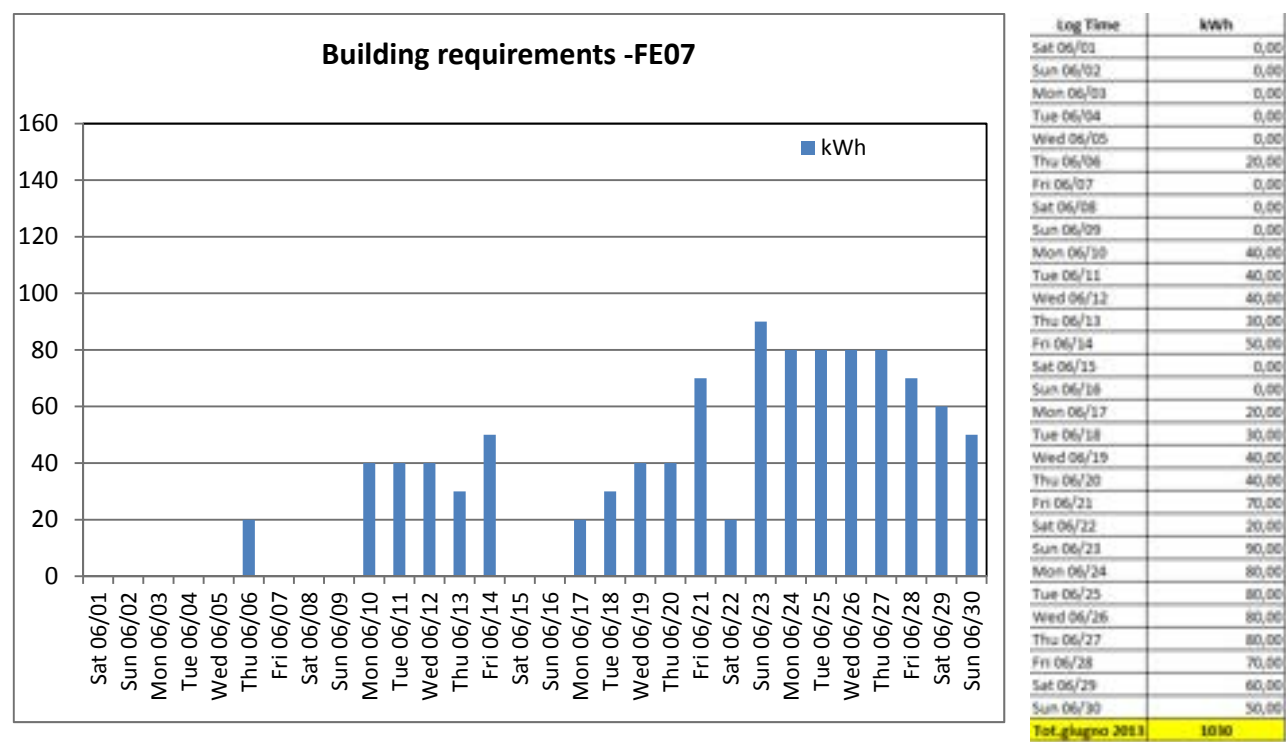


Figura 80. Fabbisogno dell’edificio (FE07) dall’ 1 al 30 Giugno 2013

L’andamento dell’energia frigorifera prodotta dal gruppo frigo ad assorbimento (Figura 81) rispecchia l’andamento della richiesta dell’edificio; si riportano nelle figure 82 e 83 rispettivamente l’energia termica richiesta dal gruppo frigo ad assorbimento, necessaria per la produzione di acqua refrigerata, e l’energia termica dissipata dalla torre evaporativa per chiudere il ciclo termodinamico. In figura 84 è fornito un riepilogo del funzionamento del gruppo frigo ad assorbimento per il mese considerato per il quale il COP reale medio in funzionamento è stato COP=0,659.

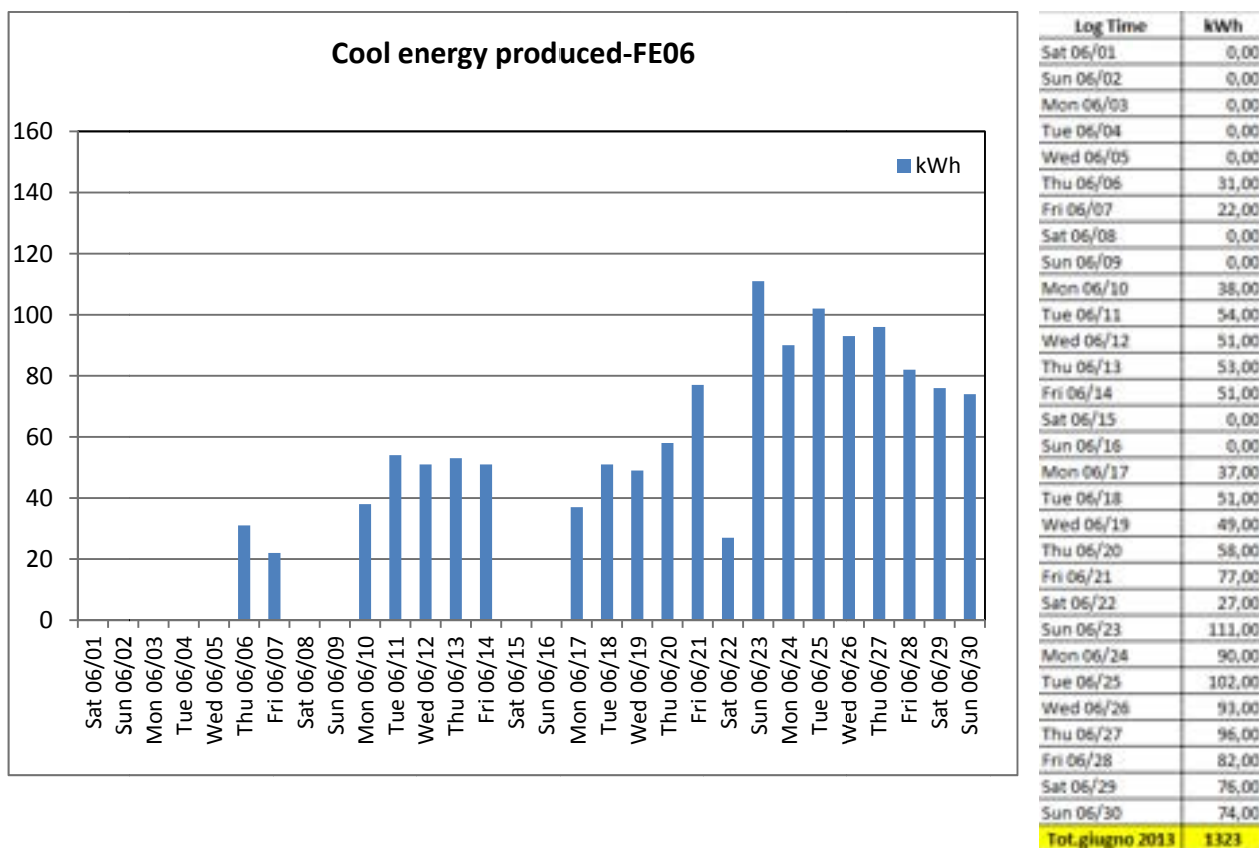


Figura 81. Acqua refrigerata prodotta dal gruppo frigo ad assorbimento (FE06) dall' 1 al 30 Giugno 2013

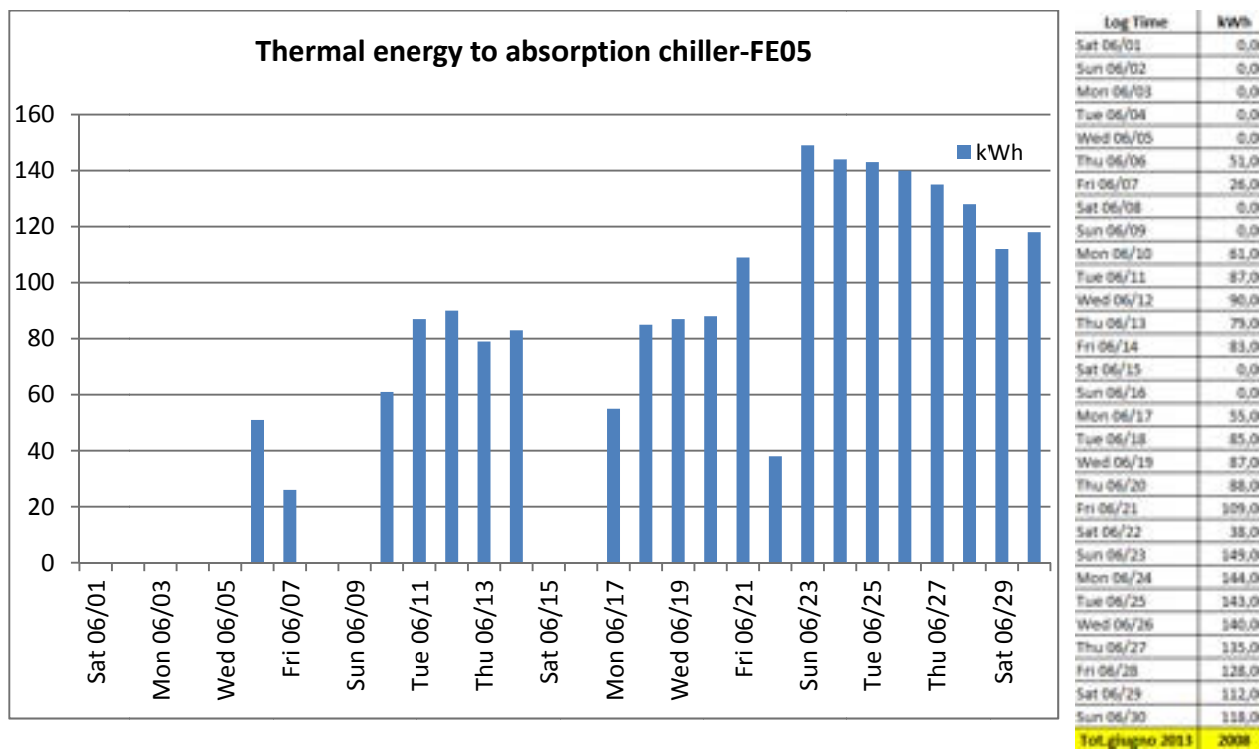


Figura 82. Energia termica in ingresso al gruppo frigo ad assorbimento (FE05) dall' 1 al 30 Giugno 2013

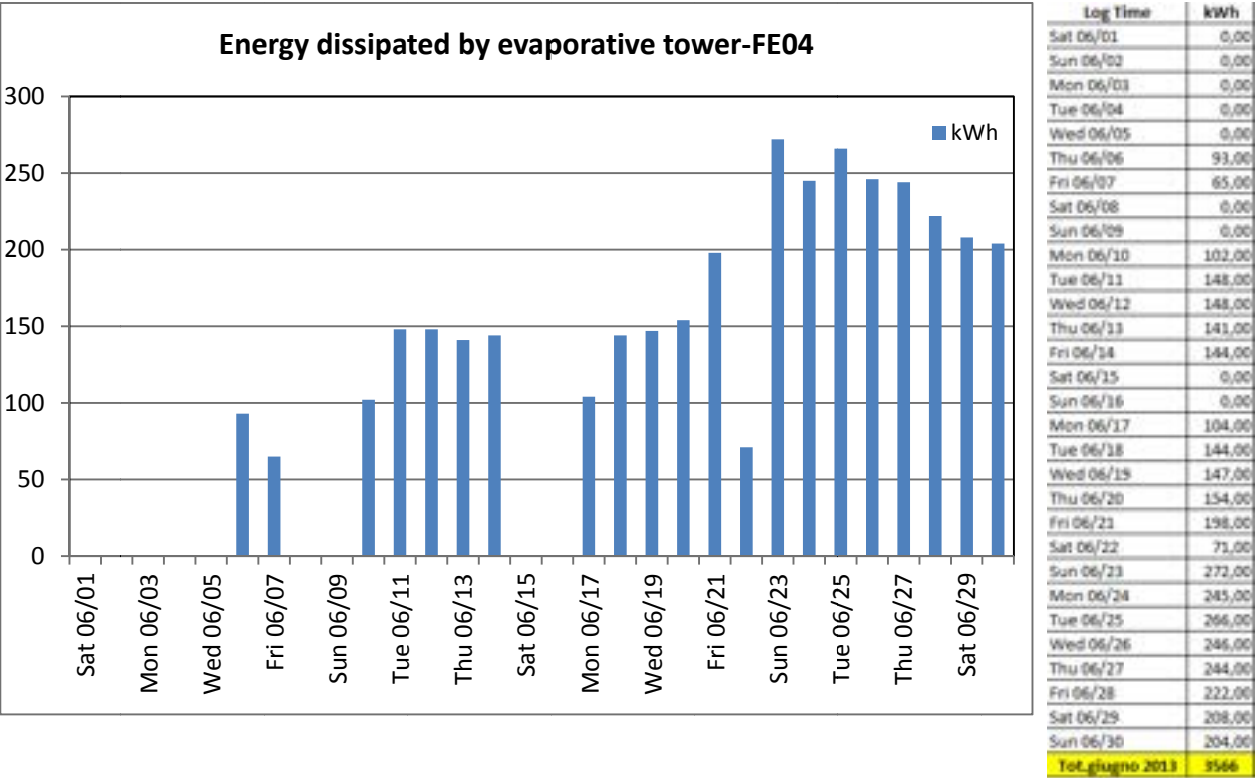


Figura 83. Energia termica dissipata dalla torre evaporativa (FE04) dall’ 1 al 30 Giugno 2013

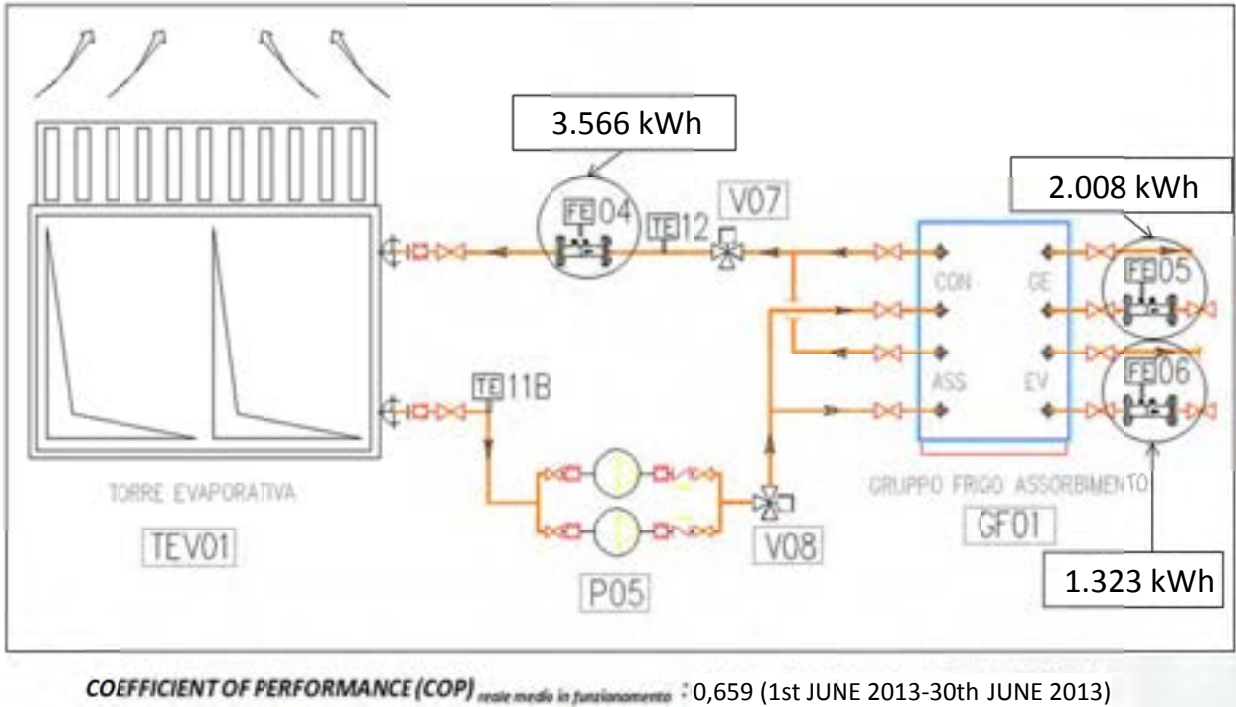


Figura 84. COP gruppo frigo assorbimento dall’ 1 al 30 Giugno 2013

L’energia termica in ingresso all’assorbitore è prodotta, a seconda dell’irradianza solare incidente sui pannelli, dal campo solare oppure dalla caldaia integrativa (Figure 85e 86). Per il mese di Giugno 2013 il fabbisogno di energia termica dell’assorbitore è stato coperto per il 73% dal campo solare e per il resto dalla caldaia (Figura 87).

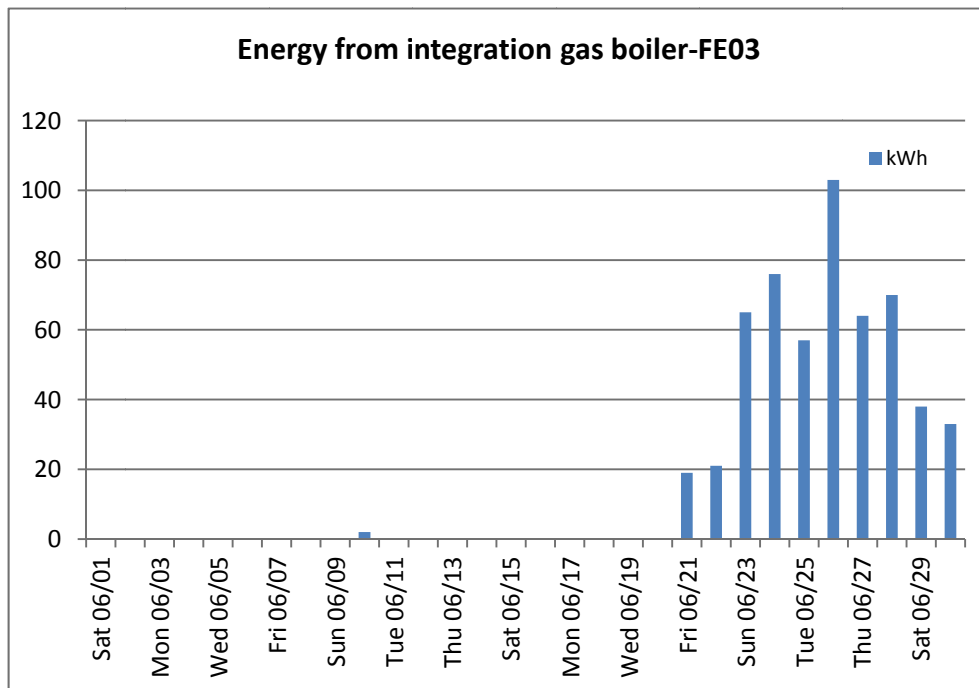


Figura 85. Energia termica fornita dalla caldaia integrativa (FE03) dall' 1 al 30 Giugno 2013

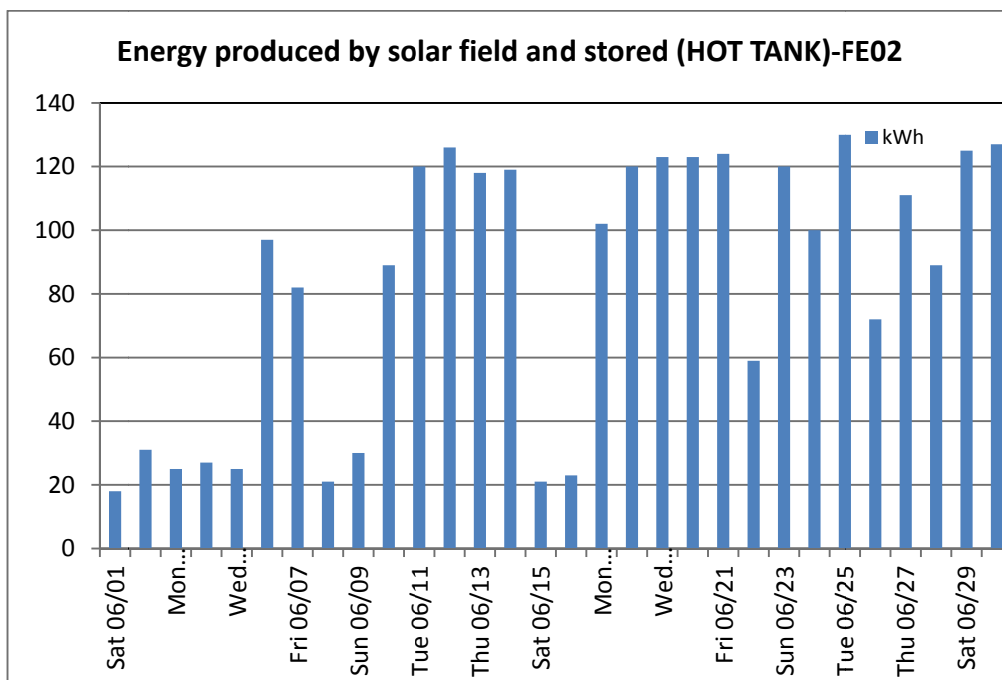


Figura 86. Energia termica fornita da campo solare stoccata nell'accumulo (FE02) dall' 1 al 30 Giugno 2013

Negli ultimi giorni di giugno per garantire un maggior grado di comfort al crescente numero di occupanti dell'edificio F-92 i fan coil e le relative pompe di circolazione sono stati forzati in ON e quindi sono stati fatti funzionare sempre durante tutto l'orario di funzionamento dell'impianto. Ciò ha determinato un

funzionamento continuo del gruppo frigo ad assorbimento per la produzione di acqua refrigerata da destinarsi alla produzione di acqua refrigerata mediante i fan coil la cui temperatura di alimentazione ha un setpoint (7°C) più basso rispetto ai pannelli radianti a pavimento.

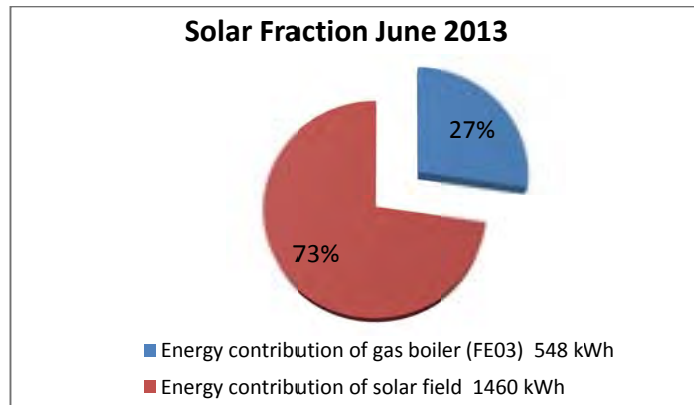


Figura 87. Frazione solare dall' 1 al 30 Giugno 2013

La frazione solare è stata ottenuta garantendo sempre le condizioni di comfort termico all'interno degli ambienti climatizzati. I primi giorni di giugno 2013 sono stati caratterizzati da un clima per niente estivo: i bassi valori di temperatura aria esterna hanno determinato l'assenza di energia frigorifera da parte dell'edificio essendo già gli ambienti interni in temperatura (Figura 88). A causa dell'assenza di alcuni dati del monitoraggio, i valori della temperatura della hall impianti (TA01) sono disponibili solo a partire da giorno 18 giugno 2013 mentre i valori della temperatura della sala riunioni del piano primo (TA05) sono parzialmente disponibili. L'andamento delle temperature degli ambienti interni nei primi giorni di giugno 2013 evidenzia come il clima decisamente non estivo non abbia determinato il funzionamento dell'impianto.

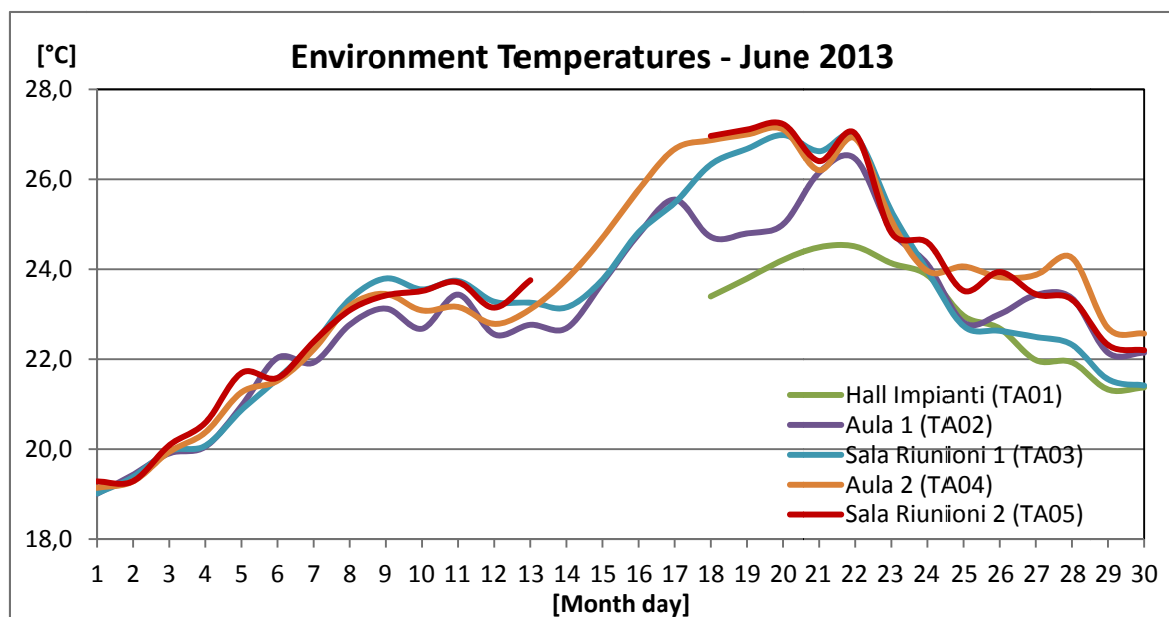


Figura 88. Andamento della temperatura degli ambienti interni dall' 1 al 30 Giugno 2013

I valori di temperatura riportati in Figura 88 sono stati calcolati come valori medi giornalieri. Negli ultimi giorni di giugno un'occupazione più intensa dei locali ha influenzato l'andamento di tali temperature che presentano anche dei picchi in corrispondenza dell'incontrollata apertura delle finestre.

3.2.2 Periodo di monitoraggio 1 Luglio -31 Luglio 2013

A luglio il clima è migliorato, con temperature in linea con i valori stagionali (Figura 89). La temperatura dell'aria esterna media giornaliera 26,6 °C maggiore rispetto al mese precedente. La temperatura dell'aria esterna si è mantenuta globalmente tra i 20°C ed i 35°C raggiungendo picchi oltre i 35°C. Il funzionamento dell'impianto è stato di tipo discontinuo (dalle ore 7.00 alle ore 18.00) per tutti i giorni della settimana.

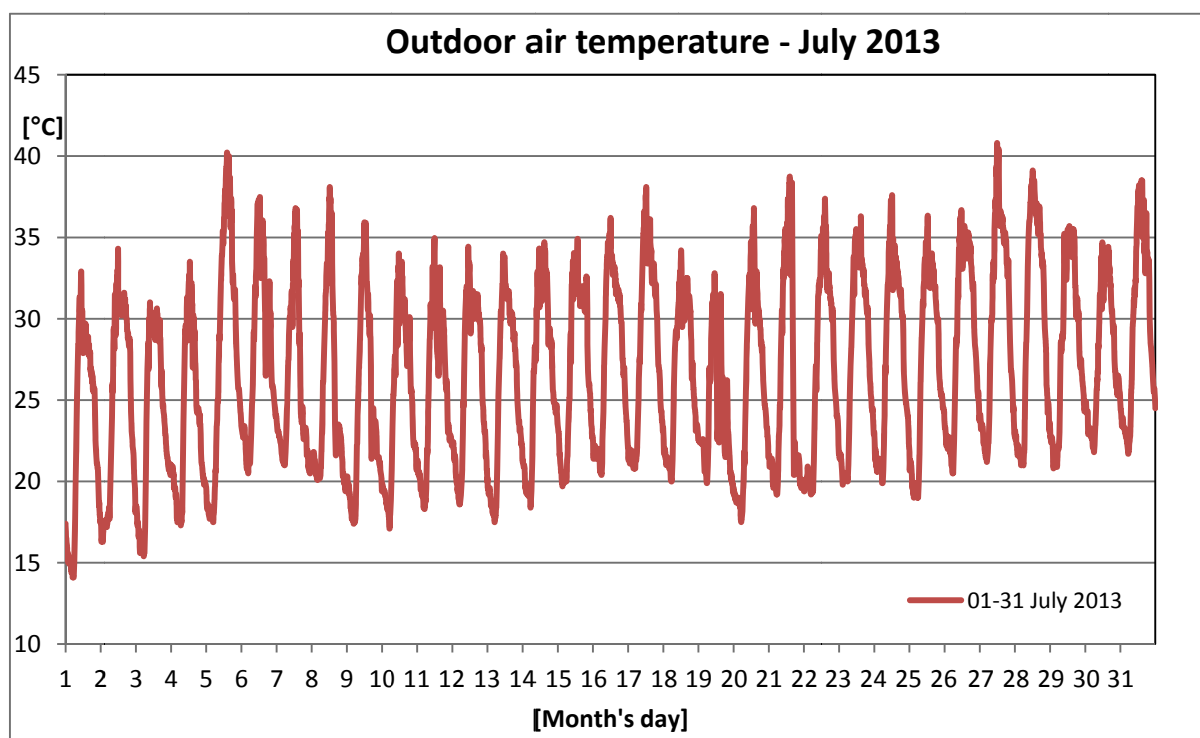
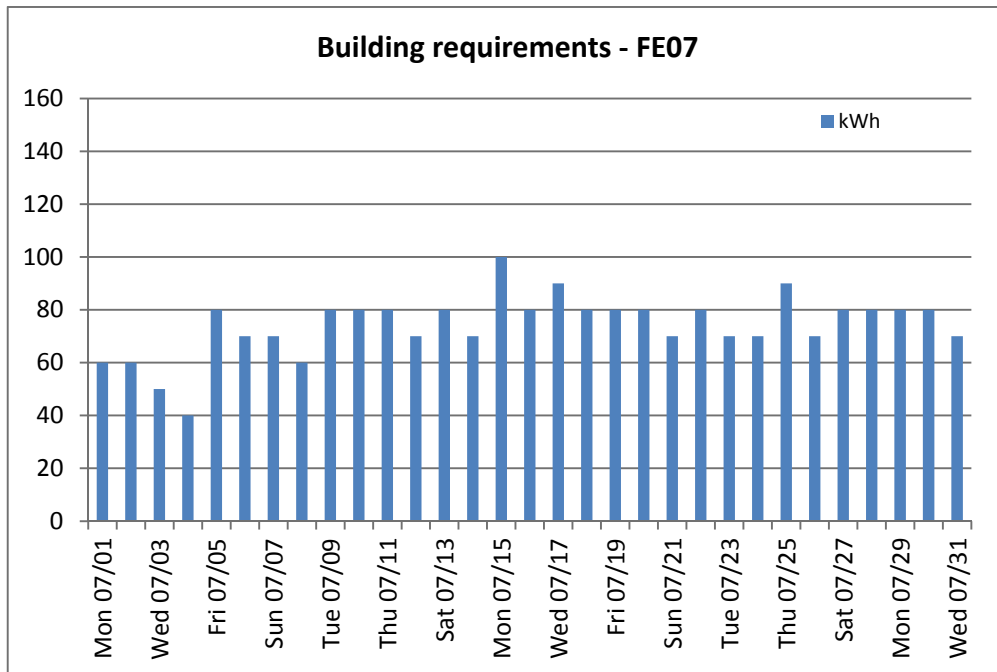


Figura 89. Andamento temperatura aria esterna nel mese di Luglio 2013

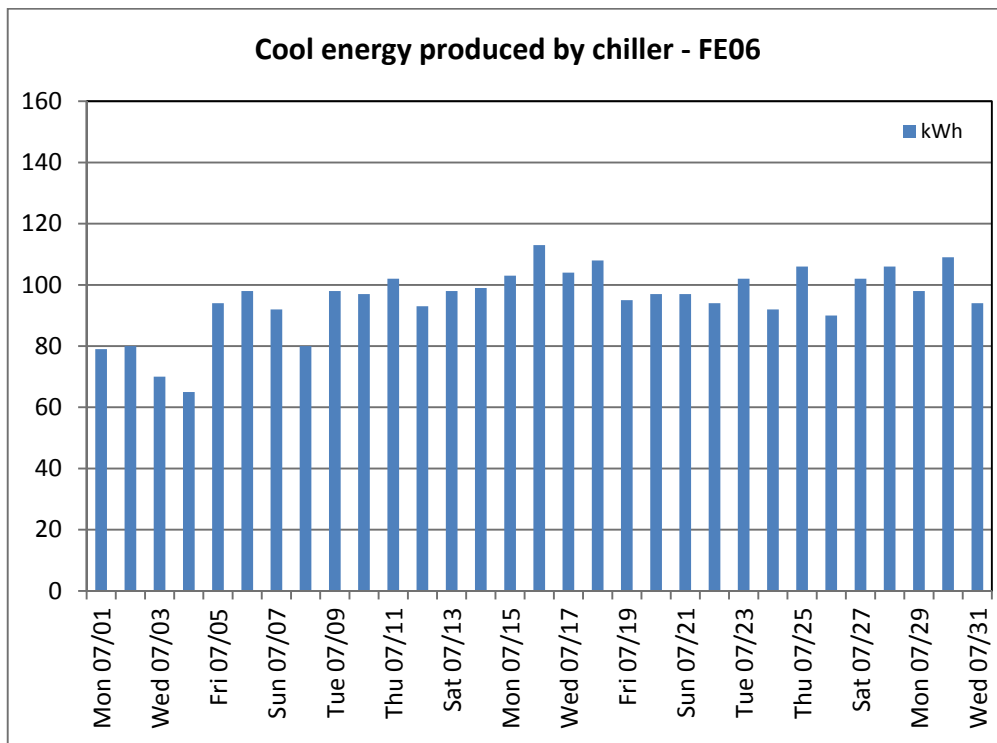
Il fabbisogno energetico dell'edificio è quindi maggiore rispetto al mese precedente (Figura 90). A tale richiesta corrisponde la produzione di energia frigorifera da parte del gruppo frigo ad assorbimento con un COP medio di 0,679 indice di una temperatura dell'acqua calda in input al gruppo frigo prossima per la maggior parte del tempo agli 88°C. Questo giustifica una maggiore richiesta di energia termica da parte del gruppo frigo ad assorbimento e di conseguenza una quota maggiore di energia dissipata dalla torre evaporativa (Figure 92 e 93) sempre rispetto al precedente mese di giugno 2013.

Di seguito vengono riportati gli andamenti giornalieri dell'energia frigorifera richiesta dall'edificio, dell'energia frigorifera prodotta dal gruppo frigo ad assorbimento, dell'energia termica in input al gruppo frigo ed infine l'energia dissipata dalla torre evaporativa per il completamento del ciclo svolto dalla macchina. Dai seguenti grafici si nota come nei giorni del mese di luglio 2013 l'energia termica richiesta dal gruppo frigo è sempre stata al di sopra dei 100 kWh e l'energia frigorifera prodotta è stata sempre maggiore dei 60 kWh.



Log Time	kWh
Mon 07/01	60,00
Tue 07/02	60,00
Wed 07/03	50,00
Thu 07/04	40,00
Fri 07/05	80,00
Sat 07/06	70,00
Sun 07/07	70,00
Mon 07/08	60,00
Tue 07/09	80,00
Wed 07/10	80,00
Thu 07/11	80,00
Fri 07/12	70,00
Sat 07/13	80,00
Sun 07/14	70,00
Mon 07/15	100,00
Tue 07/16	80,00
Wed 07/17	90,00
Thu 07/18	80,00
Fri 07/19	80,00
Sat 07/20	80,00
Sun 07/21	70,00
Mon 07/22	80,00
Tue 07/23	70,00
Wed 07/24	70,00
Thu 07/25	90,00
Fri 07/26	70,00
Sat 07/27	80,00
Sun 07/28	80,00
Mon 07/29	80,00
Tue 07/30	80,00
Wed 07/31	70,00
Tot. luglio 2013	2300

Figura 90. Fabbisogno dell'edificio (FE07) dall' 1 al 31 Luglio 2013



Log Time	kWh
Mon 07/01	79,00
Tue 07/02	80,00
Wed 07/03	70,00
Thu 07/04	65,00
Fri 07/05	94,00
Sat 07/06	98,00
Sun 07/07	92,00
Mon 07/08	80,00
Tue 07/09	98,00
Wed 07/10	97,00
Thu 07/11	102,00
Fri 07/12	93,00
Sat 07/13	98,00
Sun 07/14	99,00
Mon 07/15	103,00
Tue 07/16	113,00
Wed 07/17	104,00
Thu 07/18	108,00
Fri 07/19	95,00
Sat 07/20	97,00
Sun 07/21	97,00
Mon 07/22	94,00
Tue 07/23	102,00
Wed 07/24	92,00
Thu 07/25	106,00
Fri 07/26	90,00
Sat 07/27	102,00
Sun 07/28	106,00
Mon 07/29	98,00
Tue 07/30	109,00
Wed 07/31	94,00
Tot. luglio 2013	2955

Figura 91. Acqua refrigerata prodotta dal gruppo frigo ad assorbimento (FE06) dall' 1 al 31 Luglio 2013

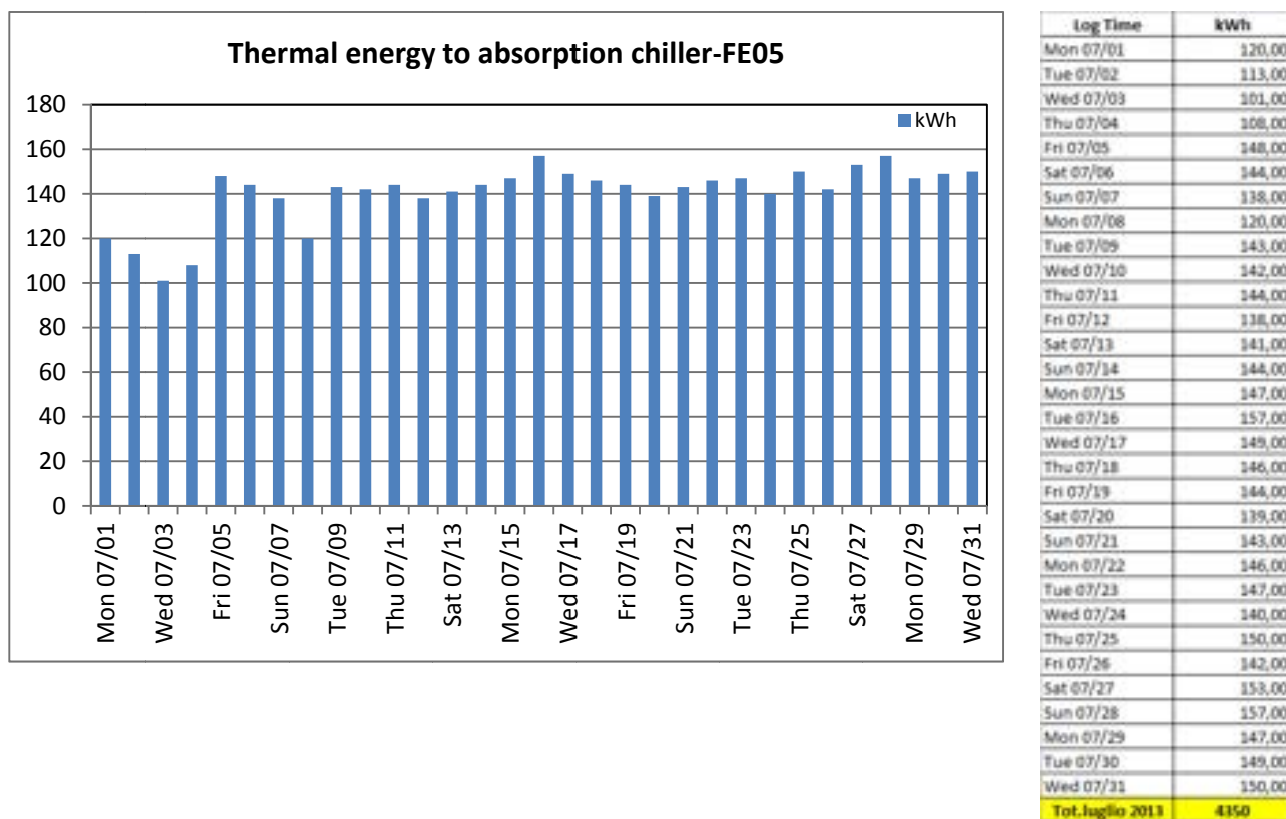


Figura 92. Energia termica in ingresso al gruppo frigo ad assorbimento (FE05) dall' 1 al 31 Luglio 2013

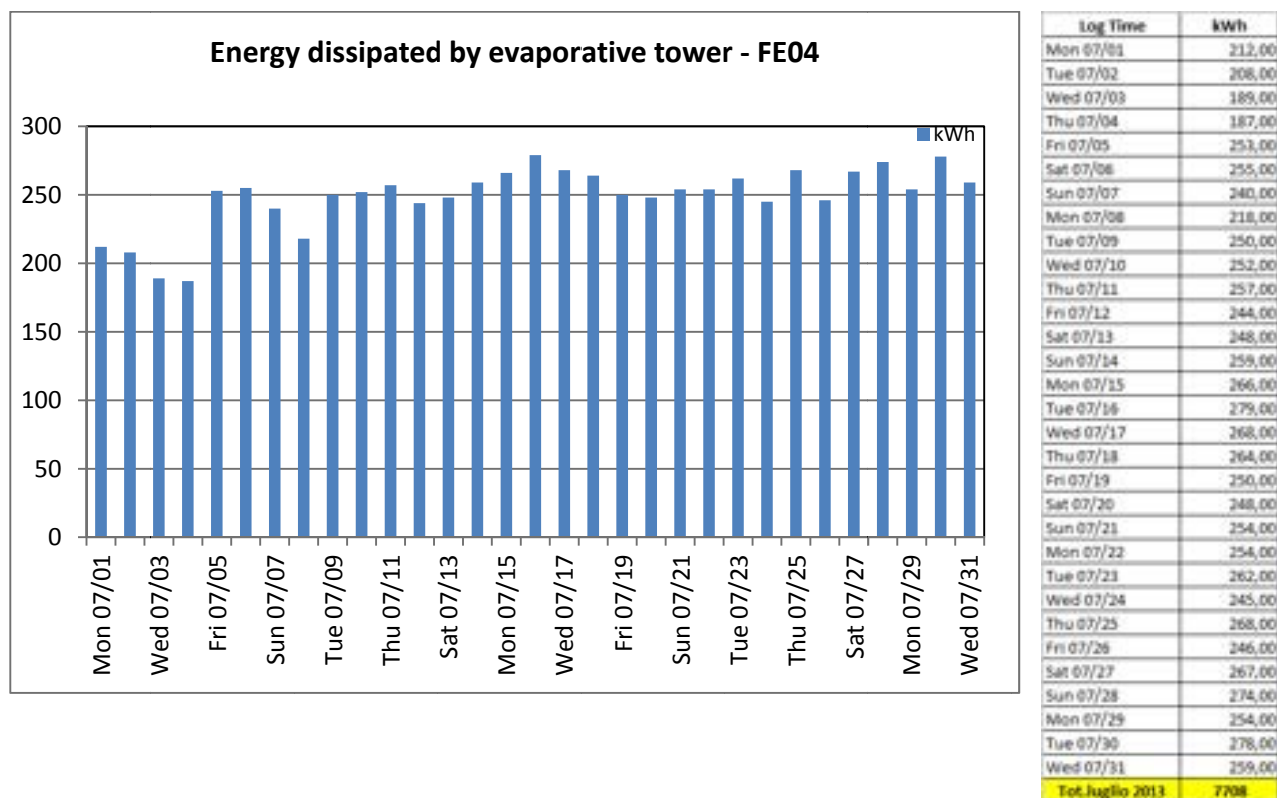


Figura 93. Energia termica dissipata dalla torre evaporativa (FE04) dall' 1 al 31 Luglio 201

In Figura 94 viene mostrato il bilancio energetico del gruppo frigo ad assorbimento in cui le varie aliquote di energia sono tutte maggiori rispetto al precedente mese di giugno 2013 caratterizzato da condizioni climatiche non tipicamente estive.

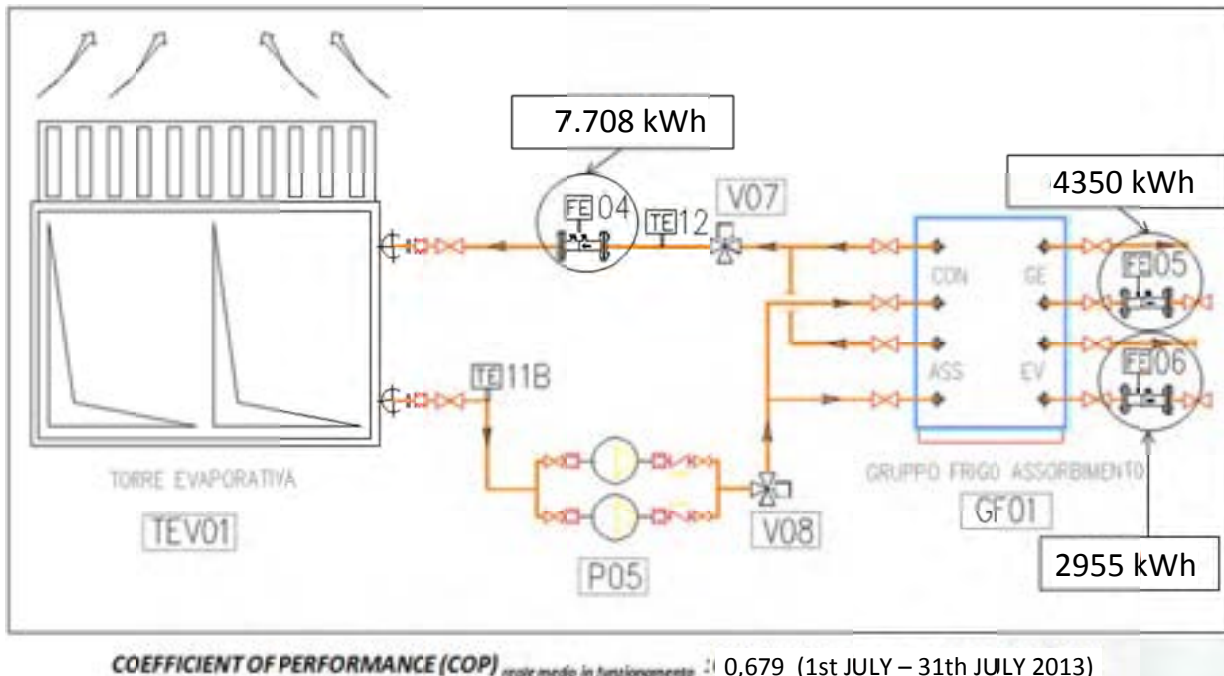


Figura 94. COP gruppo frigo assorbimento dall' 1 al 31 Luglio 2013

Anche per il mese suddetto il fabbisogno del gruppo frigo ad assorbimento è stato coperto per buona parte dal campo solare per un'aliquota del 56% mentre la restante quota (44%) è stata fornita dalla caldaia integrativa (Figura 97).

A causa di un mal funzionamento del conta termie FE01 che contabilizza l'energia prodotta dal campo solare, è stato necessario stimarne il valore a partire dall'energia contabilizzata dal conta termie FE02, che contabilizza l'energia prodotta dal campo solare e stoccata nel serbatoio d'accumulo, attraverso il rendimento dello scambiatore interposto tra il circuito solare ed il circuito di carico del serbatoio.

Nei primi giorni di luglio per garantire un maggior grado di comfort al crescente numero di occupanti dell'edificio F-92 i fan coil e le relative pompe di circolazione sono stati forzati in ON e quindi sono stati fatti funzionare sempre durante tutto l'orario di funzionamento dell'impianto. Ciò ha determinato un funzionamento più continuo rispetto al mese meno caldo di giugno del gruppo frigo ad assorbimento per la produzione di acqua refrigerata da destinarsi alla produzione di acqua refrigerata mediante i fan coil la cui temperatura di alimentazione ha un setpoint (7°C) più basso rispetto ai pannelli radianti a pavimento. Le prestazioni del gruppo frigo ad assorbimento migliorano quindi nel mese di luglio 2013 (COP = 0,679).

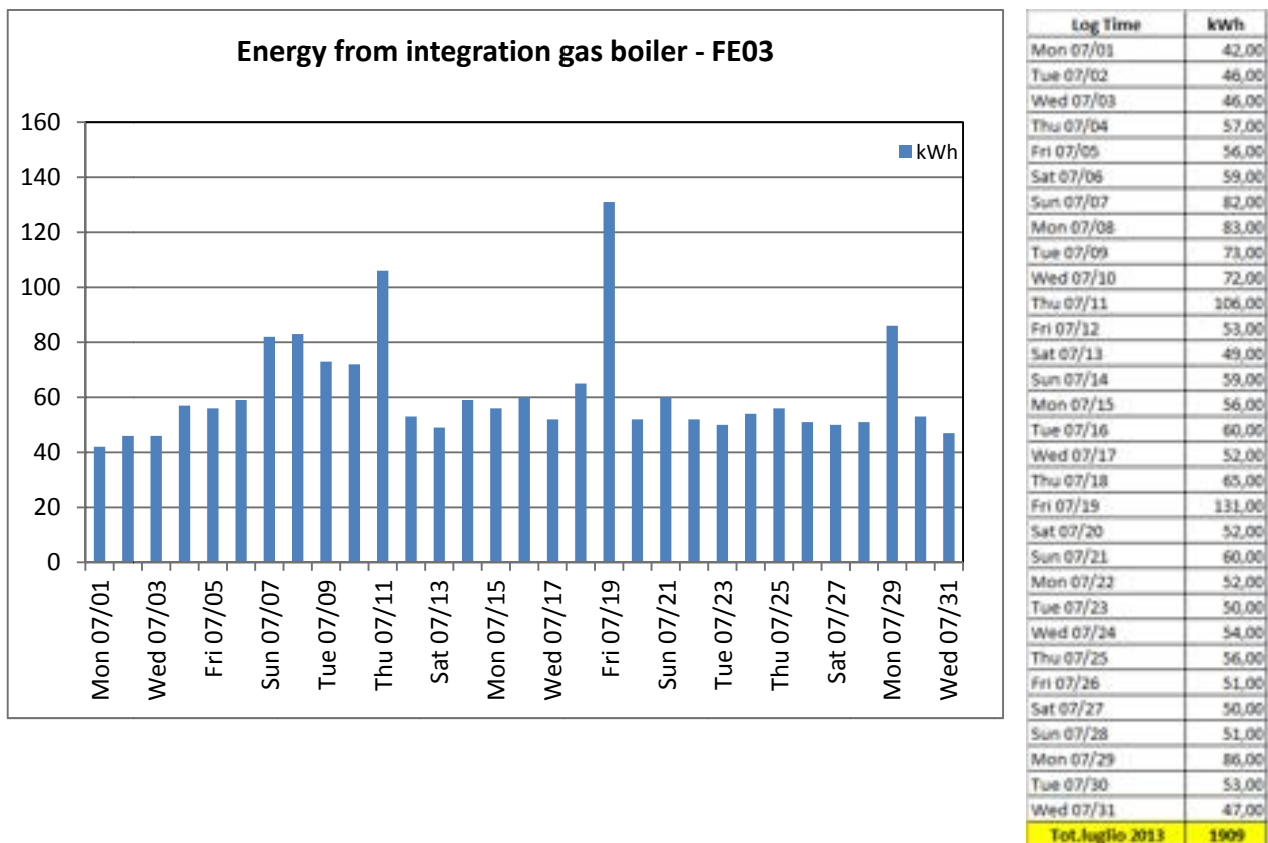


Figura 95. Energia termica fornita dalla caldaia integrativa (FE03) dall' 1 al 31 Luglio 2013

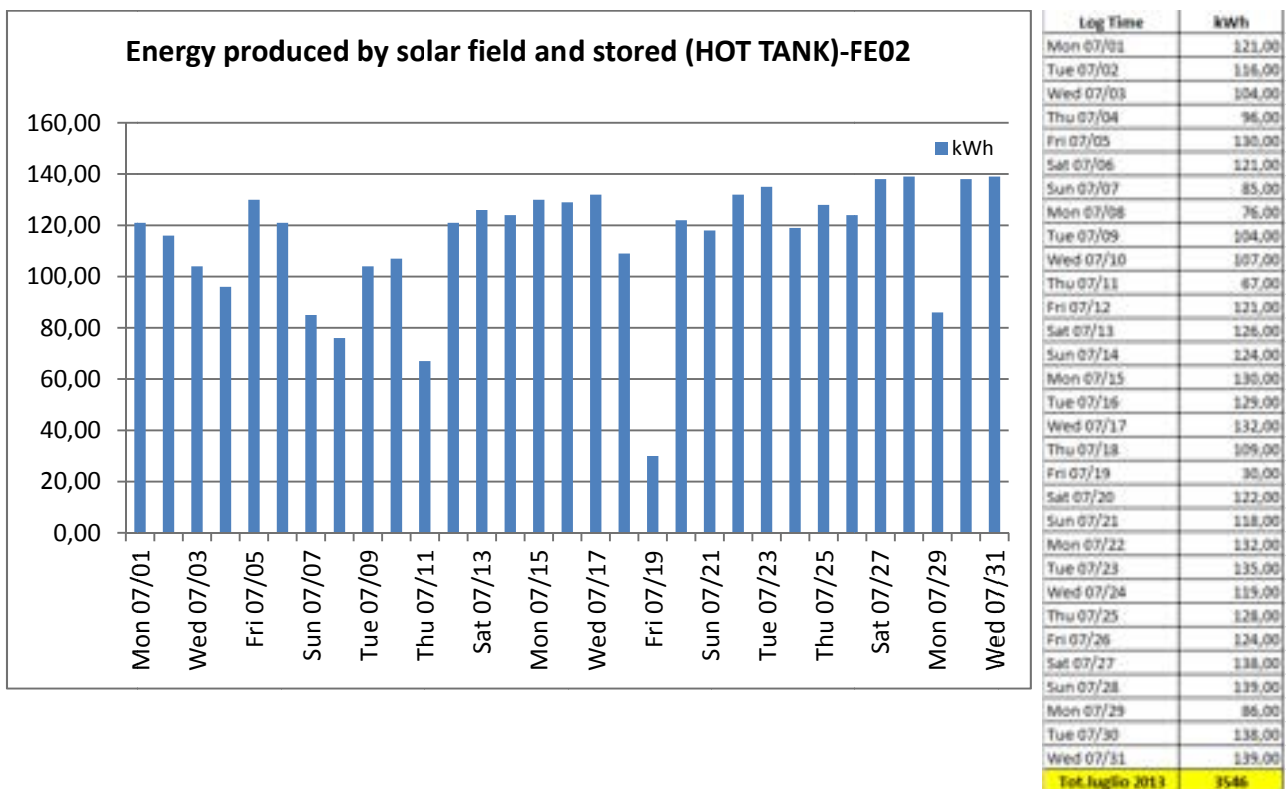


Figura 96. Energia termica fornita da campo solare stoccata nell'accumulo (FE02) dall' 1 al 31 Luglio 2013

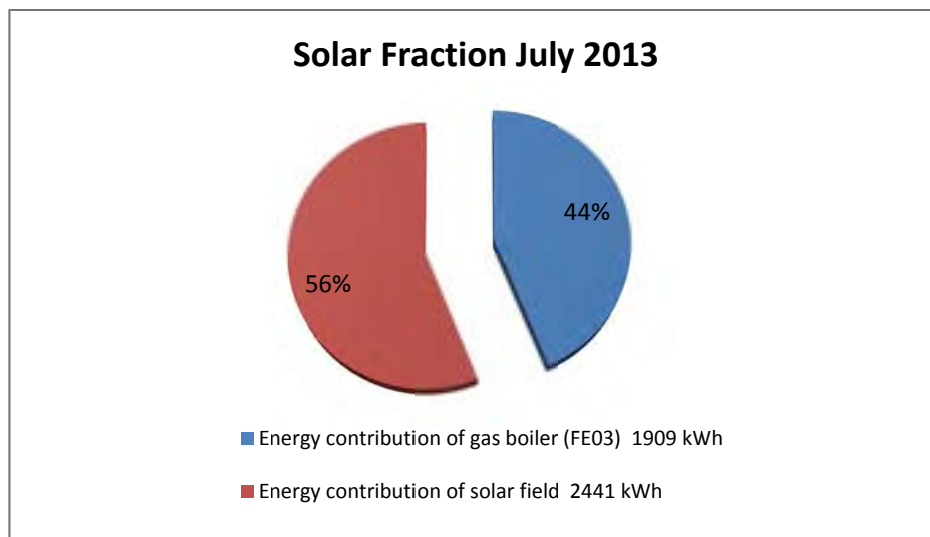


Figura 97. Frazione solare dall' 1 al 31 Luglio 2013

Tale frazione solare è stata ottenuta raggiungendo l'obiettivo finale del comfort termico degli ambienti climatizzati. Dal grafico riportato in Figura 98 si nota che le temperature degli ambienti climatizzati, ad eccezione della hall impianti, sono state mantenute prettamente all'interno della banda 23 °C – 25°C. Nei primi giorni di luglio un'occupazione più intensa dei locali ha influenzato l'andamento di tali temperature che presentano anche dei picchi in corrispondenza dell'incontrollata apertura delle finestre. Negli ultimi giorni di luglio 2013 il setpoint delle temperature ambiente è stato aumentato rispetto al valore precedente e impostato al valore di 25°C; ciò giustifica l'innalzamento delle temperature ambiente negli ultimi giorni di luglio 2013.

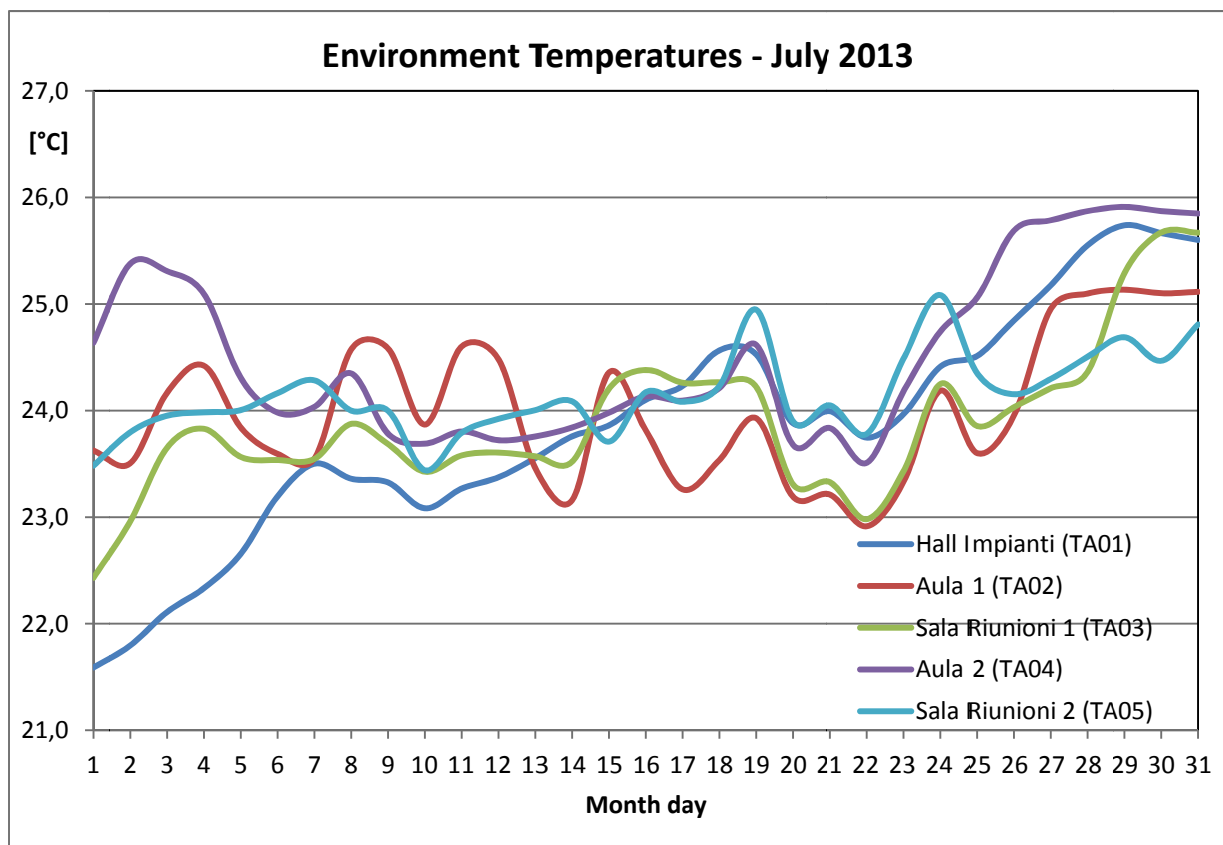


Figura 98. Andamento della temperature degli ambienti interni nel mese di Luglio 2013

3.2.3 Periodo di monitoraggio 1 Agosto -31 Agosto 2013

Il mese di Agosto è stato caratterizzato da temperature dell'aria esterna (Figura 99) maggiori sia del mese di giugno che del mese di luglio 2013 (valore medio pari a 27°C). Il funzionamento dell'impianto è stato di tipo discontinuo (dalle ore 7.00 alle ore 18.00) per tutti i giorni della settimana.

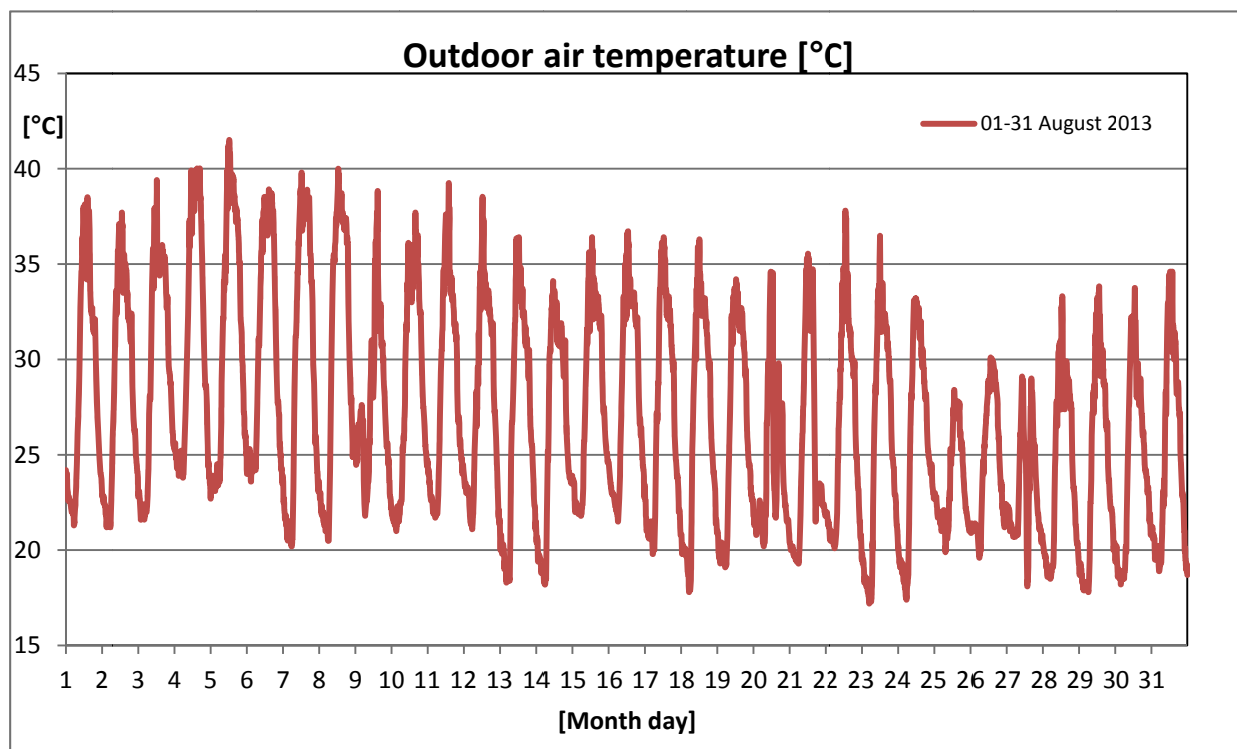


Figura 99. Andamento della temperature dell'aria esterna nel mese di Agosto 2013

A causa di un mal funzionamento del conta termie FE01 che contabilizza l'energia prodotta dal campo solare, è stato necessario stimarne il valore a partire dall'energia contabilizzata dal conta termie FE02, che contabilizza l'energia prodotta dal campo solare e stoccata nel serbatoio d'accumulo, attraverso il rendimento dello scambiatore interposto tra il circuito solare ed il circuito di carico del serbatoio.

Nel mese di agosto 2013 il grado di occupazione dell'edificio F-92 è stato quasi nullo a differenza di quanto è accaduto nei mesi di giugno e di luglio 2013. Ciò ha determinato un andamento pressoché costante del fabbisogno di energia frigorifera dell'edificio (Figura 100), dell'energia frigorifera prodotta dal gruppo frigo ad assorbimento (Figura 101), dell'energia dissipata dalla torre evaporativa (Figura 103) e dell'energia termica fornita in input al gruppo (Figura 102).

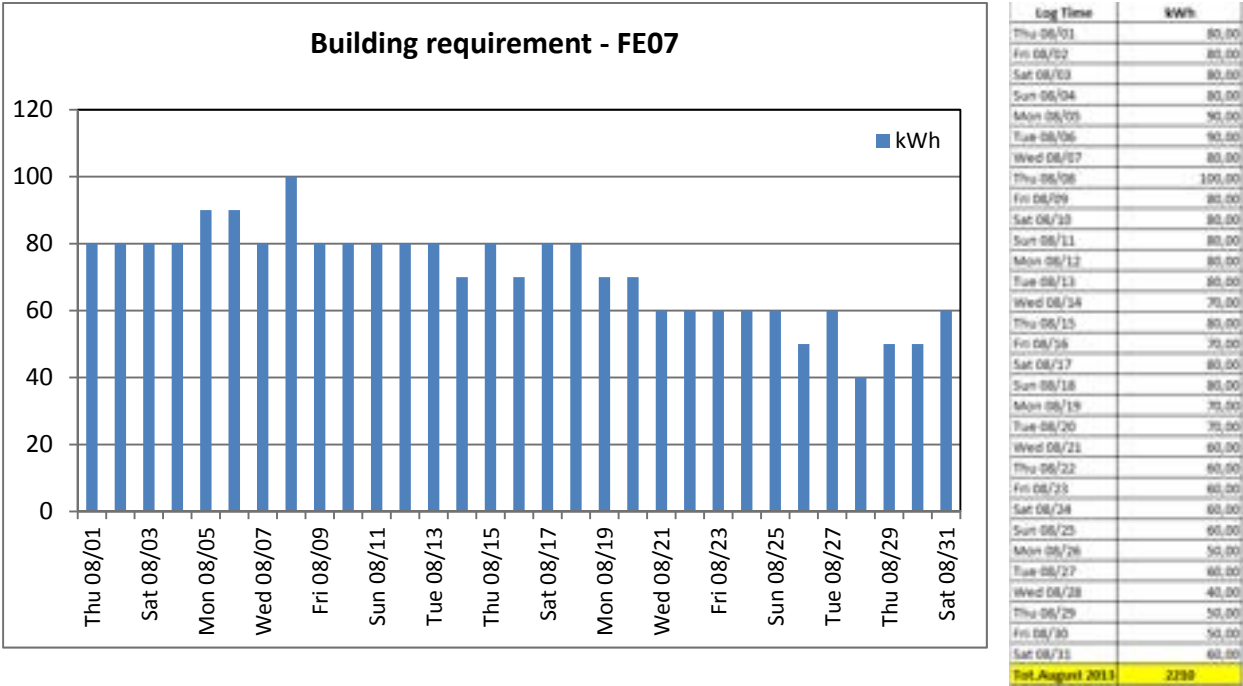


Figura 100. Fabbisogno dell’edificio (FE07) dall’ 1 al 31 Agosto 2013

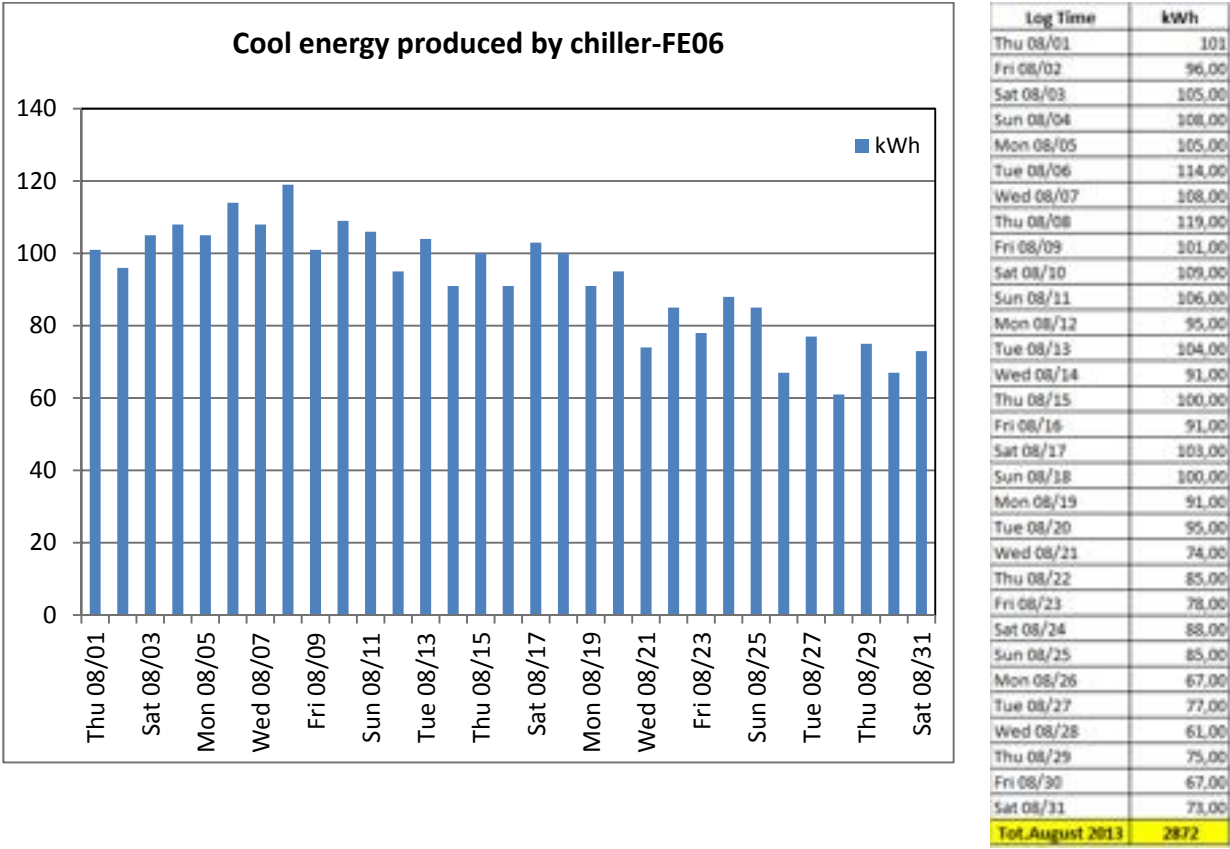


Figura 101. Acqua refrigerata prodotta dal gruppo frigo ad assorbimento (FE06) dall’ 1 al 31 Agosto 2013

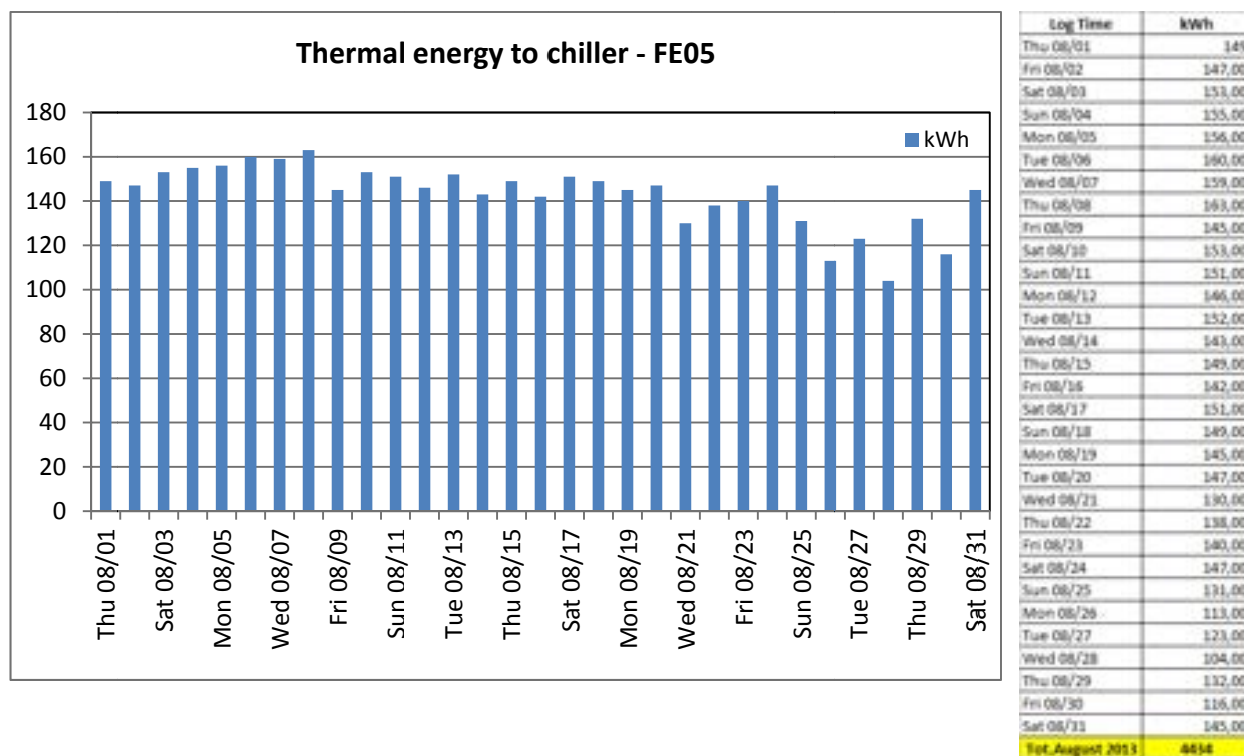


Figura 102. Energia termica in ingresso al gruppo frigo ad assorbimento (FE05) dall' 1 al 31 Agosto 2013

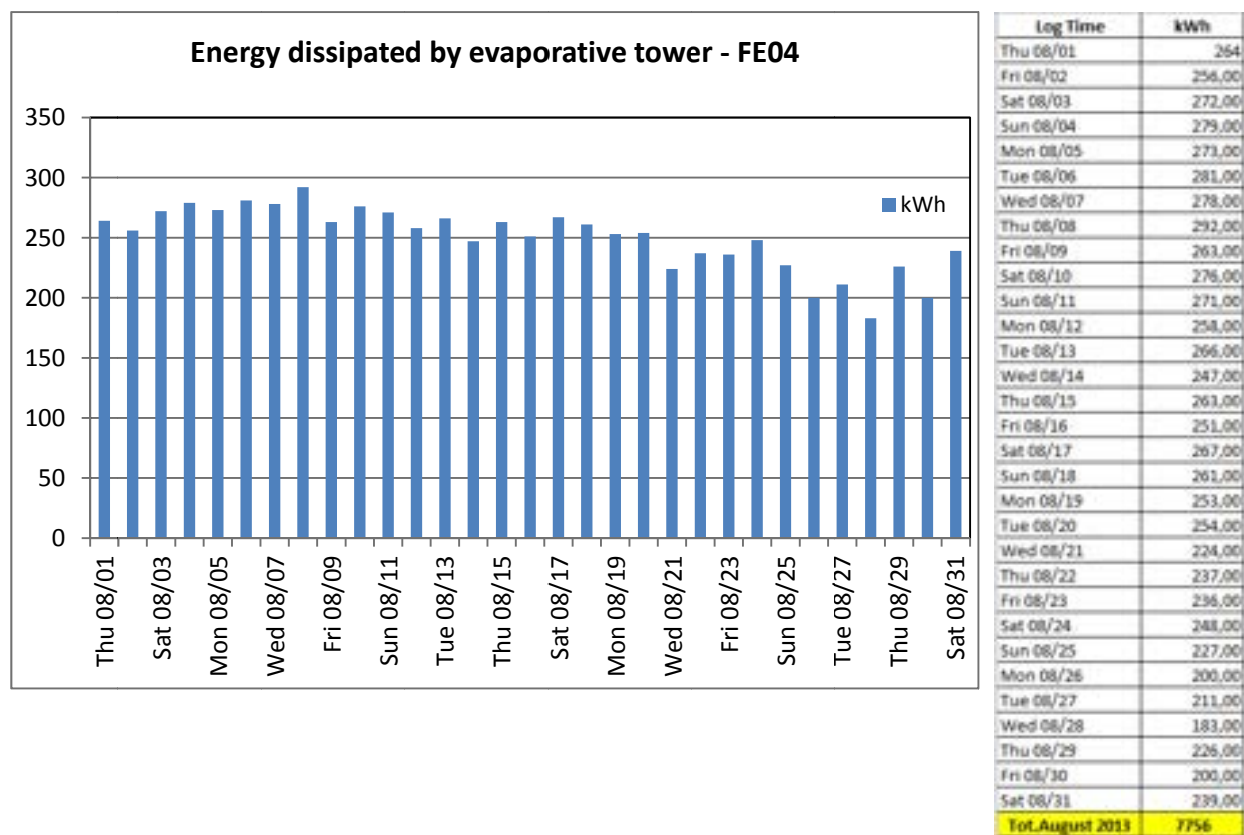


Figura 103. Energia termica dissipata dalla torre evaporativa (FE04) dall' 1 al 31 Agosto 2013

Di seguito viene riportato il bilancio energetico del gruppo frigo ad assorbimento il cui COP medio mensile è pari a 0,648, minore del valore relativo al mese di luglio 2013 (Figura 104). Nel mese di luglio

infatti l’acqua di alimentazione del gruppo è stata caratterizzata da livelli di temperatura prossimi ai valori nominali producendo quindi una maggiore quantità di energia frigorifera.

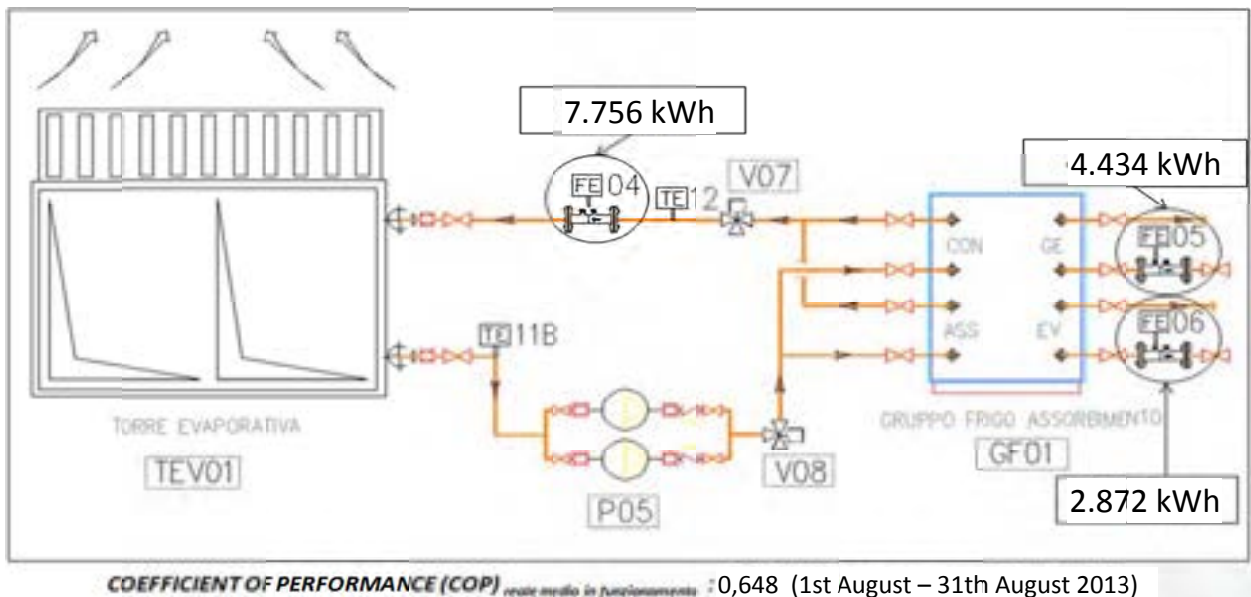


Figura 104. COP gruppo frigo assorbimento dall’ 1 al 31 Agosto 2013

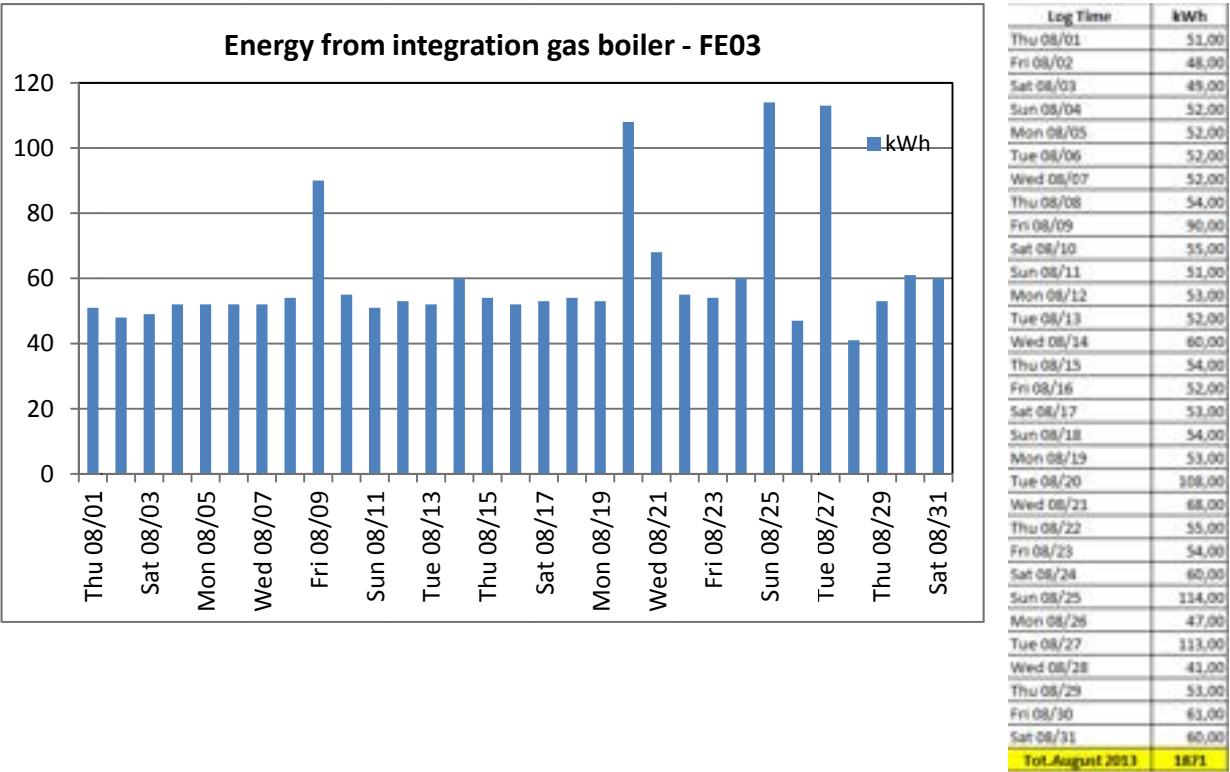


Figura 105. Energia termica fornita dalla caldaia integrativa (FE03) dall’ 1 al 31 Agosto 2013

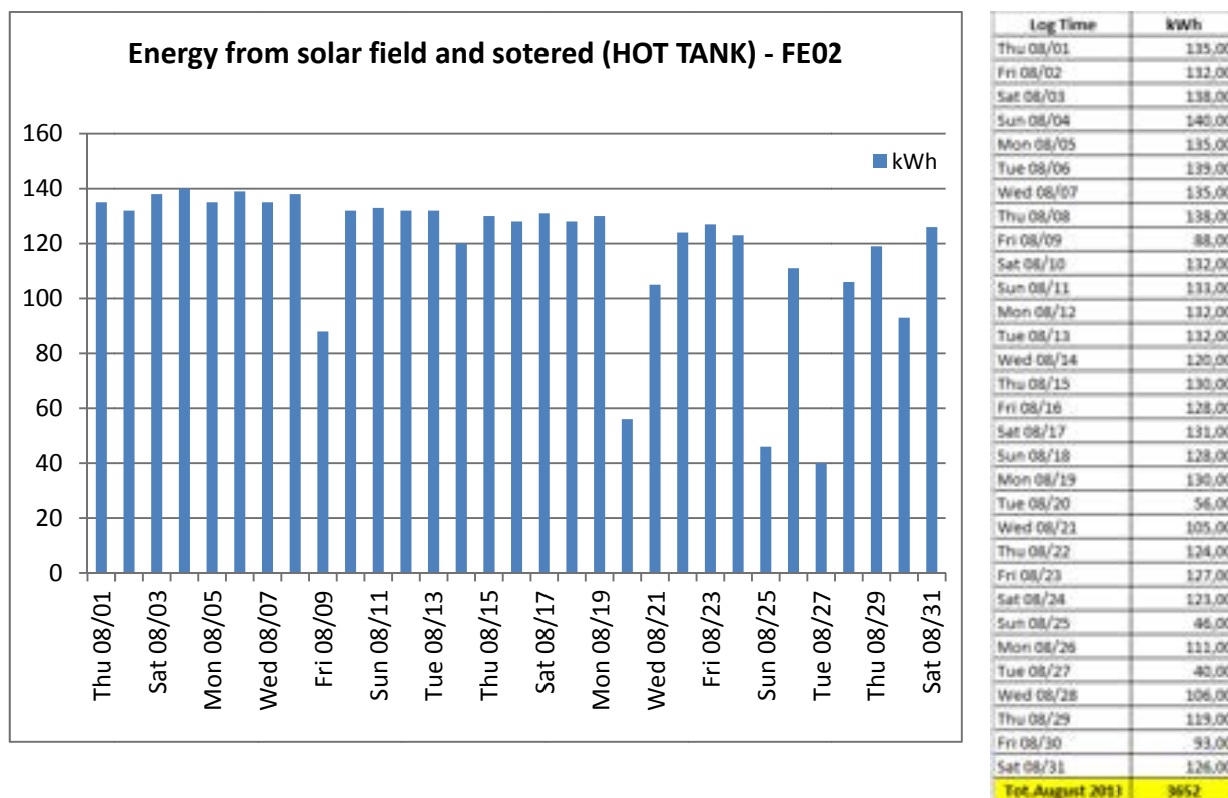


Figura 106. Energia termica fornita da campo solare stoccata nell'accumulo (FE02) dall' 1 al 31 Agosto 2013

La frazione solare nel mese di agosto 2013 del gruppo frigo ad assorbimento è stata pari al 58% (Figura 107).

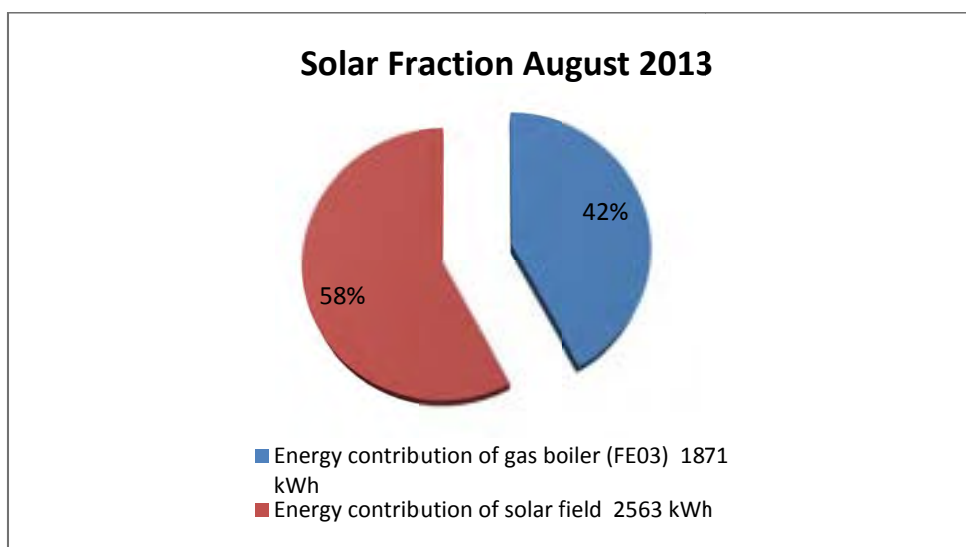


Figura 107. Frazione solare dall' 1 al 31 Agosto 2013

Tale valore di frazione solare è stato ottenuto garantendo le condizioni di comfort termico degli ambienti climatizzati. Le temperature degli ambienti si sono mantenute prettamente all'interno della banda 25°C-26°C ad eccezione della temperatura della hall impianti soggetta ad un setpoint differente. L'andamento

della temperatura dell'aula del piano primo (TA04) tra i giorni 20 e 26 agosto (Figura 108) è stato causato dallo spegnimento in locale dell'impianto da parte degli occupanti.

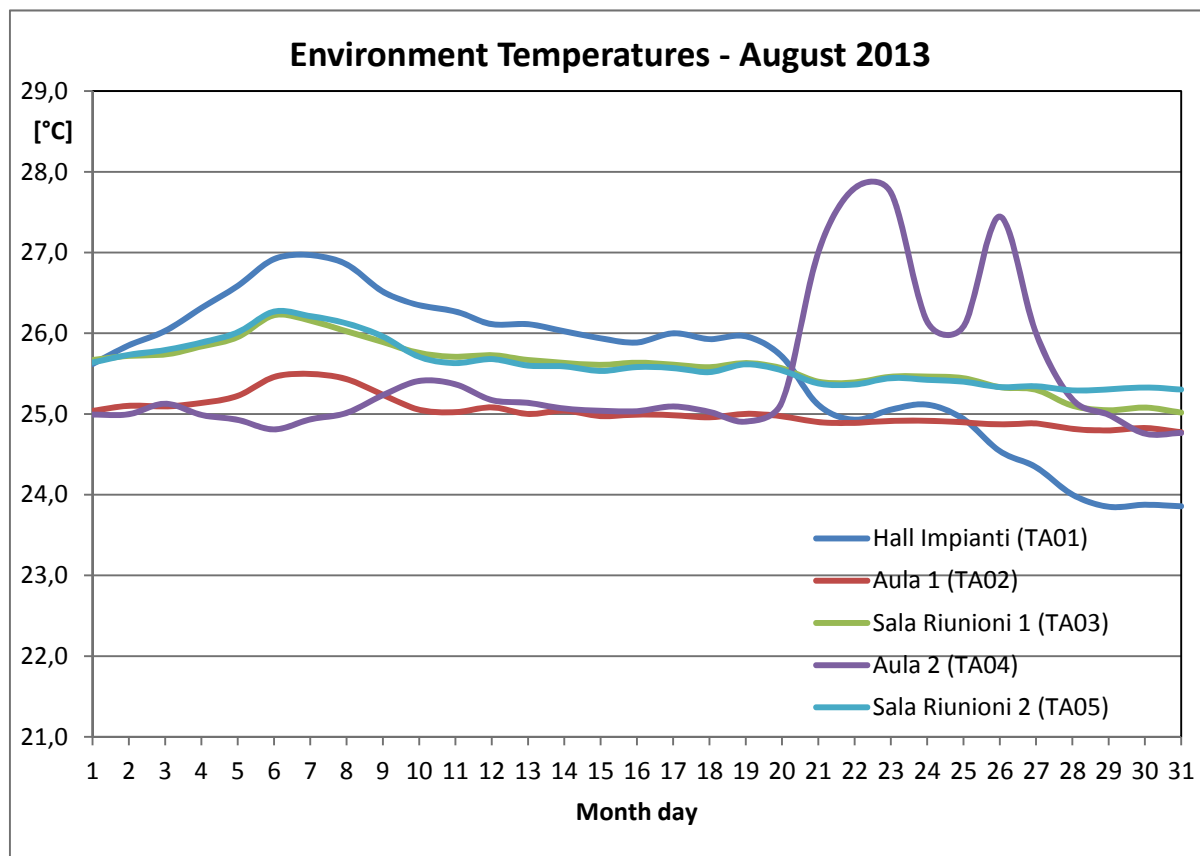


Figura 108. Andamento della temperature degli ambienti interni nel mese di Agosto 2013

Di seguito i risultati della stagione estiva di monitoraggio dell'impianto in modalità solar cooling: i contatermie utilizzati per il monitoraggio dell'impianto ci consentono di valutare l'iter subito dall'energia fornita agli ambienti interni sia dal campo solare che dalla caldaia integrativa (Figura 109).



Figura 109. Schema produzione e fornitura energia a partire dai collettori solari (estate)

In Figura 156 si riportano i flussi energetici necessari alla valutazione del COP (Coefficient of performance), nelle reali condizioni di funzionamento, del gruppo frigo ad assorbimento:

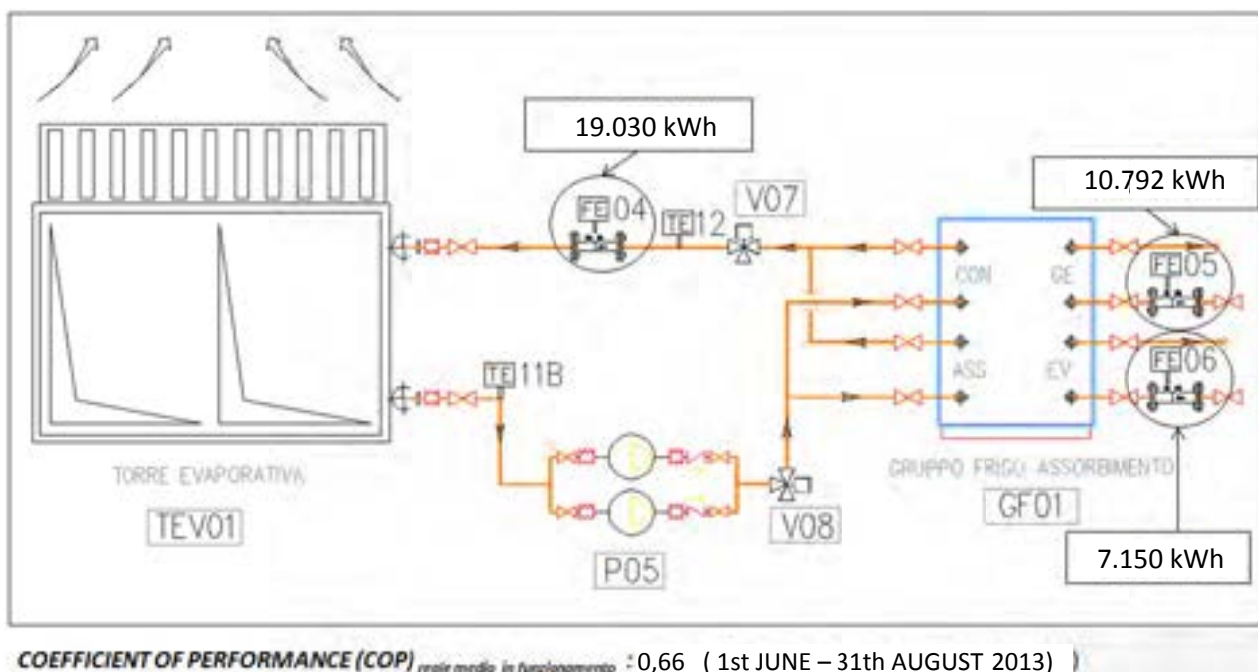


Figura 110. Valutazione prestazioni reali gruppo frigo ad assorbimento

Rispetto al valore di targa ($COP=0,7$), si è constatato un rendimento inferiore ($COP_{medio}=0,66$) rispetto al valore atteso poiché non sempre il gruppo frigo ha lavorato in condizioni nominali di funzionamento ($T_{acqua\ calda\ in}=88^{\circ}C$). Lavorando con temperatura dell'acqua inferiori, il gruppo riduce infatti di molto il COP (Figura 111).

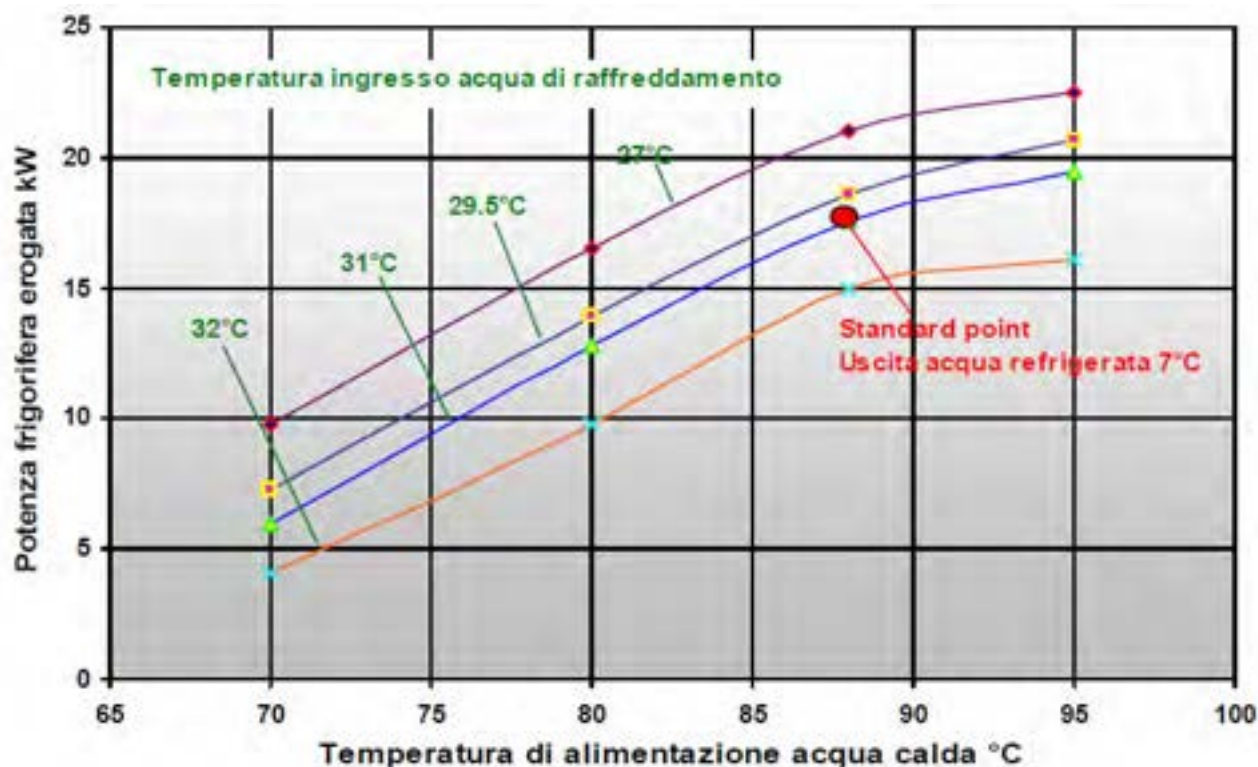


Figura 111. Curve caratteristiche di prestazione gruppo frigo YAZAKI mod. WFC-SC5

Fonte: Documentazione Tecnica Maya – Yazaki WSC – SC 5

Nei mesi monitorati, le condizioni meteo e termo igrometriche esterne variano, determinando una diversa radiazione solare incidente sui collettori. E' da notare come, nel periodo invernale la quota di energia dissipata con il dry-cooler è inferiore a quella dissipata nel periodo estivo dello stesso anno. Questo aspetto è legato al dimensionamento del campo solare, effettuato per garantire durante il periodo estivo l'energia termica necessaria per il funzionamento del gruppo frigo ad assorbimento e dell'accumulo a cambiamento di fase ottimizzato sul funzionamento invernale (Figura 112).

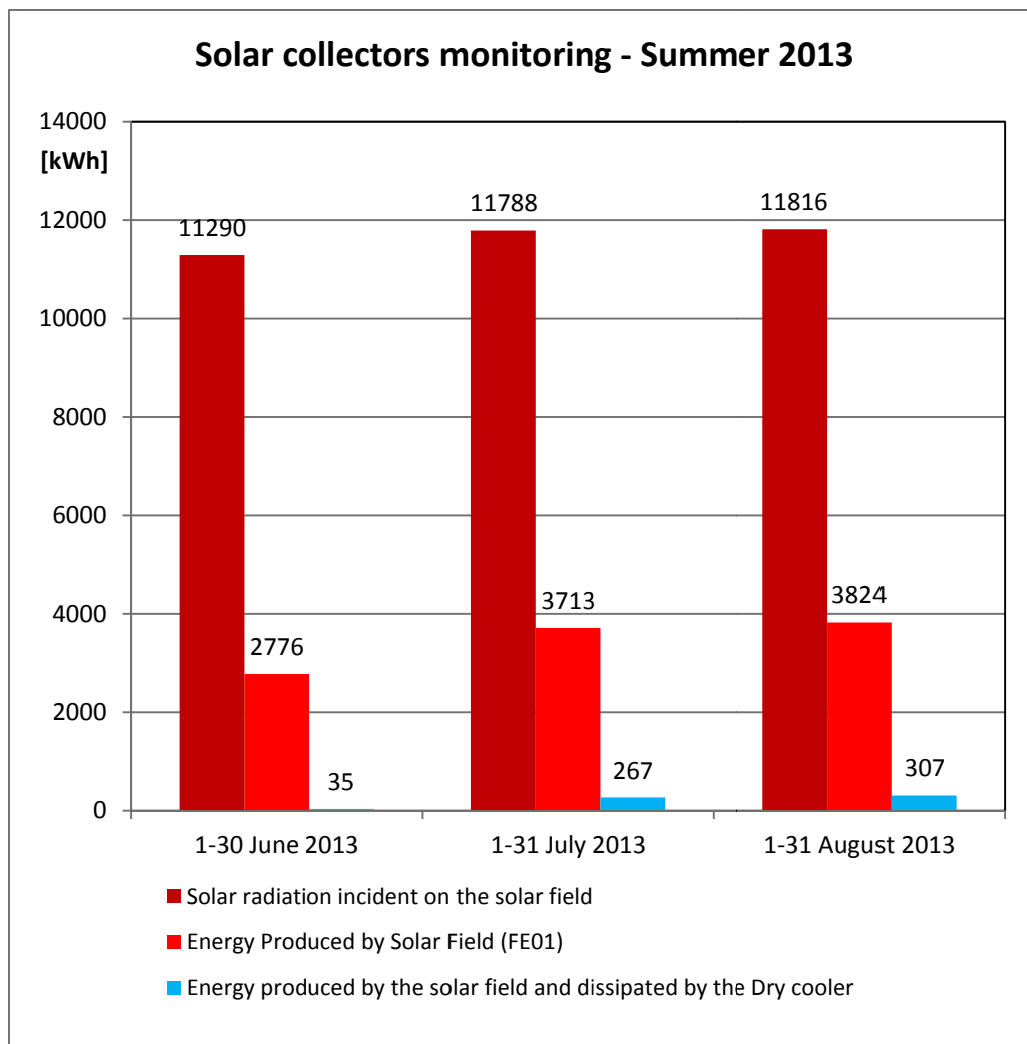


Figura 112. Radiazione solare incidente sul piano dei collettori solari termici durante il periodo di monitoraggio estivo 2013

Nella Figura 113 si riporta l'energia effettivamente fornita dal campo solare per alimentare il gruppo frigo, depurata dalle perdite precedentemente descritte ($A+B=D1$ e $D2_a+D2_b=D2$) e considerando che l'energia termica scambiata tra il circuito primario solare e l'accumulo differisce da quella effettivamente utilizzata (kWh utili solari) a causa della temperatura dell'acqua accumulata, non sempre sufficiente ad alimentare il gruppo frigo ($T_{min}=80^{\circ}C$) (Calore accumulato ma non utilizzato: $D3$).

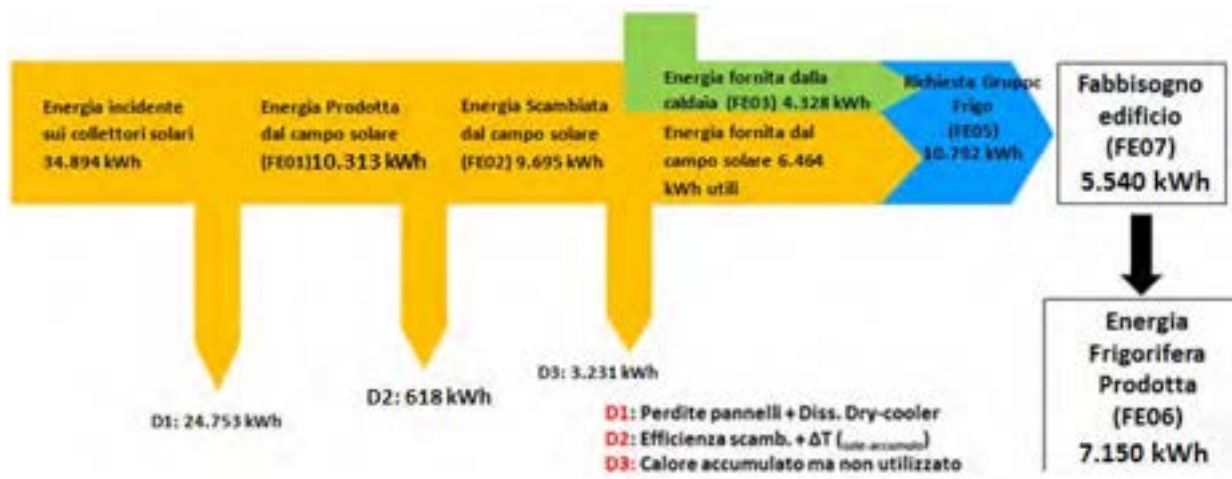


Figura 113. Diagramma del Flusso energetico di tutto il periodo di monitoraggio estivo 1 Giugno – 31 Agosto 2013

In Figura 114 si riporta, per i vari mesi monitorati, il contributo termico al gruppo frigo ad assorbimento fornito dal campo solare e dalla caldaia integrativa:

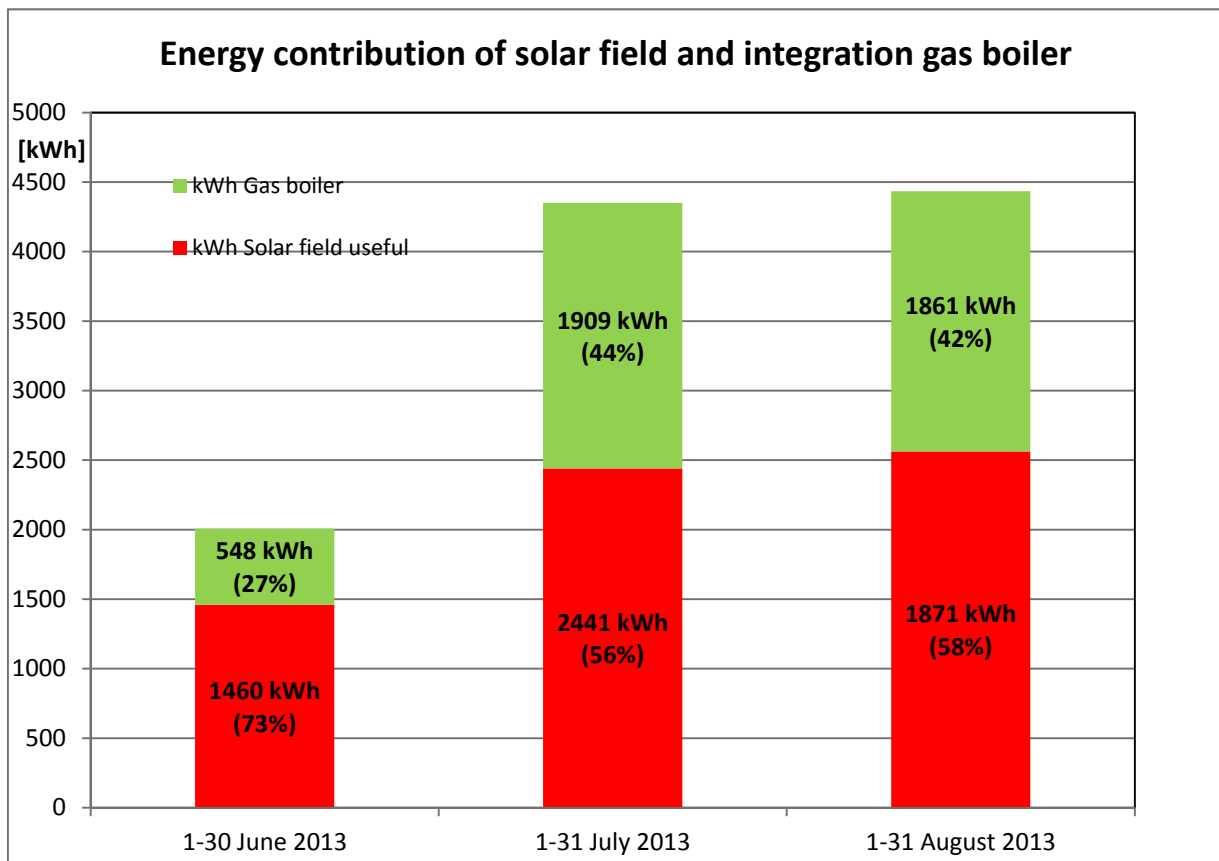


Figura 114. Contributi energetici della caldaia integrativa e del campo solare in ingresso al gruppo frigo ad assorbimento nel monitoraggio estivo 2013

Riepilogando il comportamento dell'impianto di solar cooling durante l'intero periodo di monitoraggio, si può calcolare la frazione solare dell'energia in ingresso al gruppo frigo (Figura 115):

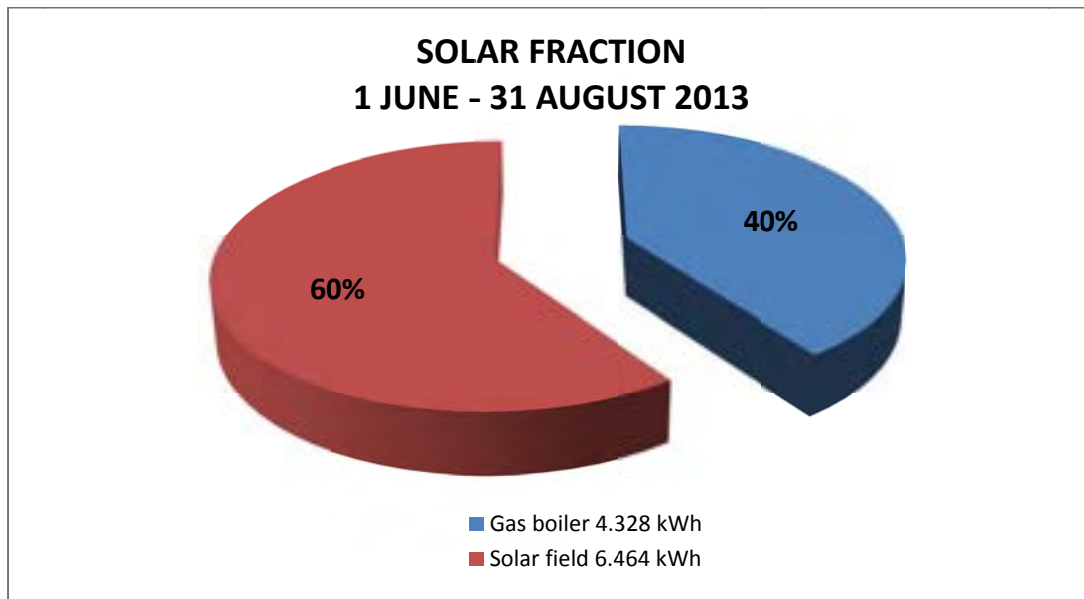


Figura 115. Frazione solare impianto di solar cooling C.R.Enea di Casaccia nell'estate 2013

La frazione solare sopra riportata è stata ottenuta sempre garantendo le condizioni di comfort termigrometrico all'interno degli ambienti serviti dall'impianto di solar cooling (Figura 116-Tabella 25).

I primi giorni del monitoraggio non sono stati caratterizzati dal funzionamento dell'impianto a causa del clima non decisamente estivo determinando quindi temperature ambienti al di sotto dei 24°C. Il 24 giugno 2013 ha avuto inizio un percorso di formazione all'interno dell'edificio che ha subito quindi un cambiamento repentino in termini di occupazione. Tra gli ultimi giorni di giugno ed i primi di luglio il setpoint ambiente è stato impostato a 24°C determinando un funzionamento più spinto dell'impianto. L'andamento della temperatura dell'aula del piano primo (TA04) tra i giorni 20 e 26 agosto (Figura 116) è stato causato da uno spegnimento in locale dell'impianto da parte degli occupanti.

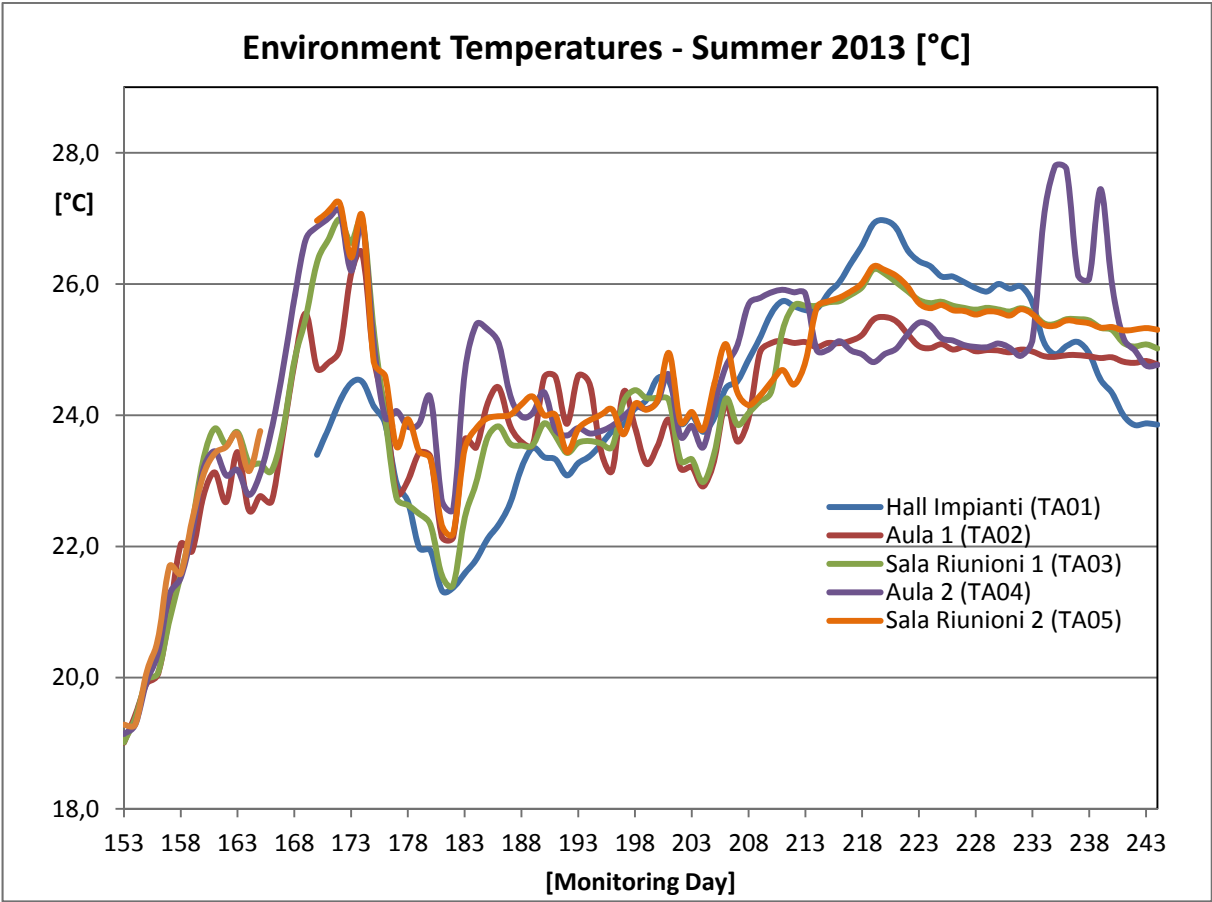


Figura 116. Frazione solare impianto di solar cooling C.R. ENEA di Casaccia 2013

Tabella 25: Numerazione giorni di monitoraggio del periodo estivo 2013

Month	day	Monitoring Day	Month	day	Monitoring Day	Month	day	Monitoring Day
01/06/2013		153	01/07/2013		183	01/08/2013		214
02/06/2013		154	02/07/2013		184	02/08/2013		215
03/06/2013		155	03/07/2013		185	03/08/2013		216
04/06/2013		156	04/07/2013		186	04/08/2013		217
05/06/2013		157	05/07/2013		187	05/08/2013		218
06/06/2013		158	06/07/2013		188	06/08/2013		219
07/06/2013		159	07/07/2013		189	07/08/2013		220
08/06/2013		160	08/07/2013		190	08/08/2013		221
09/06/2013		161	09/07/2013		191	09/08/2013		222
10/06/2013		162	10/07/2013		192	10/08/2013		223
11/06/2013		163	11/07/2013		193	11/08/2013		224
12/06/2013		164	12/07/2013		194	12/08/2013		225
13/06/2013		165	13/07/2013		195	13/08/2013		226
14/06/2013		166	14/07/2013		196	14/08/2013		227
15/06/2013		167	15/07/2013		197	15/08/2013		228
16/06/2013		168	16/07/2013		198	16/08/2013		229
17/06/2013		169	17/07/2013		199	17/08/2013		230
18/06/2013		170	18/07/2013		200	18/08/2013		231
19/06/2013		171	19/07/2013		201	19/08/2013		232
20/06/2013		172	20/07/2013		202	20/08/2013		233
21/06/2013		173	21/07/2013		203	21/08/2013		234
22/06/2013		174	22/07/2013		204	22/08/2013		235
23/06/2013		175	23/07/2013		205	23/08/2013		236
24/06/2013		176	24/07/2013		206	24/08/2013		237
25/06/2013		177	25/07/2013		207	25/08/2013		238
26/06/2013		178	26/07/2013		208	26/08/2013		239
27/06/2013		179	27/07/2013		209	27/08/2013		240
28/06/2013		180	28/07/2013		210	28/08/2013		241
29/06/2013		181	29/07/2013		211	29/08/2013		242
30/06/2013		182	30/07/2013		212	30/08/2013		243
			31/07/2013		213	31/08/2013		244

La logica di regolazione gestisce allo stesso modo del 2012 il mantenimento della temperatura di set point ambiente mediante l'impianto a pannelli radianti a pavimento (alimentato con acqua in ingresso a $T_{in\ pannelli} = 14^{\circ}\text{C}$) ed effettua il raggiungimento del set point con l'impianto a ventilconvettori (alimentato con acqua in ingresso a $T_{in\ fancoil} = 7^{\circ}\text{C}$): questa soluzione ha consentito di ottimizzare la produzione di acqua refrigerata necessitando di acqua molto fredda solo nelle ore più calde della giornata, quando il contributo dell'energia termica, in ingresso al gruppo frigo, è prodotta quasi interamente dal campo solare. La caldaia entrerà in funzione solo quando le temperature nei vari ambienti non sono soddisfatte e l'accumulo freddo è stato quasi del tutto utilizzato.

3.3 Confronto tra i risultati del monitoraggio estivo 2012 e del monitoraggio estivo 2013

Il confronto tra il monitoraggio estivo del 2012 e il monitoraggio estivo del 2013 è affrontato mese per mese. Verranno quindi confrontati i mesi di giugno, luglio ed agosto dei due differenti anni. Oltre che in funzione delle diverse condizioni al contorno sia in termini meteorologiche che di uso dell'edificio, i risultati verranno confrontati in modo tale da capire se ed in che modo l'installazione di un accumulo a cambiamento di fase ha inciso sulle prestazioni dell'impianto di solar heating and cooling anche in funzionamento cooling.

3.3.1 Confronto mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013

L'andamento della temperatura dell'aria esterna è simile nei mesi di giugno 2012 e di giugno 2013 ad eccezione degli ultimi giorni in cui il mese di giugno 2013 presenta dei valori più bassi. Il mese di giugno 2013 è infatti caratterizzato da una temperatura media mensile di circa 23°C contro i 24,5°C del mese di giugno 2012 (Figura 117). La radiazione solare incidente sui collettori solari è invece simile nei due mesi (Figura 118). Il profilo di funzionamento dell'impianto è di tipo discontinuo cioè dalle ore 9 alle ore 19 a giugno 2012 mentre discontinuo dalle ore 7 alle ore 18 a giugno 2013.

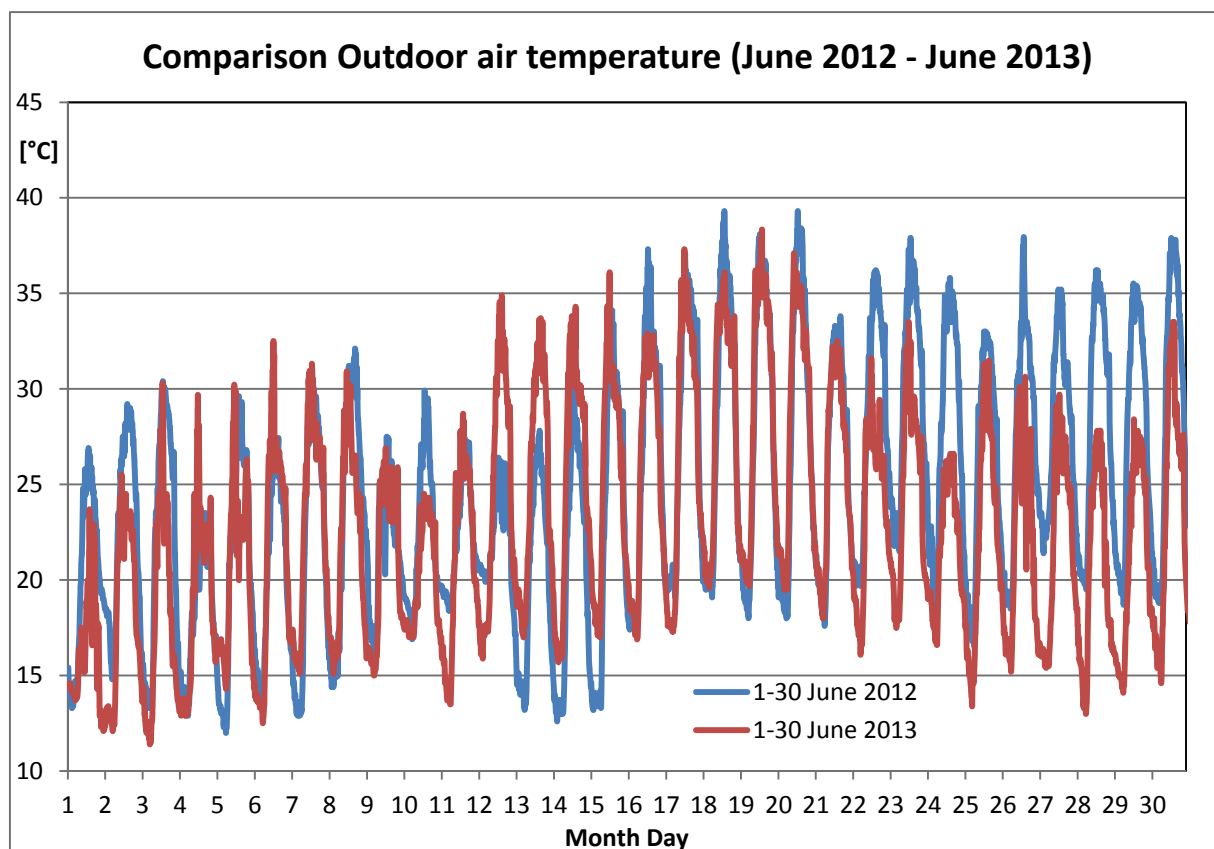


Figura 117. Confronto temperatura aria esterna nei mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013

L'andamento delle temperature degli ambienti climatizzati è confrontato attraverso la comparazione delle temperature relative alle aule del piano terra e del piano primo. Rispetto al 2012, tali temperature nella seconda metà di giugno 2013 hanno un andamento che si discosta dai valori del 2012 a causa di un grado di occupazione differente (Figura 118).

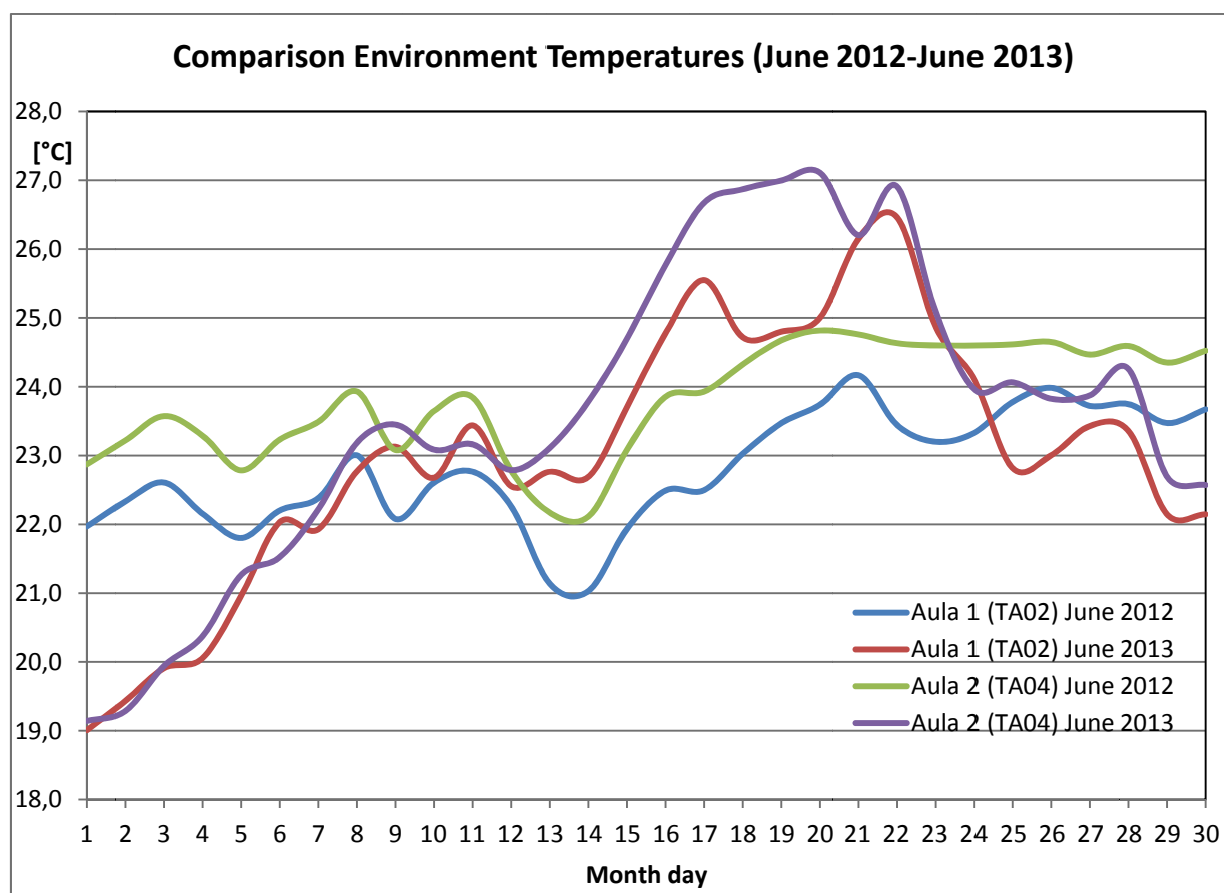


Figura 118. Confronto temperature ambienti interni nei mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013

Nel mese di giugno 2013, l'energia termica dissipata è inferiore rispetto al mese di giugno 2012 (Figura 119) in quanto l'energia termica richiesta in input al gruppo frigo ad assorbimento è inferiore a giugno 2013 rispetto a giugno 2012 così come il fabbisogno energetico dell'edificio per la climatizzazione degli ambienti. Il mese di giugno 2012 è stato infatti caratterizzato da un clima più caldo e quindi da un maggior fabbisogno energetico dell'edificio per la climatizzazione. L'acqua contenuta nel serbatoio d'accumulo a cambiamento di fase mostra nel mese di giugno 2013 è caratterizzata da valori più elevati rispetto al mese di giugno 2012 (Figura 120).

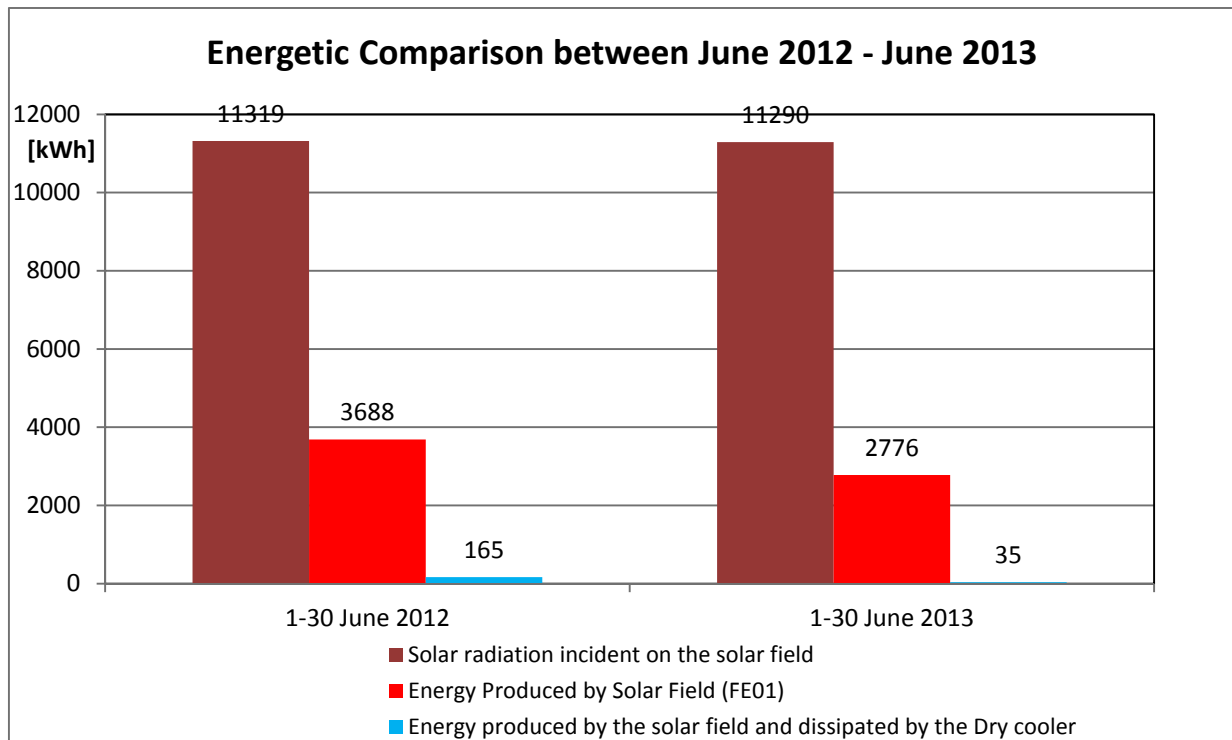


Figura 119. Confronto energetico nei mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013

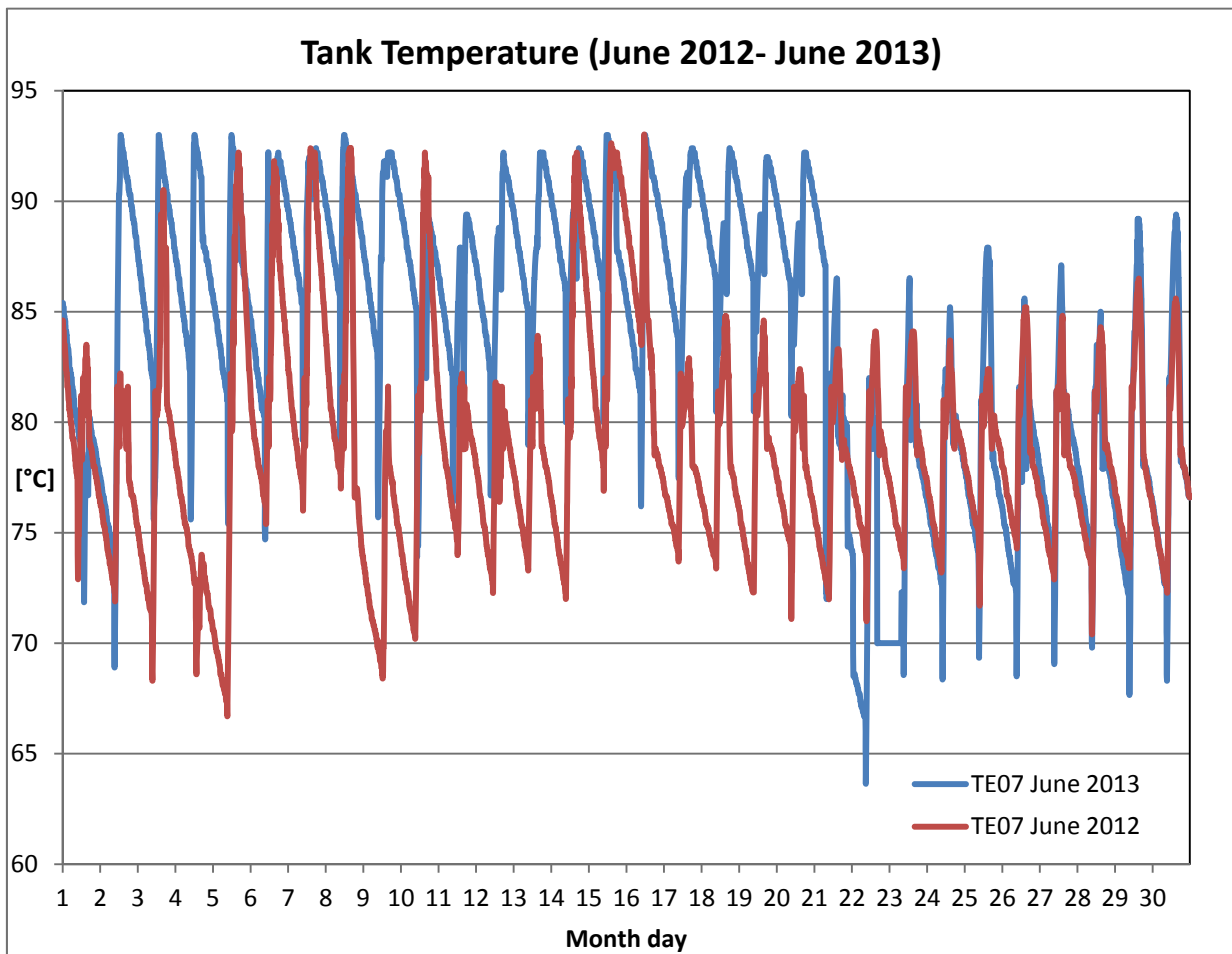


Figura 120. Confronto temperatura accumulo nei mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013

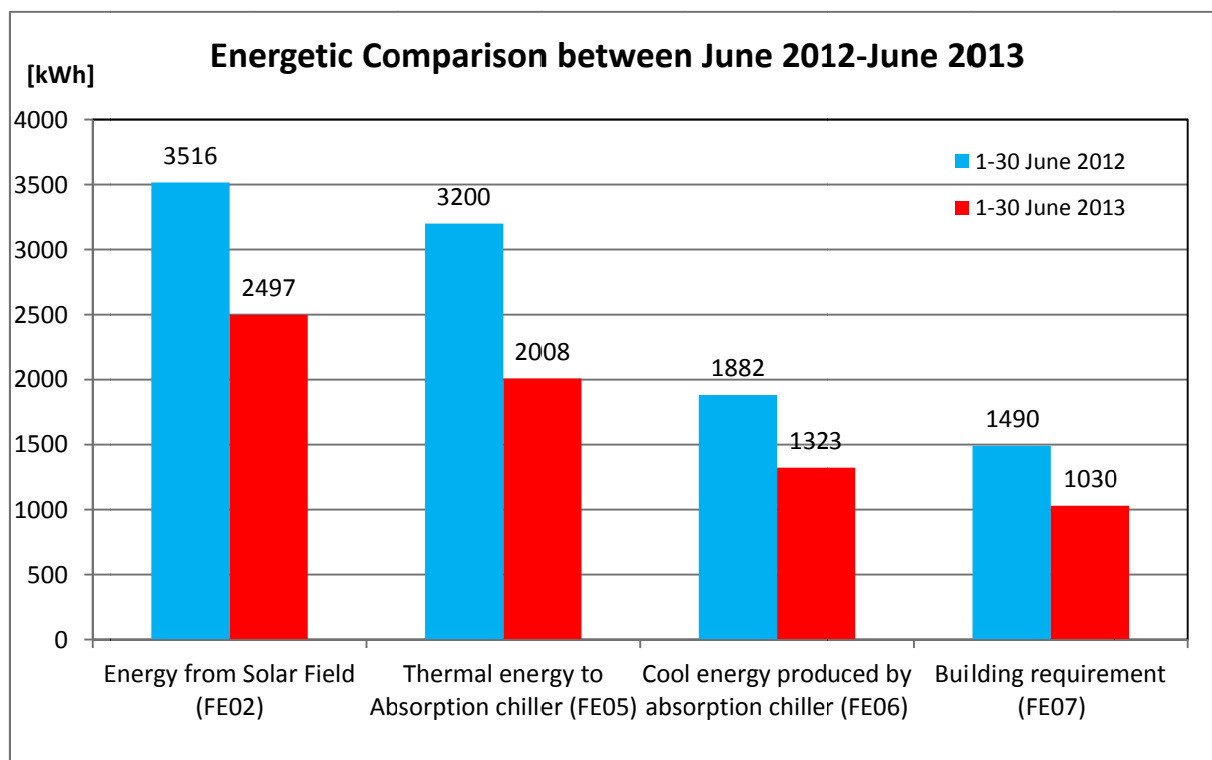


Figura 121. Confronto conta termie nei mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013

I flussi energetici in gioco nel mese di giugno 2013 sono tali da determinare una stessa frazione solare rispetto al mese di giugno 2012 (Figura 121-122). Le prestazioni del gruppo frigo ad assorbimento sono migliori ($COP=0,659$) rispetto a quelle del mese di giugno 2012 ($COP=0,588$) in quanto i valori di temperatura dell'acqua di alimentazione del gruppo sono più vicini ai valori nominali.

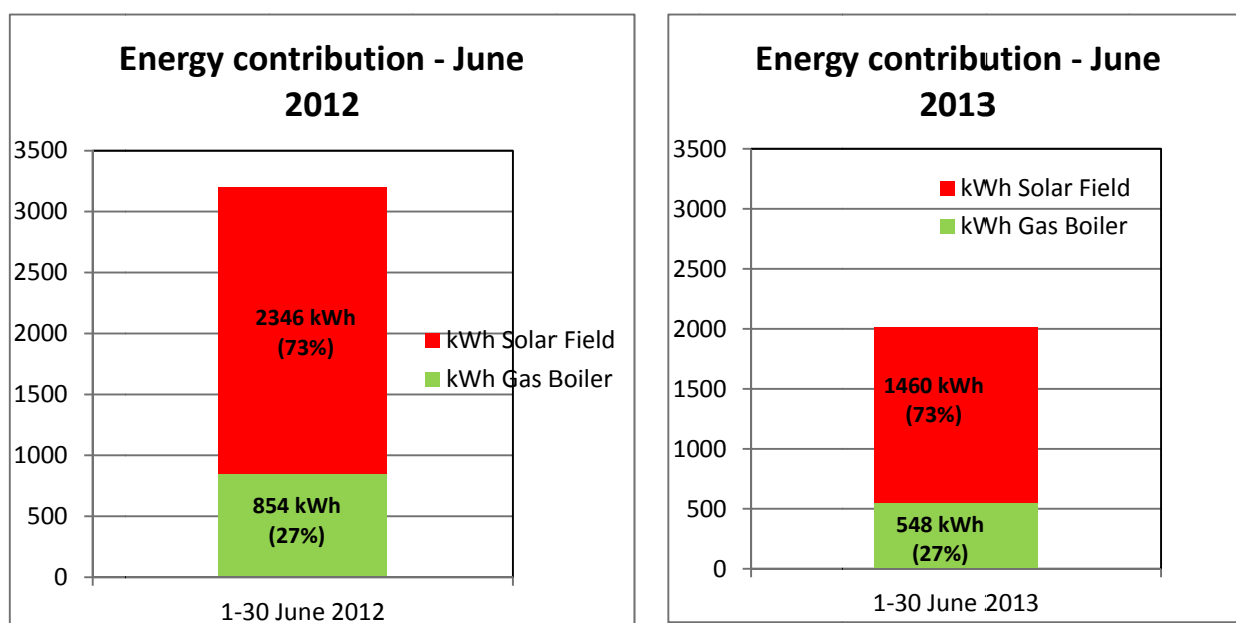


Figura 122. Confronto frazione solare nei mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013

Di seguito viene fornito un riepilogo del confronto tra i mesi di giugno 2012 e di giugno 2013 (Tabella 26).

Tabella 26. Riepilogo confronto nei mesi di Giugno 2012 e Giugno 2013

	1-30 JUNE 2012	1-30 JUNE 2013	
SOLAR RADIATION ON SOLAR COLLECTORS	11319	11290	[kWh]
MEDIUM OUTDOOR AIR TEMPERATURE	24,5	22,8	[°C]
THERMAL ENERGY TO ABSORPTION CHILLER (FE05)	3200	2008	[kWh]
ENERGY FROM INTEGRATION GAS BOILER (FE03)	854	548	[kWh]
ENERGY FROM SOLAR FIELD	2346	1460	[kWh]
SOLAR FRACTION	73	73	%

3.3.2 Confronto mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013

Le condizioni climatiche nei mesi di luglio 2012 e di luglio 2013 sono simili da un anno all'altro sia per quanto riguarda la radiazione solare incidente sui collettori solari sia per quanto riguarda la temperatura media mensile dell'aria esterna (Figura 123 26,6 °C e 26,9°C). Il profilo di funzionamento dell'impianto è di tipo discontinuo cioè dalle ore 9 alle ore 19 a luglio 2012 mentre discontinuo dalle ore 7 alle ore 18 a luglio 2013. I primi cinque giorni di luglio 2013 sono caratterizzati da temperature degli ambienti più alte rispetto al 2012 in quanto l'aula 1 e l'aula 2 sono stata occupate intensamente per tutto l'arco della giornata. Le temperature di tali aule nel 2012 si collocano quindi ad un livello inferiore essendo caratterizzate da un grado di occupazione decisamente inferiore (Figura 124).

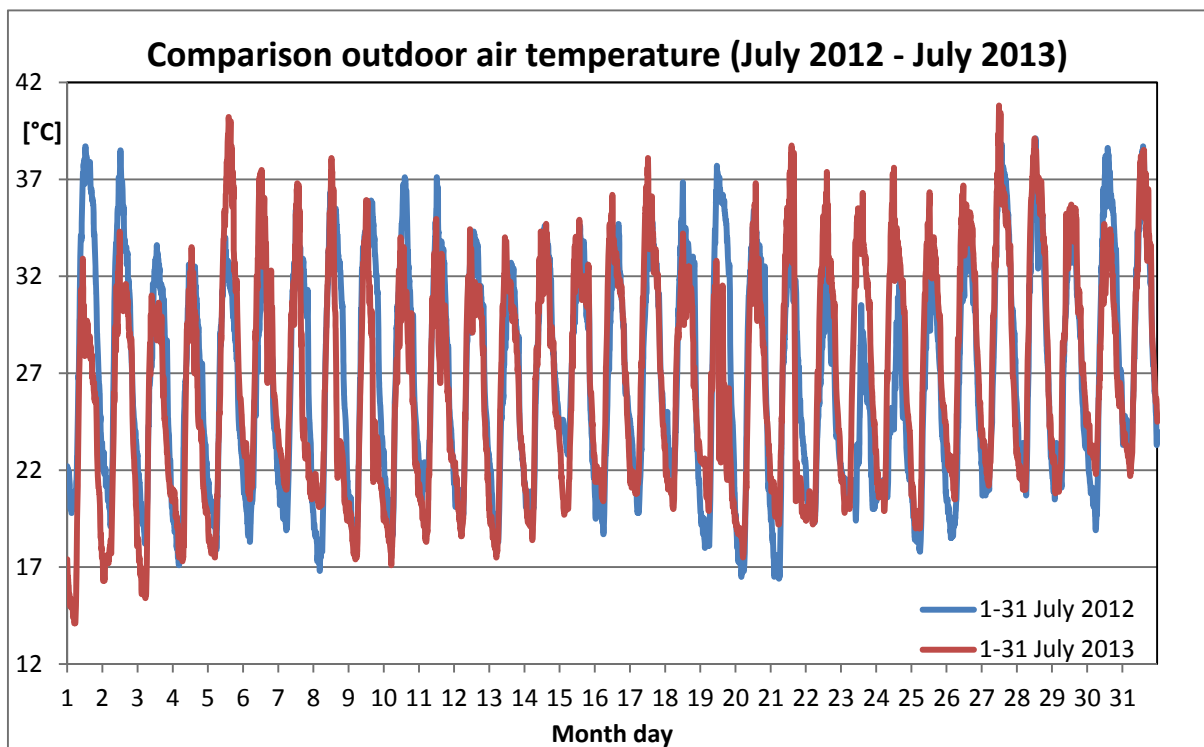


Figura123. Confronto temperatura aria esterna nei mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013

La banda entro la quale sono state mantenute le temperature ambienti nel 2013 ha un'ampiezza maggiore rispetto al 2012 a causa di un grado di occupazione differente degli ambienti interni. Negli ultimi giorni di luglio 2013 il setpoint delle temperature ambiente è stato aumentato rispetto al valore precedente e impostato al valore di 25°C; ciò giustifica l'innalzamento delle temperature ambiente negli ultimi giorni di luglio 2013.

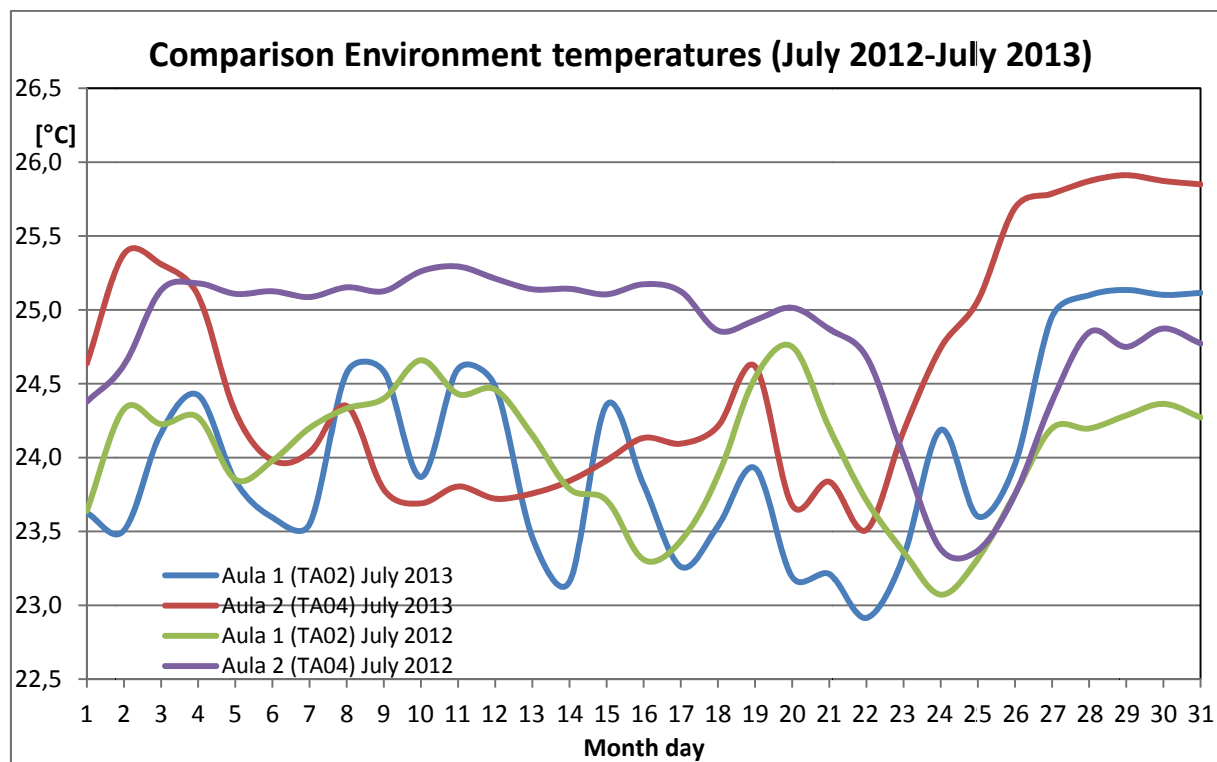


Figura 124. Confronto temperature ambienti interni nei mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013

La radiazione solare nei due mesi differisce di poco mentre invece l'energia termica dissipata dal dry cooler è maggiore nel mese di luglio 2013 rispetto al corrispondente mese dell'anno precedente. Per far fronte ad un grado di occupazione decisamente superiore rispetto a mese di luglio 2012, nel mese di luglio 2013 l'impianto viene fatto funzionare a partire dalle ore 7 anziché dalle ore 9 del mattino. Ciò determina il raggiungimento della temperatura massima dell'acqua all'interno dell'accumulo in maniera più veloce rispetto al caso del 2012 e di conseguenza una maggiore aliquota di energia viene dissipata attraverso il dry cooler (Figure 125).

Anche nel mese di luglio 2013 le temperature raggiunte dall'acqua contenuta nell'accumulo a cambiamento di fase sono maggiori di quelle raggiunte a luglio 2012 caratterizzato invece dalla presenza del serbatoio classico (Figura 126). In Figura 127 sono riportati gli andamenti delle temperature dell'acqua contenuta nell'accumulo di tipo PCM e nell'accumulo classico rispettivamente nei giorni 17 luglio 2013 e 17 luglio 2012. Tali giorni sono stati scelti in quanto presentano valori simili sia di radiazione solare giornaliera che di temperatura media giornaliera dell'aria esterna. La temperatura dell'accumulo PCM (TE07 17 July 2013) presenta un andamento decrescente con pendenza sommariamente costante fino all'accensione dell'impianto (ore 7:00); l'accensione della caldaia dalle 7:10 alle 7:20 e dalle 8:00 alle 8:10 limita la decrescita della TE07 17 July 2013. Successivamente tale temperatura decresce repentinamente in seguito al prelievo di energia termica dall'accumulo. Dalle 10:20 fino allo spegnimento dell'impianto (ore 18:00) l'accumulo viene caricato fornendo contemporaneamente energia all'impianto. L'accumulo viene caricato fino al raggiungimento di 90°C circa per poi fornire energia termica fino allo spegnimento dell'impianto. In corrispondenza del raggiungimento di tali elevate temperature viene dissipata energia termica dal dry

cooler escludendo quindi il circuito di carica dell'accumulo rispettivamente alle 13:20 ed alle 14:10 per qualche minuto.

Il 17 luglio 2012 la temperatura dell'accumulo classico (TE07 17 July 2012) subisce un decremento fino all'accensione dell'impianto (ore 9:00) ed in particolare fino alla partenza della caldaia (ore 9:10) che resta in funzione per una prima volta fino alle 9:40. Al termine del secondo periodo di funzionamento della caldaia (ore 10:30-ore 10:50) la TE07 17 July 2012 raggiunge il valore massimo. Successivamente l'accumulo classico viene caricato e fornisce energia al gruppo frigo ad assorbimento fino allo spegnimento dell'impianto raggiungendo al massimo temperature di poco inferiori agli 82°C. In figura 128 vengono mostrati gli andamenti della temperatura dell'acqua che alimenta il gruppo frigo ad assorbimento: in entrambi i giorni di monitoraggio le temperature subiscono un incremento istantaneo in corrispondenza dell'accensione dell'impianto. A differenza del 17 luglio 2012, il 17 luglio 2013 è caratterizzato però da temperature di alimentazione del gruppo frigo intorno agli 88°C che rappresentano le condizioni nominali di funzionamento del gruppo frigo determinando quindi COP maggiori rispetto al caso del 2012.

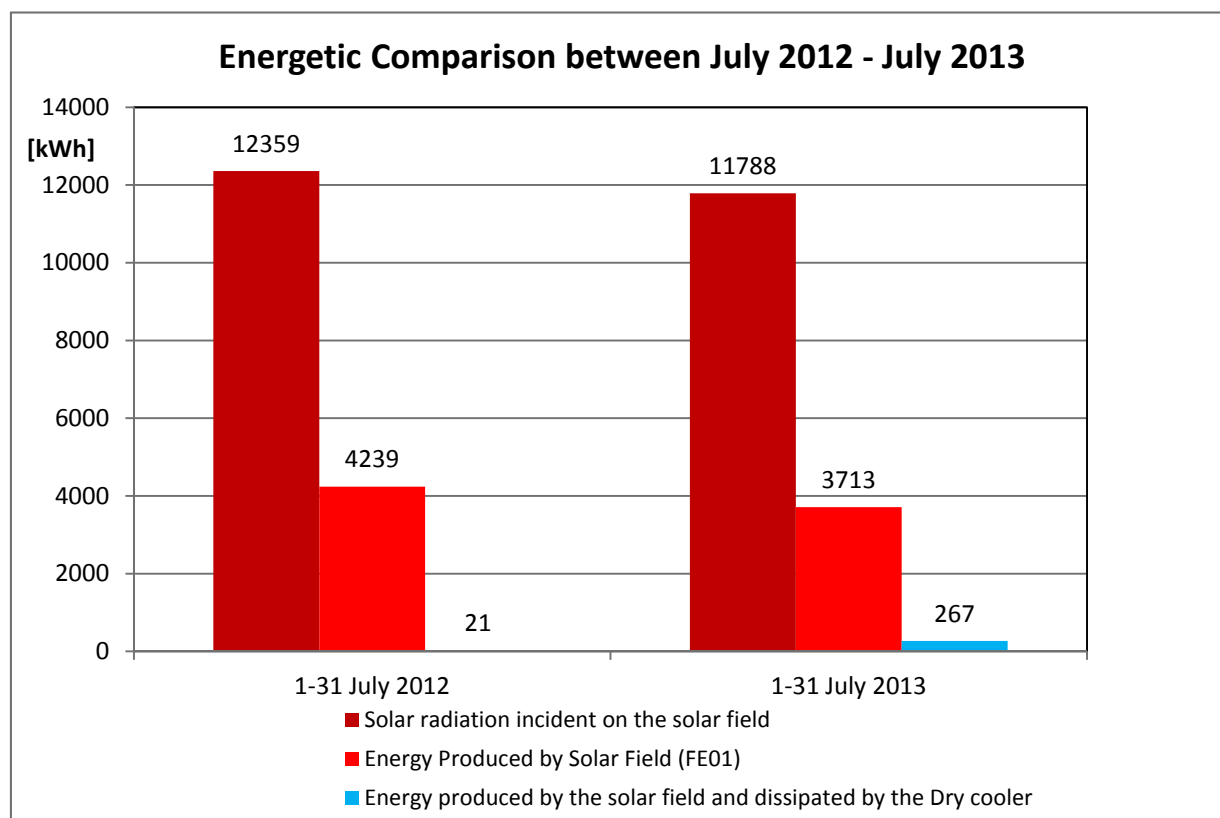


Figura 125. Confronto energetico nei mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013

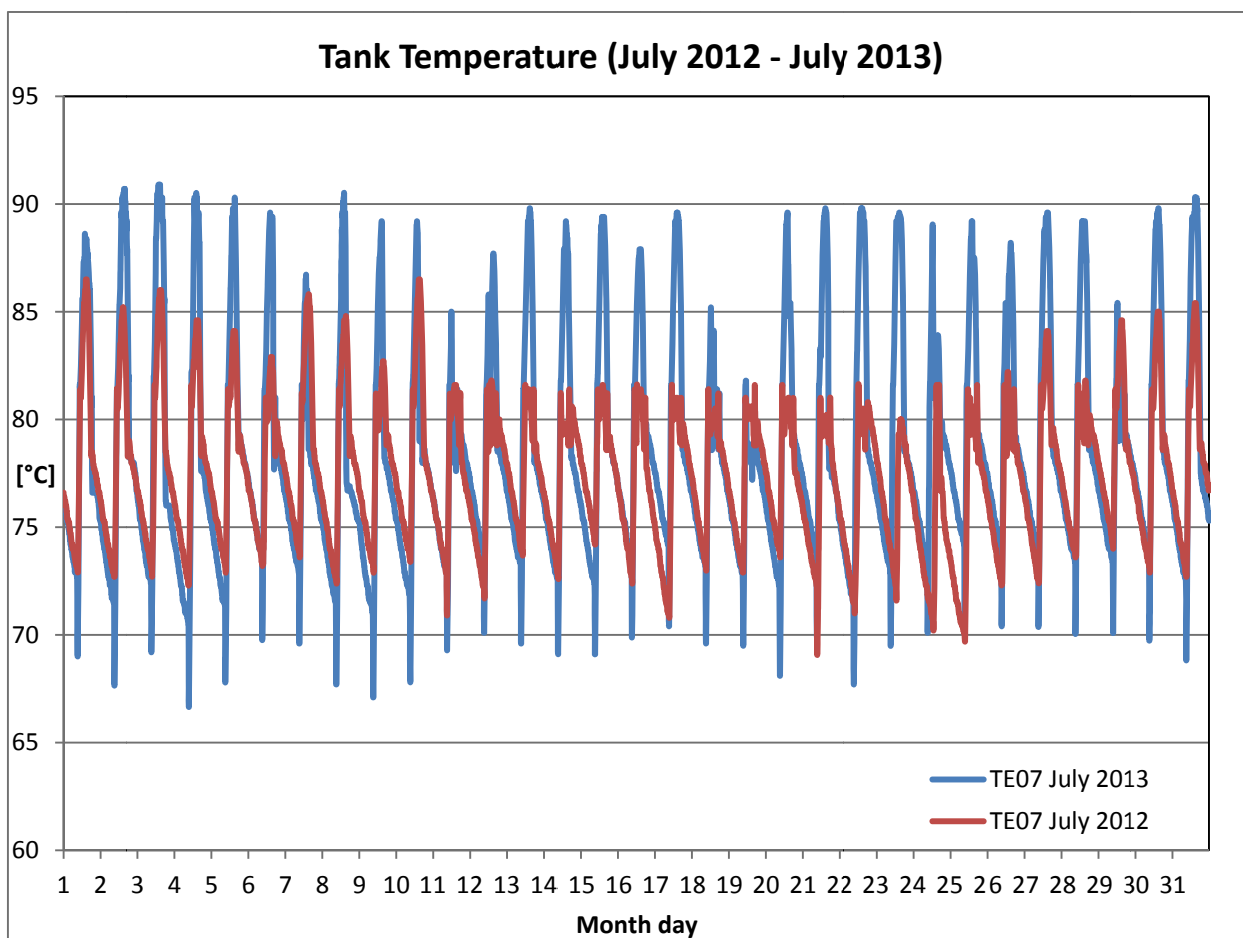


Figura 126. Confronto temperatura accumulo nei mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013

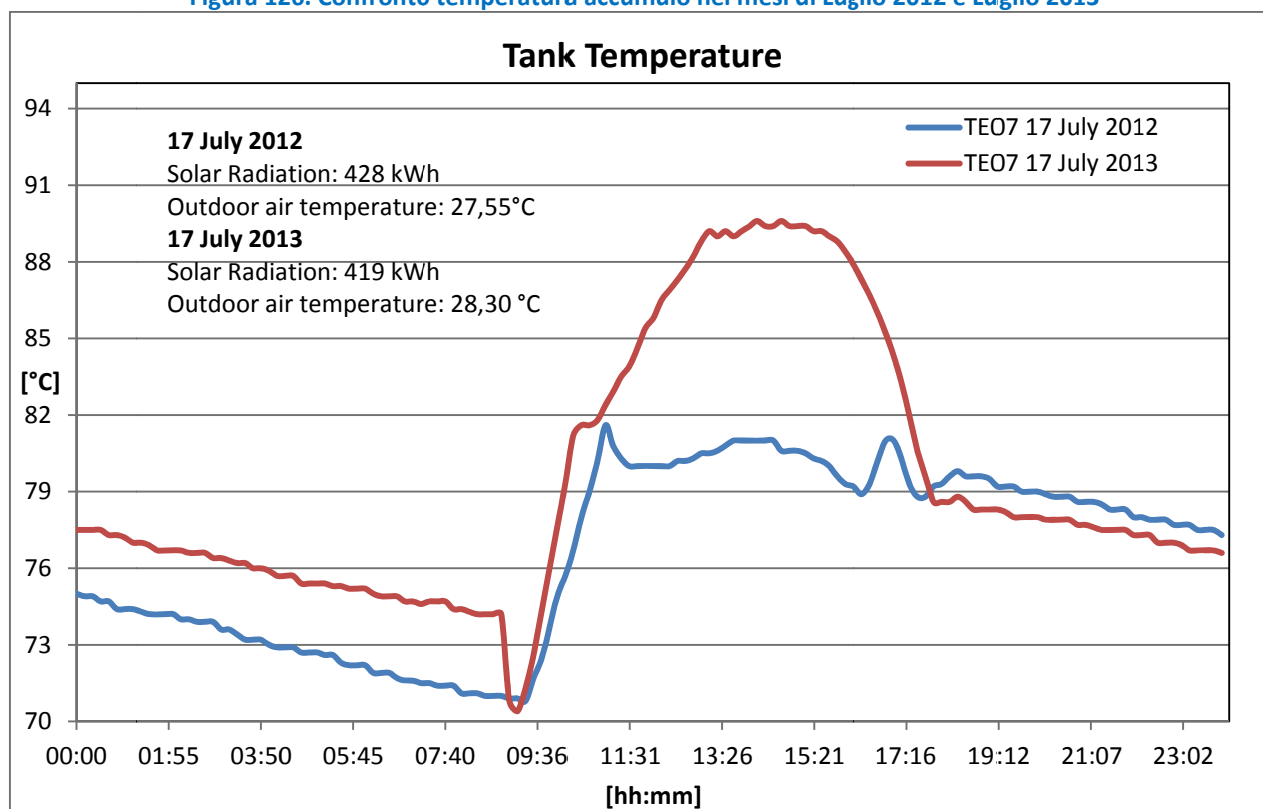


Figura 127. Confronto temperatura accumulo nei giorni 17 Luglio 2012 e 17 Luglio 2013

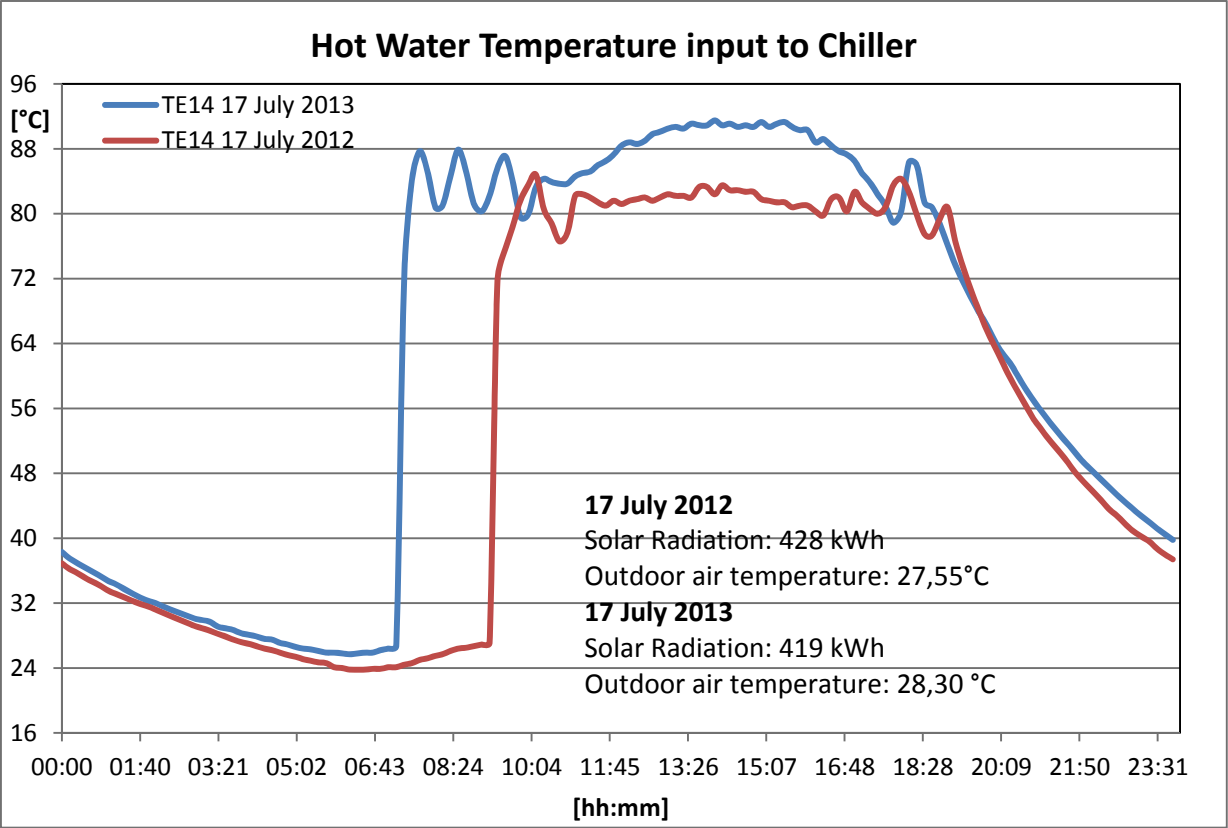


Figura 128. Confronto temperatura dell’acqua in ingresso al gruppo frigo nei giorni 17 Luglio 2012 e 17 Luglio 2013

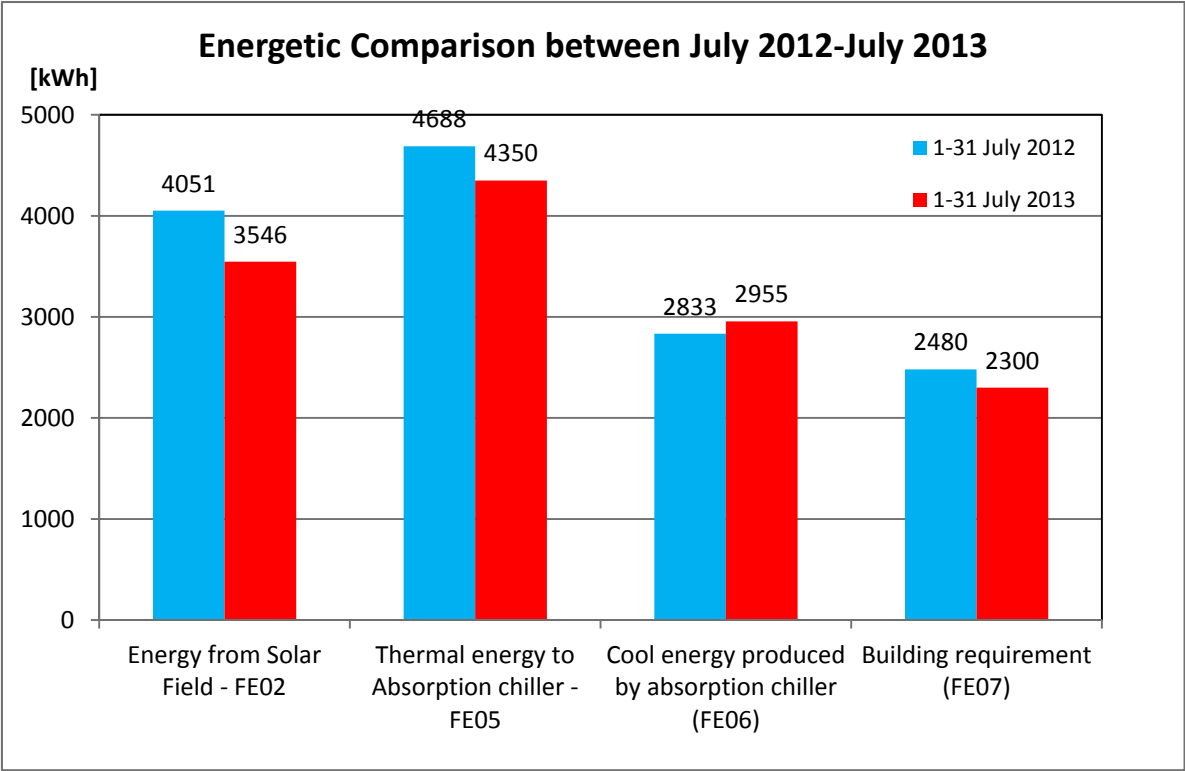


Figura 129. Confronto conta termie nei mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013

Anche nel confronto tra i mesi di luglio 2012 e di luglio 2013 le prestazioni del gruppo frigo ad assorbimento sono migliori nel caso di luglio 2013 ($COP = 0,679$ contro $COP = 0,604$ a luglio 2012), questo perché nel 2013 il gruppo frigo ad assorbimento è stato caratterizzato da un funzionamento più continuo e prossimo alle condizioni nominali (Figura 129). Il confronto in termini di frazione solare tra i due mesi è riportato in Figura 130.

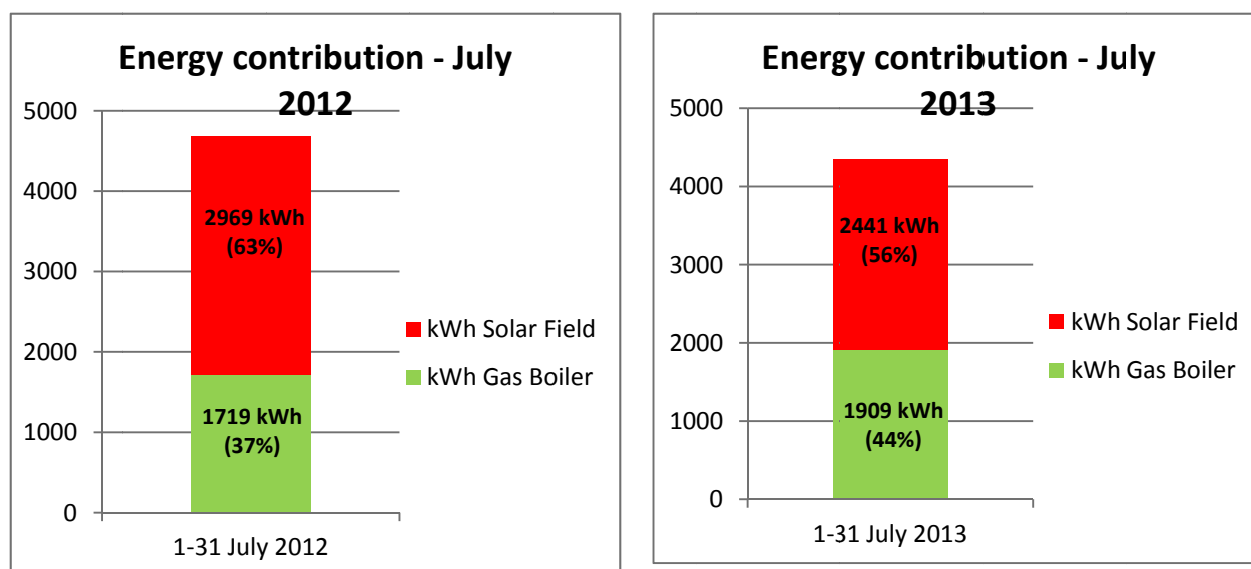


Figura 130. Confronto Frazione solare nei mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013

Di seguito viene riassunto il confronto tra i mesi di luglio 2012 e di luglio 2013 (Tabella 27).

Tabella 27. Riepilogo confronto conta termie nei mesi di Luglio 2012 e Luglio 2013

	1-31 JULY 2012	1-31 JULY 2013	
SOLAR RADIATION ON SOLAR COLLECTORS	12359	11788	[kWh]
MEDIUM OUTDOOR AIR TEMPERATURE	26,9	26,6	[°C]
THERMAL ENERGY TO ABSORPTION CHILLER (FE05)	4688	4350	[kWh]
ENERGY FROM INTEGRATION GAS BOILER (FE03)	1719	1909	[kWh]
ENERGY FROM SOLAR FIELD	2969	2441	[kWh]
SOLAR FRACTION	63	56	%

3.3.3 Confronto mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013

Il mese di agosto 2013 è stato caratterizzato da un valore medio mensile della temperatura dell'aria esterna (27°C) inferiore del corrispondente valore del mese di agosto 2012 (Figura 131). Il profilo di funzionamento dell'impianto è di tipo discontinuo cioè dalle ore 9 alle ore 19 ad agosto 2012 mentre discontinuo dalle ore 7 alle ore 18 ad agosto 2013.

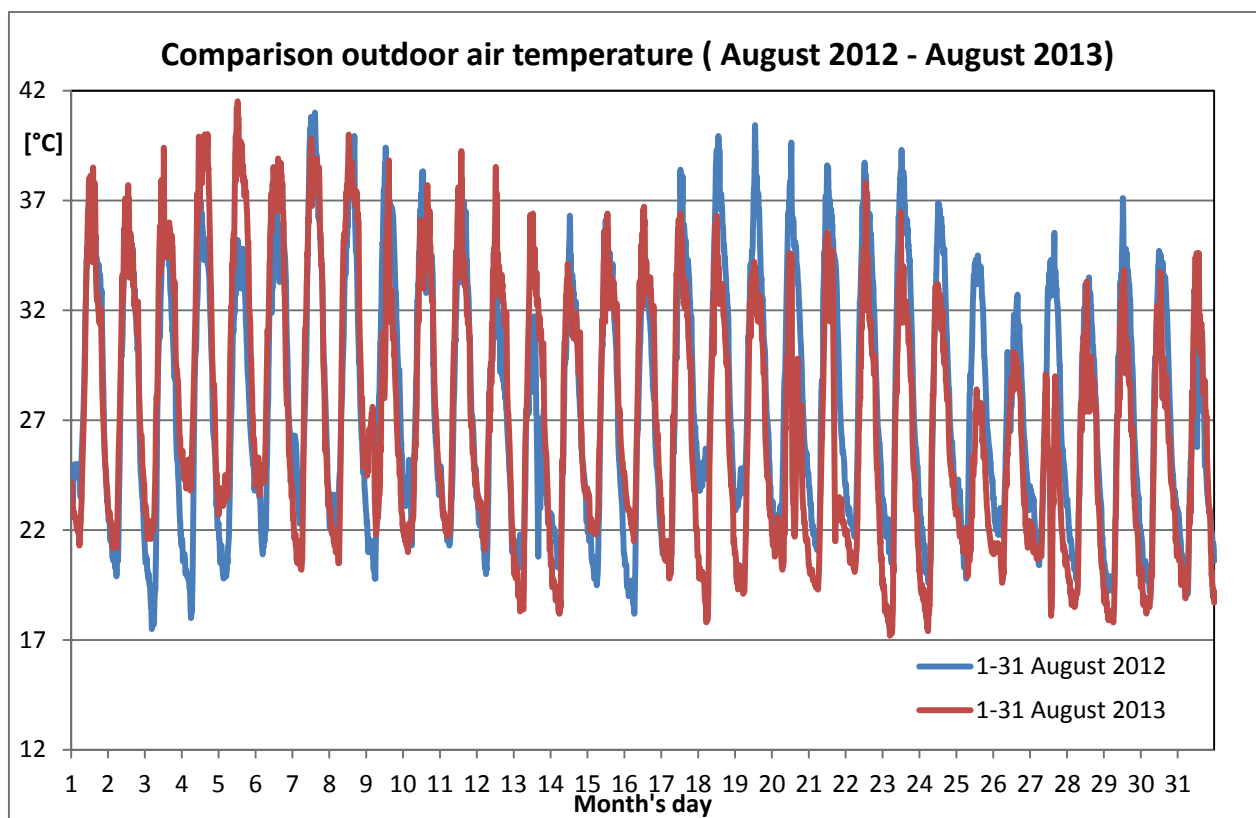


Figura 131. Confronto temperatura aria esterna nei mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013

Le temperature degli ambienti interni nel mese di agosto 2013 sono caratterizzate da valori più elevati rispetto a quelli raggiunti dalle stesse temperature nel corso del mese di agosto 2013. Inoltre la temperatura TA04 relativa all'aula del piano primo presenta negli ultimi dieci giorni di agosto 2013 un andamento crescente a causa dello spegnimento in locale dell'impianto (Figura 132); ciò non si è verificato per la temperatura dell'aula 1 del piano terra. L'andamento delle temperature ambienti TA04 e TA02 ad agosto 2012 è causato da un fermo impianto per manutenzione nei giorni 21, 22, 23 e 26 agosto 2013.

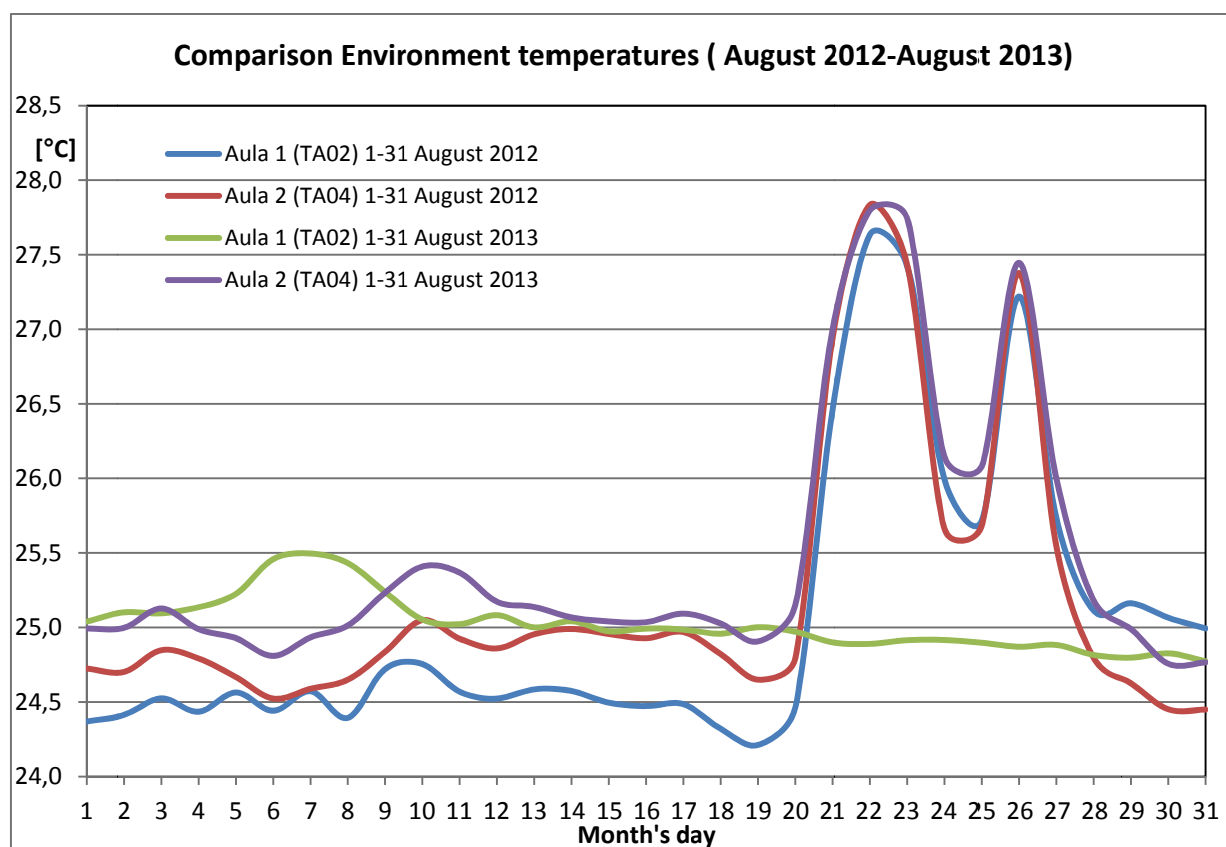


Figura 132. Confronto temperature ambienti interni nei mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013

Così come la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare totale assume un valore di poco differente tra i due mesi (Figura 133). A causa di un diverso profilo di funzionamento ad agosto 2013 l'impianto è azionato alle ore 7 anziché alle ore 9 (agosto 2012). Ciò causa il raggiungimento di temperature elevate per l'accumulo termico prima delle ore più calde della giornata causando quindi una dissipazione energetica maggiore da parte del dry cooler rispetto al mese di agosto 2012. Di conseguenza il fabbisogno energetico dell'edificio, l'energia frigorifera prodotta dal gruppo frigo ad assorbimento e l'energia termica da esso richiesta sono maggiori nel mese di agosto 2013 mentre risulta essere minore l'energia termica stoccata nel serbatoio d'accumulo avendo appunto dissipato di più (Figura 134).

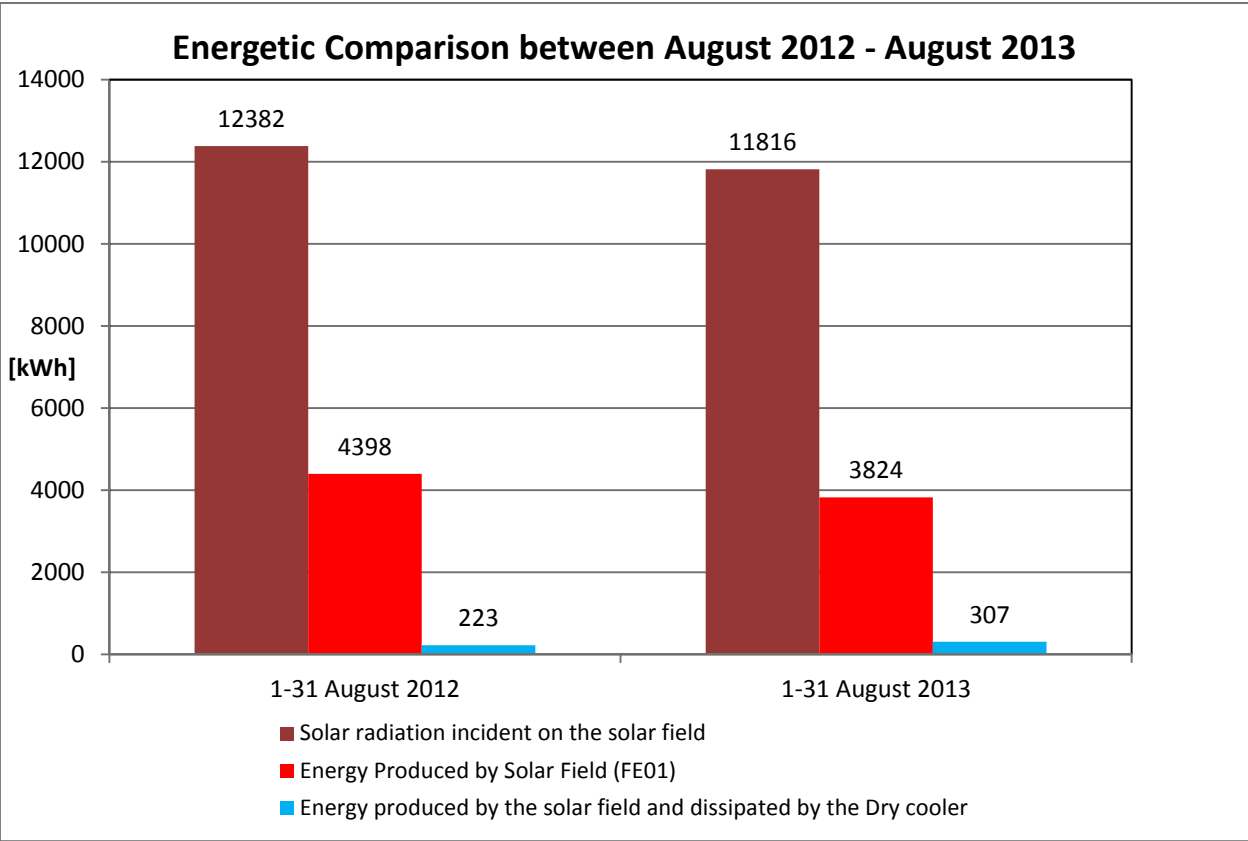


Figura 133. Confronto energetico nei mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013

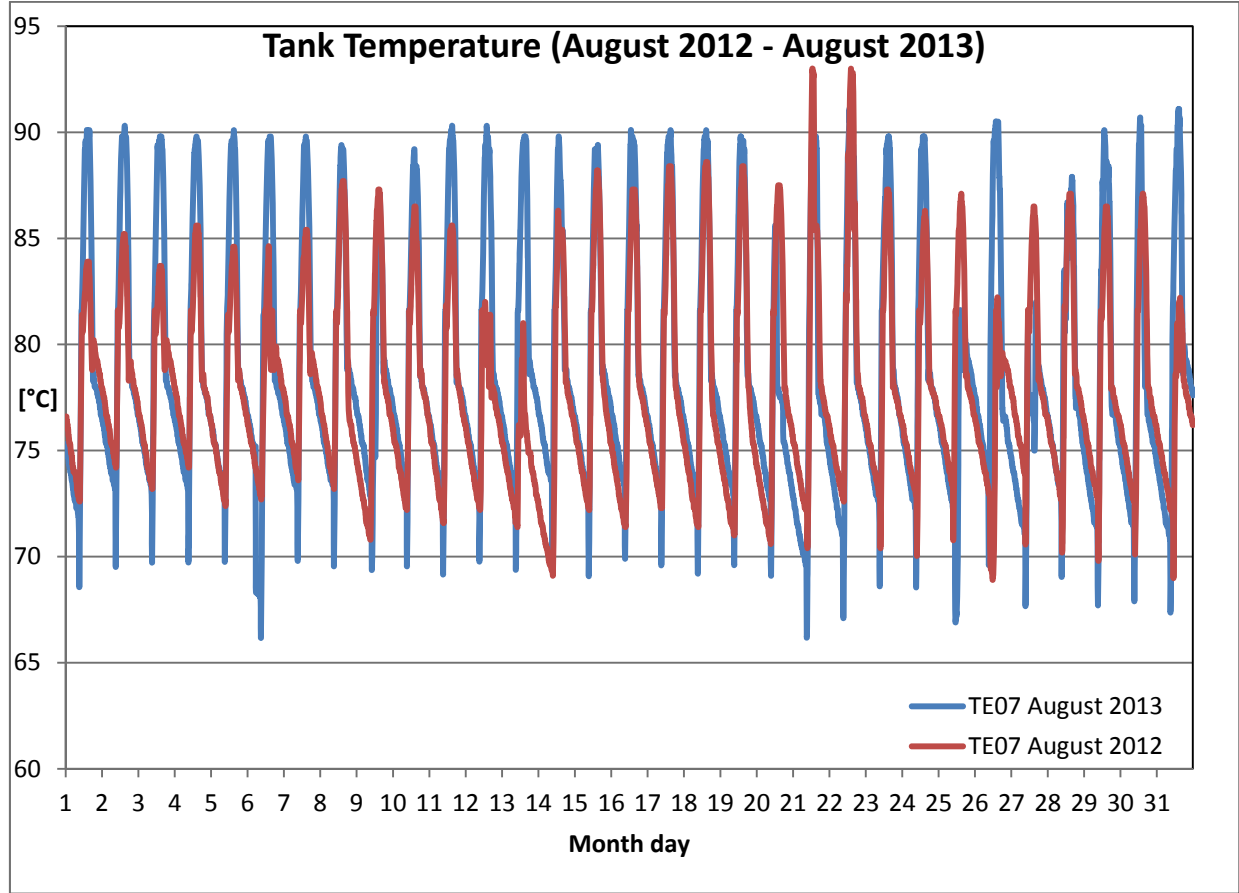


Figura 134. Confronto temperatura accumulo nei mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013

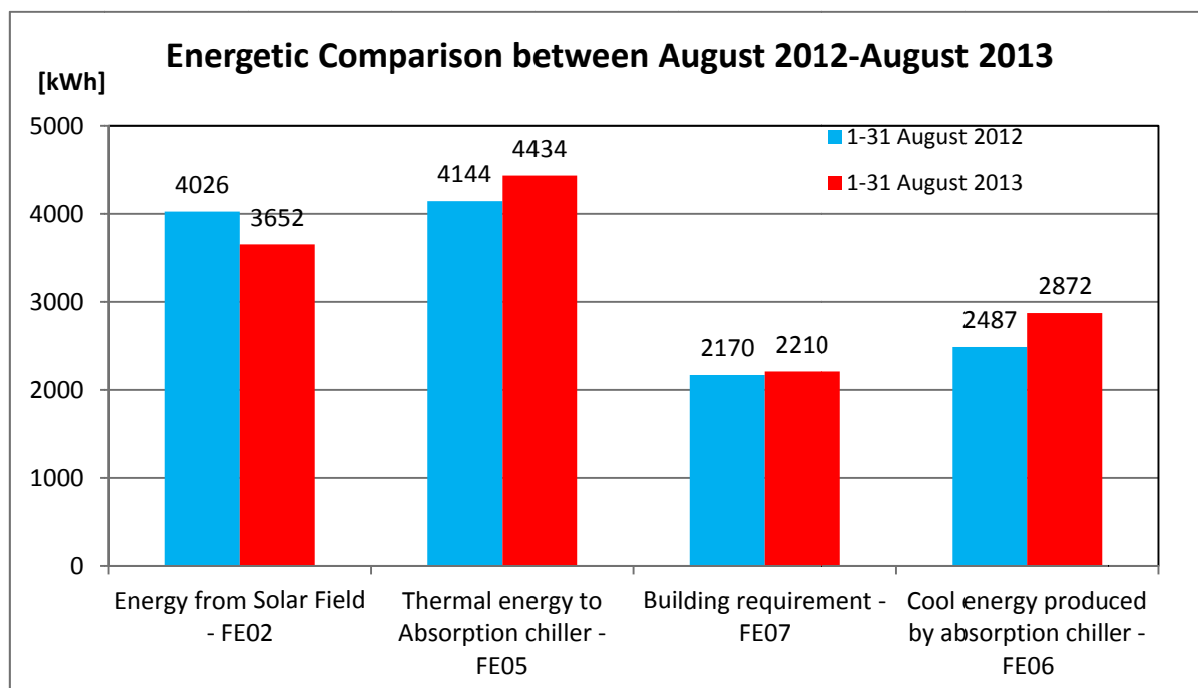


Figura 135. Confronto contatermie nei mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013

Anche nel confronto tra i mesi di agosto 2012 e di agosto 2013 le prestazioni del gruppo frigo ad assorbimento sono migliori nel caso di agosto 2013 ($COP = 0,648$ contro $COP = 0,600$ a agosto 2012), questo perché nel 2013 il gruppo frigo ad assorbimento è stato caratterizzato da un funzionamento più continuo e prossimo alle condizioni nominali.

Di seguito vengono riportati i confronti relativi alla frazione solare nei due mesi (Figura 136) ed il riepilogo del confronto effettuato (Tabella 28).

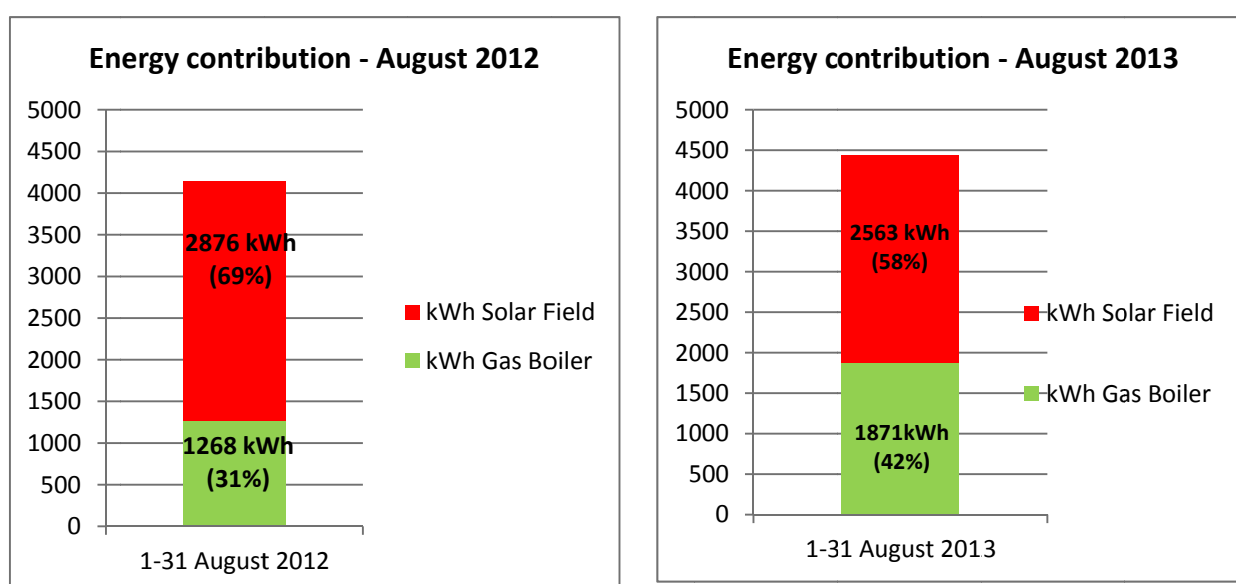


Figura 136. Confronto frazione solare nei mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013

Tabella 28. Riepilogo confronto nei mesi di Agosto 2012 e Agosto 2013

	1-31 AUGUST 2012	1-31 AUGUST 2013	
SOLAR RADIATION ON SOLAR COLLECTORS	12382	11816	[kWh]
MEDIUM OUTDOOR AIR TEMPERATURE	27,8	27,0	[°C]
THERMAL ENERGY TO ABSORPTION CHILLER (FE05)	4144	4434	[kWh]
ENERGY FROM INTEGRATION GAS BOILER (FE03)	1268	1871	[kWh]
ENERGY FROM SOLAR FIELD	2876	2563	[kWh]
SOLAR FRACTION	69	58	%

Di seguito (Figura 137) viene riportato il confronto tra i risultati globali del monitoraggio estivo 2012 (1 giugno-31 agosto 2012) e del monitoraggio estivo 2013 (1 giugno- 31 agosto 2013). Globalmente si ha una radiazione solare totale incidente sui collettori solari simili tra i due anni, in particolare la radiazione solare nel periodo estivo 2013 è inferiore rispetto al 2012 (Figura 137). Nonostante ciò a causa di un diverso profilo di funzionamento dell'impianto di solar heating and cooling ed a causa di un grado di occupazione decisamente maggiore nel 2013, l'energia termica dissipata dal dry cooler è maggiore nel periodo di monitoraggio estivo 2013. Le prestazioni del gruppo frigo ad assorbimento sono migliori nell'estate 2013 infatti a parità di energia termica in input al gruppo l'energia frigorifera da esso prodotta è maggiore nel 2013. Il monitoraggio 2013 è stato caratterizzato da un funzionamento del gruppo frigo più continuo (Figura 138).

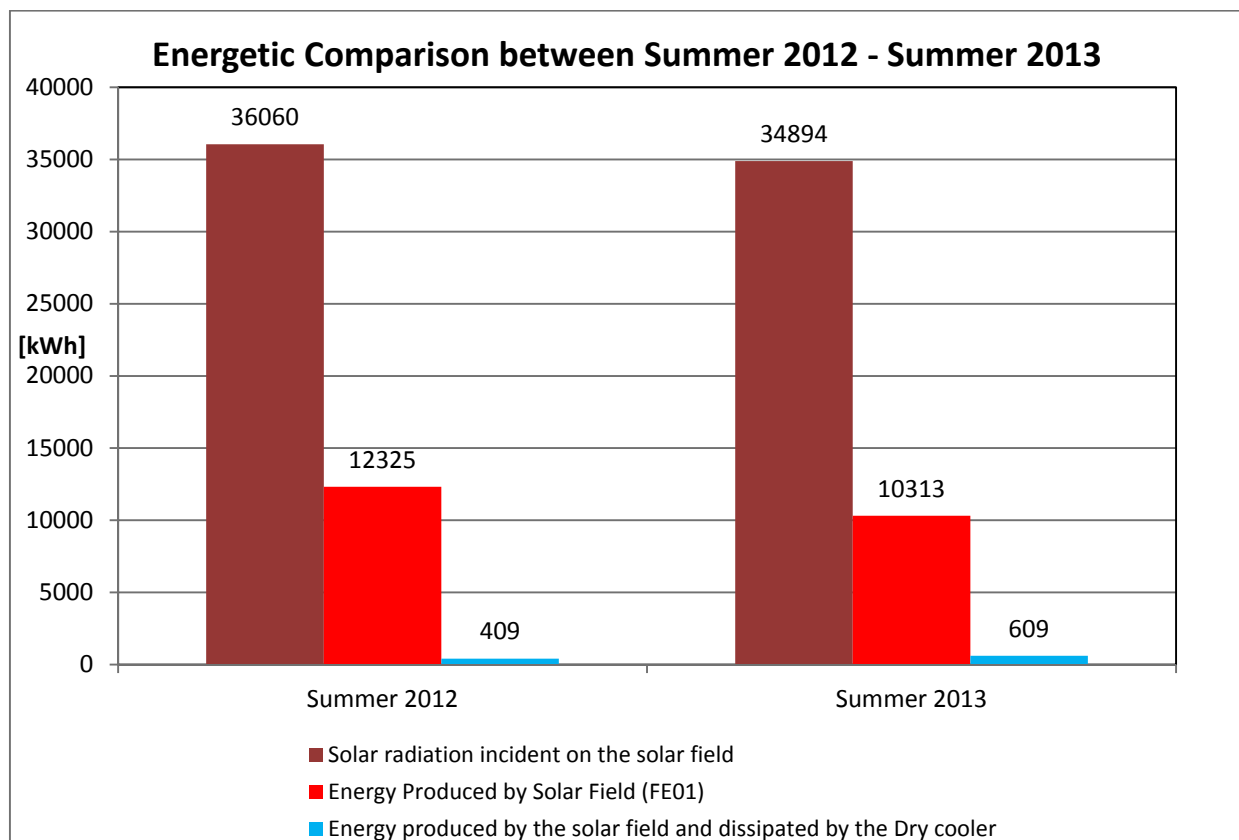


Figura 137. Riepilogo confronto energetico tra il monitoraggio estivo 2012 ed estivo 2013

Anticipare di due ore l'accensione dell'impianto rispetto al 2012 ha determinato il raggiungimento più veloce di elevate temperature dell'acqua contenuta all'interno dell'accumulo a cambiamento di fase. È proprio questo ultimo aspetto che giustifica la maggiore aliquota di energia termica dissipata dal dry cooler nel periodo estivo 2013 e quindi una minore frazione solare rispetto all'estate dell'anno precedente (Figura 139). Nell'estate del 2013 si ha una maggiore energia dissipata dal dry cooler, una minore quantità di energia accumulata nel serbatoio ed una quantità di energia termica in input al gruppo frigo inferiore rispetto al 2012 ma un'energia frigorifera pressoché simile nei due casi essendo il gruppo frigo più efficiente nel 2013.

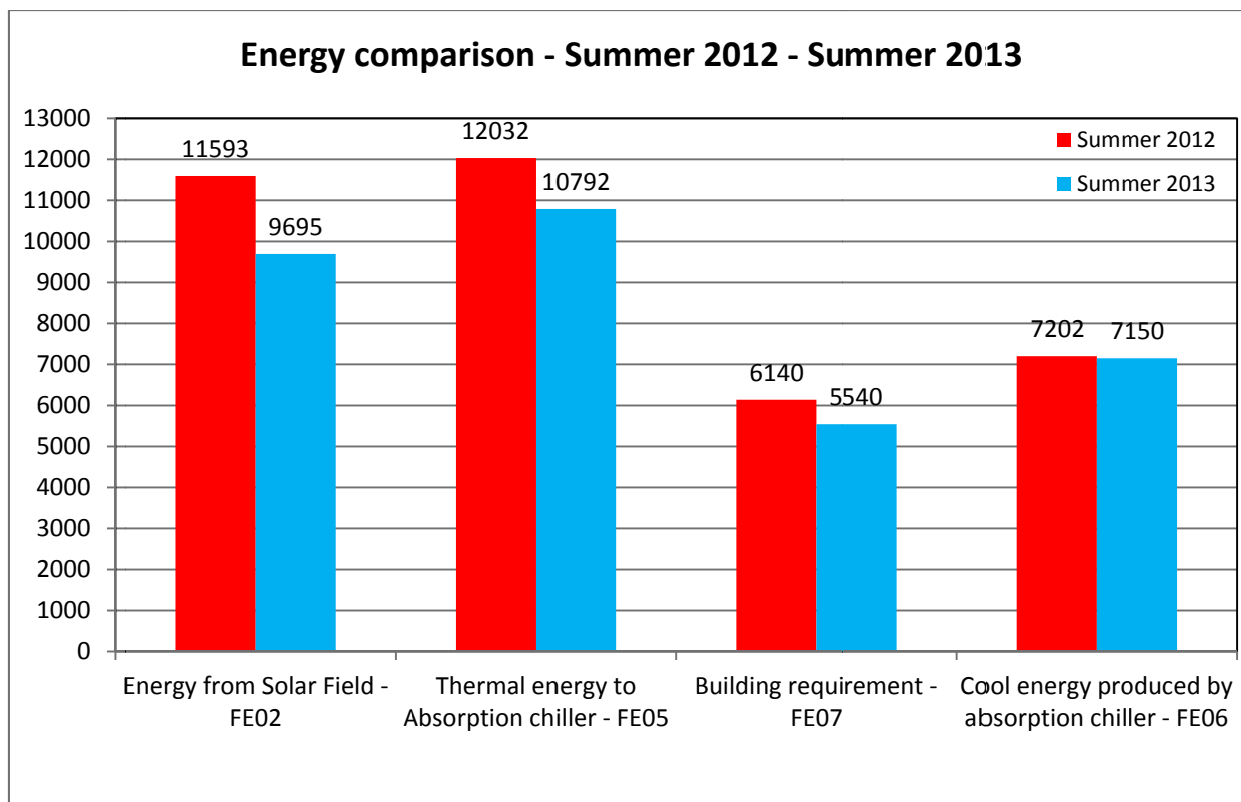


Figura 138. Riepilogo confronto contatermie tra il monitoraggio estivo 2012 ed estivo 2013

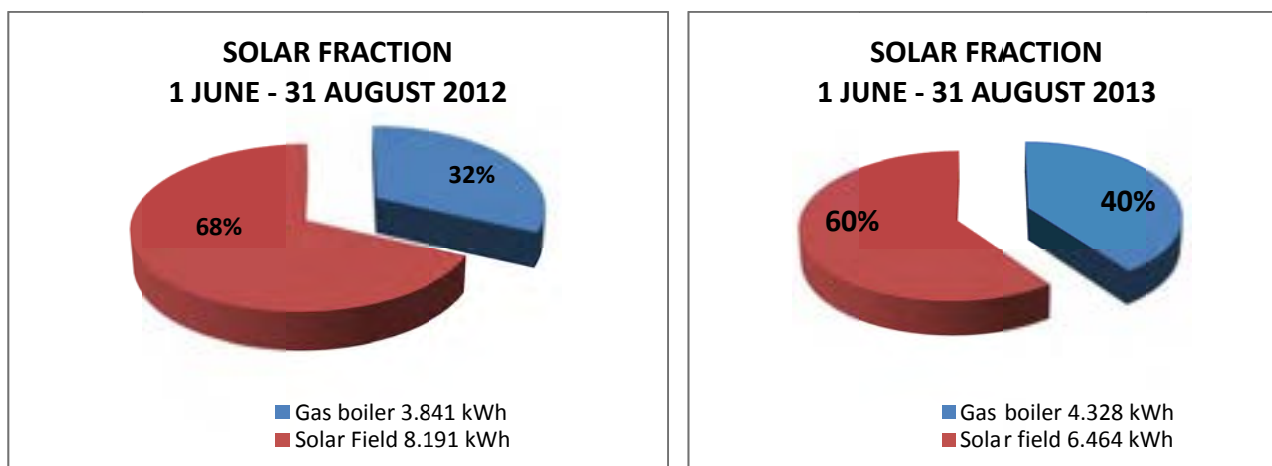


Figura 139. Riepilogo confronto frazione solare tra il monitoraggio estivo 2012 ed estivo 2013

4 Conclusioni

L'impianto di solar heating e cooling qui descritto ha sempre permesso durante il periodo di monitoraggio, sia invernale che estivo, il mantenimento delle condizioni di comfort termo igrometrico all'interno degli ambienti dell'edificio servito, dove le temperature interne sono state mantenute all'interno dei range stabiliti grazie alla logica di regolazione. Il mantenimento di tali temperature ambienti è stato ottenuto anche durante l'inverno 2013 e l'estate 2013 nonostante il grado di occupazione dell'edificio sia stato intenso. È stato riscontrato un risparmio, rispetto a sistemi di tipo tradizionale, in termini di consumi di energia primaria di natura fossile, quindi riduzione delle emissioni di CO₂, grazie allo sfruttamento della radiazione solare: durante il funzionamento invernale anno 2012 il sole ha coperto il 51% dei consumi per il riscaldamento degli ambienti mentre nell'inverno 2013 la frazione solare è stata del 52%; nel funzionamento estivo anno 2012 c'è stata una copertura da fonte solare del 68% dell'energia termica richiesta dal gruppo frigo ad assorbimento mentre nel 2013 il campo solare ha fornito il 60% dell'energia termica richiesta dal gruppo.

Il monitoraggio invernale 2013 è stato caratterizzato da una minore quantità di energia termica dissipata dal dry cooler rispetto all'inverno 2012: il serbatoio di accumulo a cambiamento di fase da 1.000 litri ha permesso di immagazzinare maggiore energia termica rispetto all'accumulo di tipo standard avente capacità pari a 1500 litri. Si è inoltre riscontrato un maggiore fabbisogno energetico per il riscaldamento dell'edificio essendo i setpoint delle temperature ambiente più elevati rispetto all'inverno 2012: nonostante la richiesta superiore di energia, l'installazione dell'accumulo PCM ha comunque garantito l'ottenimento di una frazione solare pari al 52% (superiore a quella ottenuta nell'anno 2012 di un punto percentuale). E' doveroso comunque evidenziare che il periodo di monitoraggio invernale anno 2013 è stato caratterizzato da valori della temperatura dell'aria esterna mediamente più alti, anche se la radiazione solare è risultata essere inferiore a quella misurata nell'anno 2012.

Il monitoraggio estivo anno 2013 ha dimostrato che il serbatoio d'accumulo a cambiamento di fase, ed il relativo materiale PCM utilizzato nella sperimentazione (sali idrati), peggiora le prestazioni dell'impianto in funzionamento estivo. Nel funzionamento estivo la temperatura dell'accumulo è risultata sempre superiore alla temperatura di fusione del materiale PCM (pari a 46°C) contenuto nell'accumulo, non rendendo possibile lo sfruttamento del calore latente di solidificazione. Poiché la capacità volumetrica dell'accumulo PCM (1000 litri) è inferiore rispetto a quella del serbatoio tradizionale (1500 litri) installato a servizio dell'impianto monitorato durante l'anno 2012, la capacità di accumulo di energia termica è risultata essere inferiore rispetto al monitoraggio estivo 2012. Nonostante il setpoint delle temperature ambiente ($set_{2013}=24^{\circ}\text{C}$) è risultato essere inferiori rispetto a quello dell'estate 2012 ($set_{2012}=26^{\circ}\text{C}$), la richiesta di energia frigorifera da parte dell'edificio (FE07) è risultata essere inferiore poiché l'estate 2013 è stata caratterizzata da valori di temperatura dell'aria esterna inferiori rispetto all'estate 2012.

Durante l'estate 2013 l'edificio F-92 è stato infatti costantemente occupato quale sede di incontri tecnici e di formazione professionale: essendo previsto l'inizio delle lezioni in aula alle ore 8:30 del mattino, è stato necessario avviare l'impianto di climatizzazione alle ore 7:00. Questa scelta ha causato il ricorso ad un numero maggiore di ore (rispetto all'anno 2012) di utilizzo della caldaia integrativa a gas metano durante le prime ore del mattino, quando l'energia gratuita fornita dal sole non era sufficiente per produrre acqua alla temperatura di circa 85°C (temperatura necessaria per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento azionato termicamente). Si è infatti riscontrato che l'edificio richiedeva nella prime ore più del 50% dell'energia frigorifera giornaliera (FE07 hourly): questo giustifica una frazione solare nell'estate 2013 inferiore rispetto a quella dell'estate 2012.

Le prestazioni del gruppo frigo ad assorbimento sono migliori nel 2013 in quanto il gruppo funziona per quasi tutto il periodo di marcia in prossimità delle condizioni nominali: l'affinamento della logica di regolazione ha permesso di garantire una temperatura dell'acqua di alimentazione sempre prossima agli 88°C richiesti dal costruttore, sia in funzionamento con campo solare che con caldaia integrativa.

5 Riferimenti bibliografici

- Lazzarin R., 2011, "Pompe di calore", Editore: SGEEditoriali;
- Lazzarin R., Busato F., Noro M., 2011, "Studio di sistemi di accumulo a cambiamento di fase nel solar cooling", www.enea.it;
- He B, Setterwall F, 2002, "Technical grade paraffin waxes as phase change materials for cool thermal storage system capital cost estimation", *Energy Conversion and Management* 43 (13), pp. 1709-1723, www.sciencedirect.com ;
- A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, 2007, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2), pp. 318-345, www.sciencedirect.com ;
- Villarini M., Germanò D., Fontana F., Limiti M., 2010, "Sistemi solari termici per la climatizzazione", Editore: Maggioli Editore;
- Calabrese N., Trinchieri R., Simonetti A., 2011, "Utilizzo dell'energia elettrica e solare per condizionamento estivo", www.enea.it;
- Grieco M.T., Sabatelli V., Braccio G., 2008, "Climatizzazione solare degli edifici: valutazione delle potenzialità di sviluppo, confronto tra le diverse tecnologie e relativa fattibilità tecnico-economica", EEI 08044, www.enea.it

ALLEGATO A

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno
dell'Accordo di collaborazione

*“Integrazione nell'impianto di solar heating and cooling realizzato a
servizio dell'edificio F92 di un accumulo termico del tipo a
cambiamento di fase”*

tra ENEA e UNIVERSITA' DI PADOVA

Responsabile scientifico ENEA: Ing. N. Calabrese

Responsabile scientifico UNIPADOVA: Prof. R. Lazzarin



Ricerca di Sistema elettrico

Integrazione nell'impianto di solar heating and cooling realizzato a servizio dell'edificio F92 di un accumulo termico del tipo a cambiamento di fase

R.Lazzarin, M. Noro, L. Zamboni

INTEGRAZIONE NELL'IMPIANTO DI SOLAR HEATING AND COOLING REALIZZATO A SERVIZIO DELL'EDIFICIO F92 DI UN ACCUMULO TERMICO DEL TIPO A CAMBIAMENTO DI FASE

R. Lazzarin, M. Noro (UNIVERSITÀ DI PADOVA), L. Zamboni (Libero professionista)

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 e qualificazione di componenti e sistemi

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Integrazione nell'impianto di solar heating and cooling realizzato a servizio dell'edificio F92 di un accumulo termico del tipo a cambiamento di fase"* tra ENEA e UNIVERSITA' DI PADOVA

Responsabile scientifico ENEA: Ing. N. Calabrese

Responsabile scientifico UNIPADOVA: Prof. R. Lazzarin

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 CAMPAGNA DATI 13 MARZO – 15 APRILE 2013	5
3 ACCUMULO CALDO: CONFRONTO 2012-2013.....	13
4 PROCESSO DI CARICA/SCARICA ACCUMULO PCM	31
5 SIMULAZIONE TRNSYS DELL'ACCUMULO STD E DELL'ACCUMULO PCM: TYPE 60 VS TYPE 860.....	42
6 POMPA DI CALORE ARIA-ACQUA AD INTEGRAZIONE DEL SOLARE: VALUTAZIONE SUI DATI SPERIMENTALI NEL PERIODO 13 MARZO-15 APRILE 2013.....	48
7 CONCLUSIONI.....	50
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	50

Sommario

Il presente lavoro si inquadra nell'ambito della ricerca sui sistemi di climatizzazione estiva ed invernale con sistemi solar heating e solar cooling che utilizzano pannelli solari per il soddisfacimento dei fabbisogni dell'edificio F92 presso il CNR ENEA Casaccia. La configurazione dell'impianto considerata è solo quella in solar heating nel periodo dal 13 marzo-15 aprile: su tale periodo è stato possibile confrontare i dati sperimentali ottenuti nel 2012 con accumulo standard da 1500 l e nel 2013 con accumulo con materiale a cambiamento di fase (PCM) da 1000 l nominali. E' stato poi possibile, nel periodo dal 16 aprile al 5 maggio 2013, testare il comportamento dell'accumulo separando la fase di sola carica con energia solare dalla successiva fase di scarica (dopo 18:00) effettuata riscaldando l'edificio. L'elaborazione dei dati raccolti ha permesso di rappresentare tra l'altro anche l'andamento dei profili di temperatura all'interno dell'accumulo e i flussi di calore in ingresso dal campo solare e in uscita verso l'edificio. E' stato poi utilizzato un modello di simulazione in TRNSYS per poter meglio analizzare il comportamento di entrambe le soluzioni (standard/PCM) utilizzando alcuni dati di input sperimentali. Il contributo dei PCM, se pur dimostrato teoricamente mediante il modello di simulazione utilizzato, è risultato di difficile individuazione dal lato delle misure sul campo.

1 Introduzione

L'aleatorietà nella disponibilità di energia solare, l'alternanza di giorno e notte e la variabilità dei carichi di impianto hanno sempre suggerito di prevedere in tutti gli impianti di solar cooling almeno un accumulo. Di solito si è preferito l'accumulo dal lato freddo, per la maggiore facilità di interfacciarlo con il carico. In realtà è sempre risultato utile anche un accumulo caldo per garantire continuità di funzionamento alla macchina ad assorbimento. Questa è, soprattutto a causa dell'elevata capacità termica, particolarmente sensibile al funzionamento in ON-OFF. Inoltre una capacità di accumulo caldo consente di non dimensionare la macchina, elemento assai costoso dell'impianto, per le punte di disponibilità dell'energia solare, che possono essere adeguatamente smussate dall'accumulo.

Questi accumuli sono stati generalmente realizzati con acqua. Acqua calda da un lato e acqua fredda dall'altro, realizzando serbatoi di grande dimensione dal momento che solo un differenziale di temperatura poteva essere utilizzato: poco più di 10 °C dal lato caldo (a meno di non disporre di un serbatoio pressurizzato) e addirittura meno di 10 °C dal lato freddo (per poter consentire temperature idonee alla deumidificazione dell'aria per via chimica).

Per ridurre le dimensioni di questi accumuli (ed anche le dispersioni termiche che si realizzano) appare quindi opportuno ricorrere a sistemi diversi ed in particolare a sostanza che operano in cambiamento di fase (tipicamente da liquido a solido e viceversa) che proprio per l'elevato calore di cambiamento di fase possono garantire grandi capacità di accumulo anche a fronte di volumi limitati.

L'attività oggetto del presente accordo appare quindi come la naturale prosecuzione delle attività svolte nei precedenti, in cui si sono analizzate dal punto di vista teorico le prestazioni di impianti di solar cooling e heating al variare di numerosi parametri (estensione del campo solare, taglie degli accumuli, località climatiche) mediante simulazioni dinamiche ed in cui si è dimensionato e progettato il serbatoio con materiali a cambiamento di fase recentemente installato presso l'impianto a servizio dell'edificio F92.

Nel corso del 2013 sono stati acquisiti in questa nuova configurazione i dati sperimentali di funzionamento dell'impianto ed è stata effettuata una comparazione energetica tra i risultati sperimentali ottenuti con l'accumulo di tipo tradizionale (campagna sperimentale 2011/2012) e quelli con l'accumulo a cambiamento di fase. E' stato inoltre analizzato il comportamento dell'accumulo a cambiamento di fase (lato caldo) in assenza di carico termico lato edificio allo scopo di valutare l'andamento della temperatura durante il passaggio di fase dei sali (nell'intorno dei 44 °C) e la durata di questo fenomeno. La stessa verifica è stata effettuata durante la fase di scarico termico del serbatoio. L'analisi e il confronto dei dati sperimentali sono stati supportati dall'utilizzo di un modello di accumulo sviluppato in TRNSYS al fine di chiarire il funzionamento dei PCM e il loro contributo all'accumulo/rilascio di calore.

2 Campagna dati 13 marzo – 15 aprile 2013

Di seguito vengono presentati sinteticamente i risultati della campagna di acquisizione dati nel periodo dal 13 marzo al 15 aprile 2013. I grafici contengono i seguenti dati:

- ❑ Figura 1 – Andamento della temperatura esterna
- ❑ Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6 – Irraggiamento solare globale sull'orizzontale suddiviso per settimana
- ❑ Figura 7 - Energia solare su base giornaliera proveniente dal campo collettori a tubi evacuati e ceduta all'accumulo PCM
- ❑ Figura 8 - Fabbisogno giornaliero riscaldamento invernale edificio F-92
- ❑ Figura 9 - Fabbisogno giornaliero riscaldamento invernale edificio F-92
- ❑ Figura 10 - Energia termica giornaliera fornita dall'accumulo PCM a copertura del fabbisogno di riscaldamento invernale edificio F-92

- Tabella 1 - Energie termiche rilevate nel periodo 13 marzo – 15 aprile 2013: energia termica fornita all'accumulo dal campo collettori (FE02), energia termica fornita dall'accumulo PCM all'edificio F-92 (TANK_TO_LOAD), energia termica fornita dalla caldaia all'edificio F-92 (FE03) e fabbisogno edificio F-92 (FE07)

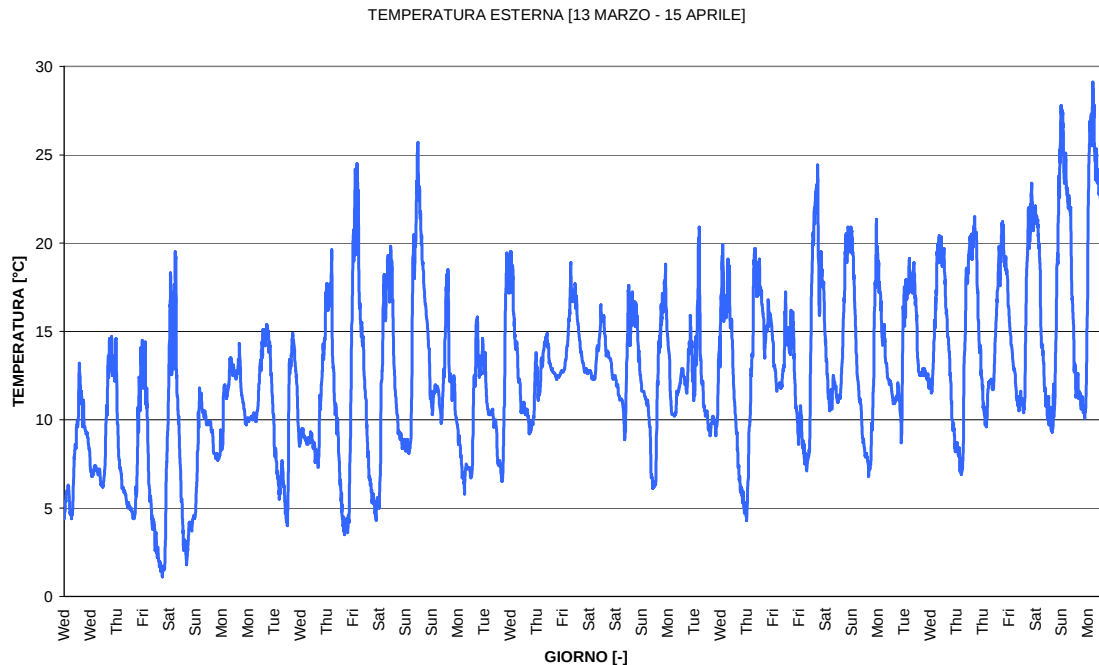


Figura 1 Andamento della temperatura esterna periodo 13 marzo - 15 aprile 2013

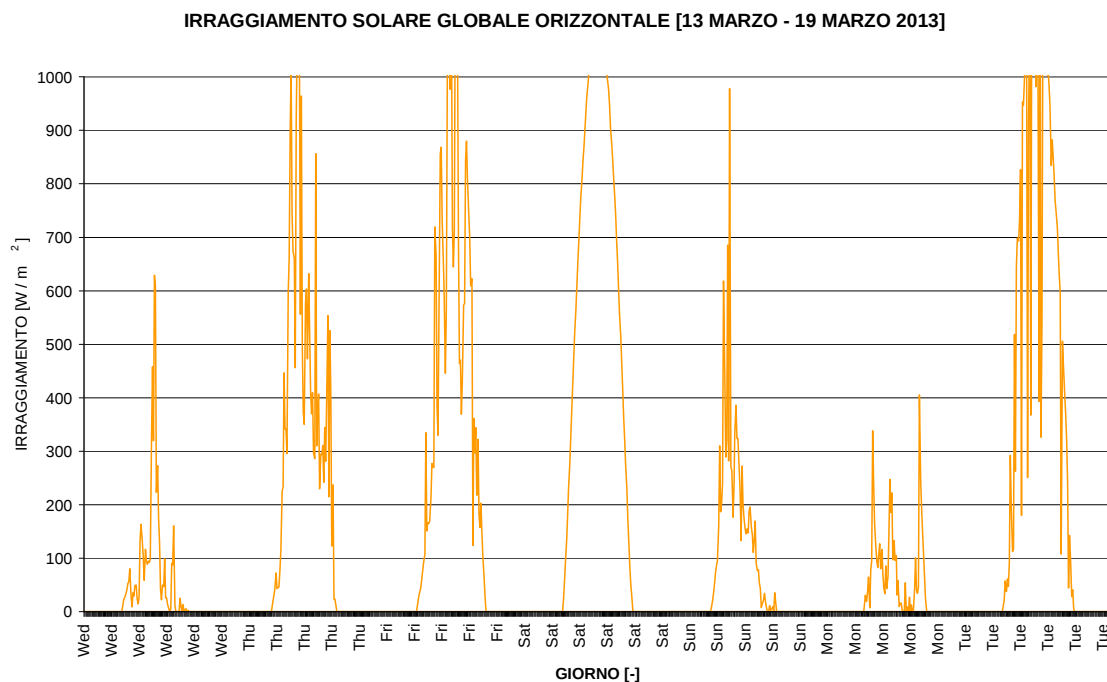


Figura 2 Irraggiamento solare globale orizzontale dal 13 al 19 marzo 2013

IRRAGGIAMENTO SOLARE GLOBALE ORIZZONTALE [20 MARZO - 26 MARZO 2013]

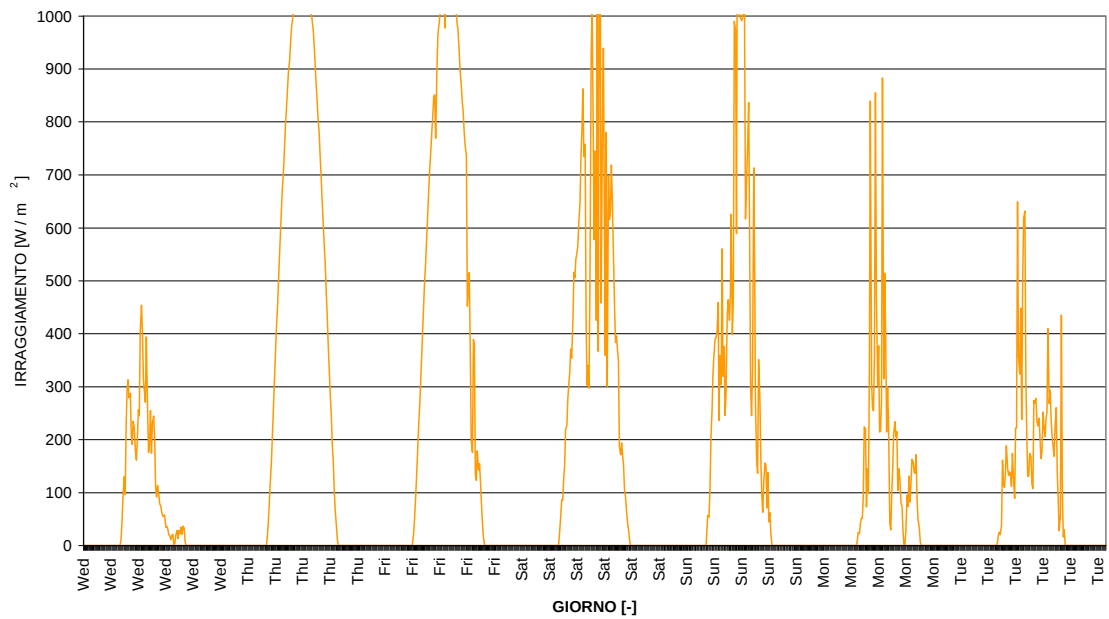


Figura 3 Irraggiamento solare globale orizzontale dal 20 al 26 marzo 2013

IRRAGGIAMENTO SOLARE GLOBALE ORIZZONTALE [27 MARZO - 2 APRILE 2013]

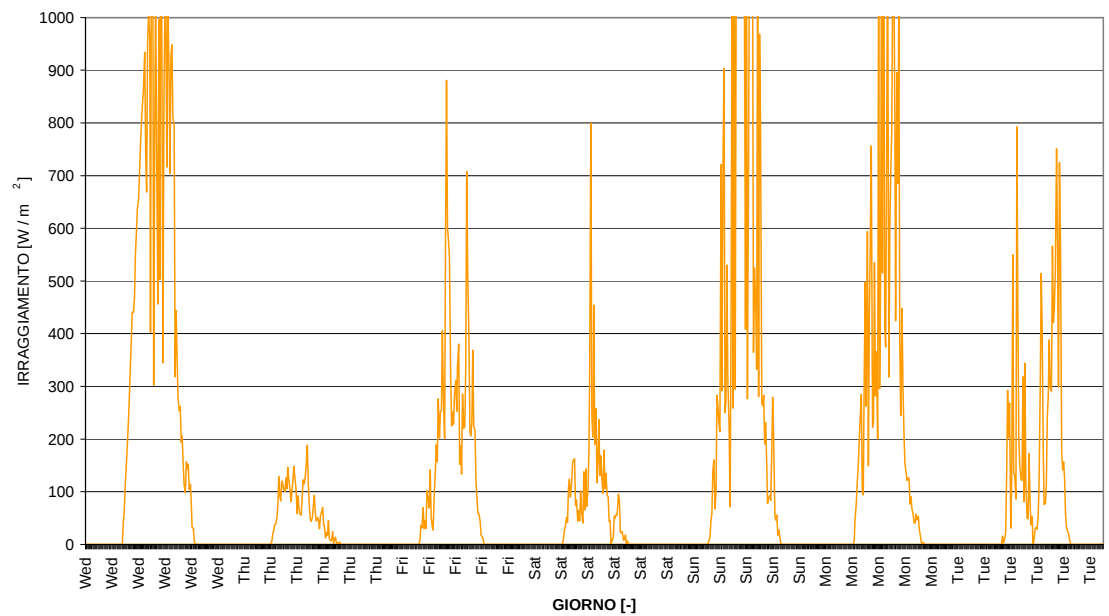


Figura 4 Irraggiamento solare globale orizzontale dal 27 marzo al 2 aprile 2013

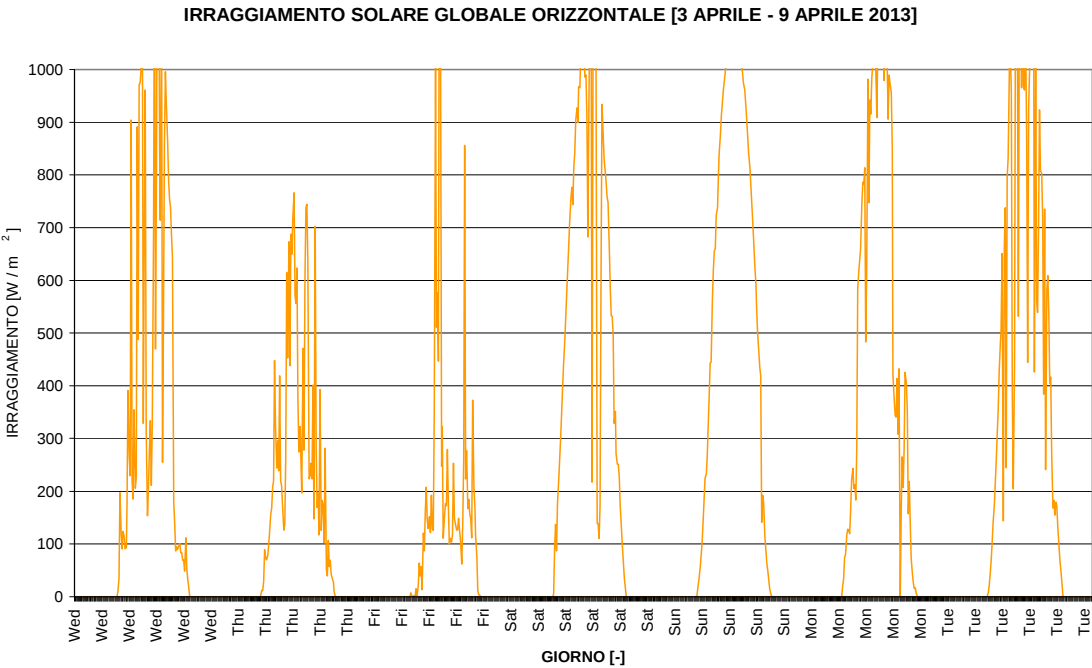


Figura 5 Irraggiamento solare globale orizzontale dal 3 al 9 aprile 2013

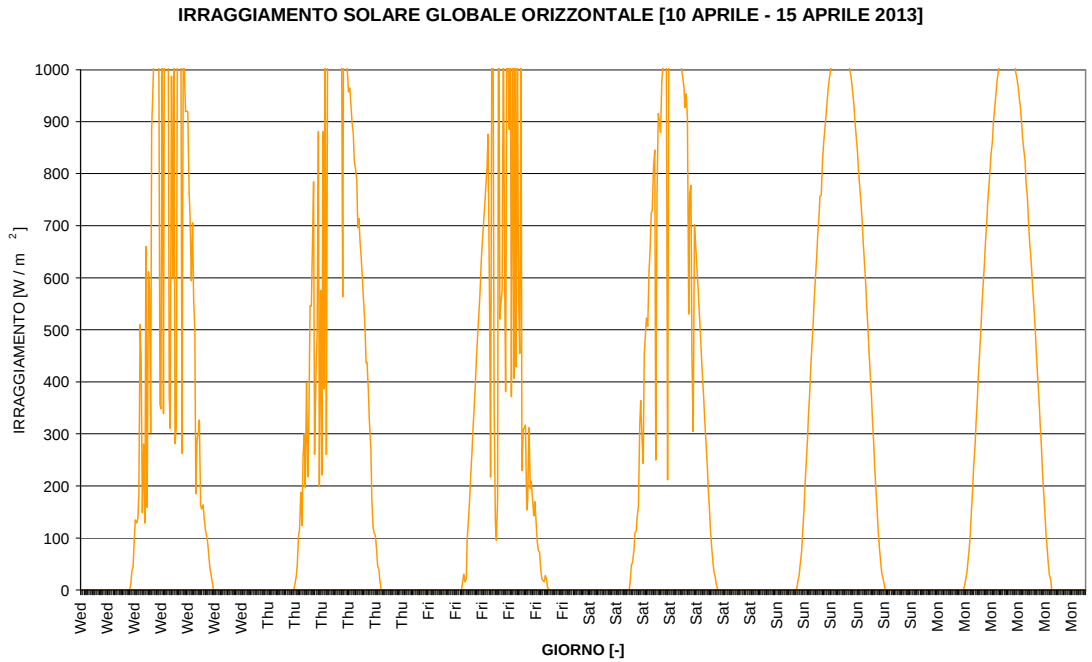


Figura 6 Irraggiamento solare globale orizzontale dal 10 al 15 aprile 2013

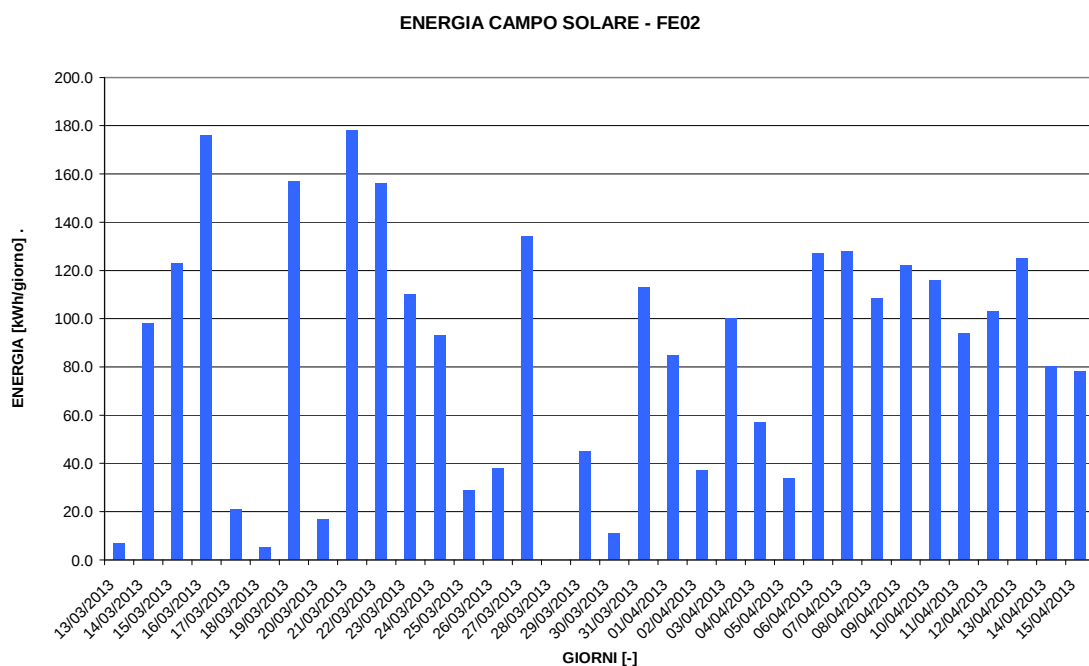


Figura 7 Energia solare su base giornaliera proveniente dal campo collettori a tubi evacuati e ceduta all'accumulo PCM periodo 13 marzo – 15 aprile 2013

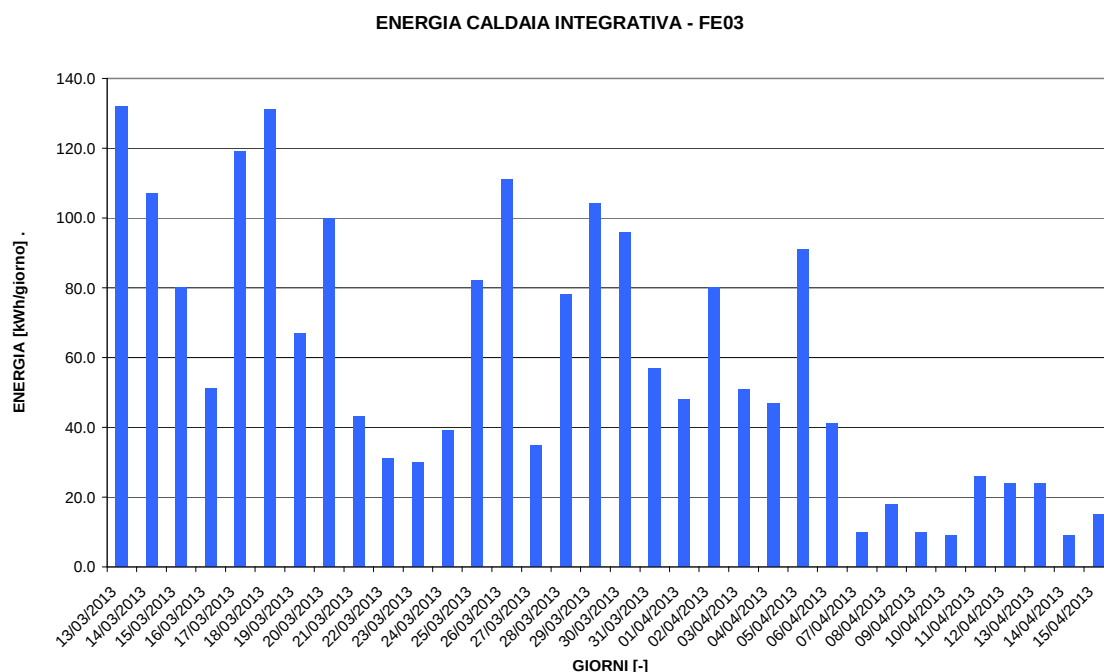


Figura 8 Energia fornita dalla caldaia su base giornaliera all'edificio F-92 a copertura del fabbisogno per riscaldamento (FE03) periodo 13 marzo – 15 aprile 2013

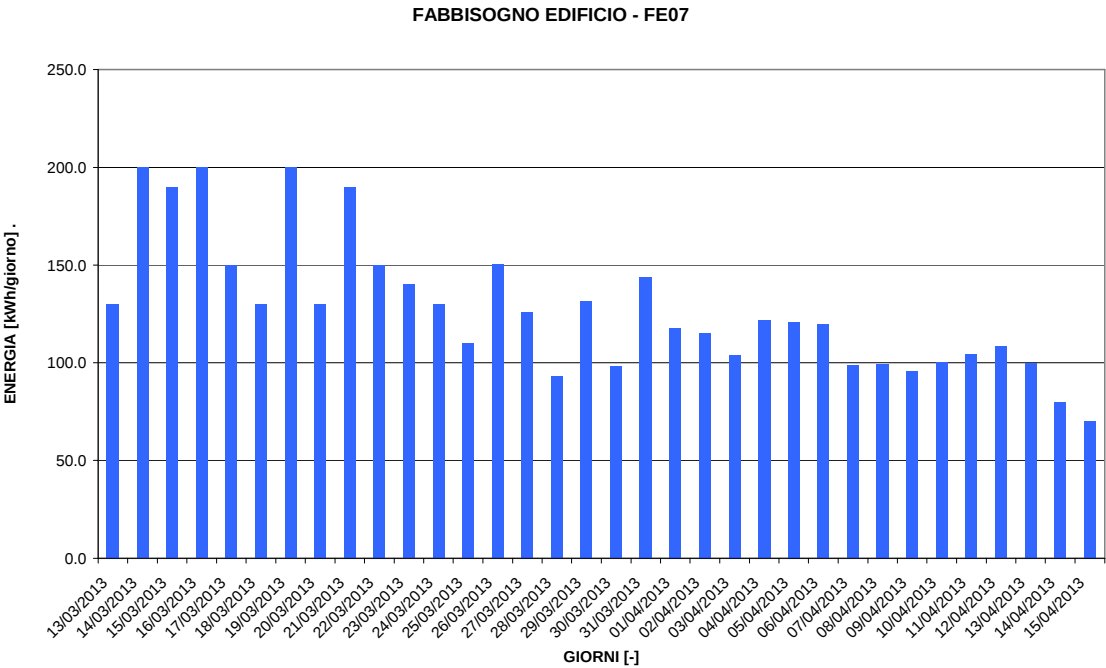


Figura 9 Fabbisogno giornaliero riscaldamento invernale edificio F-92 periodo 13 marzo – 15 aprile 2013

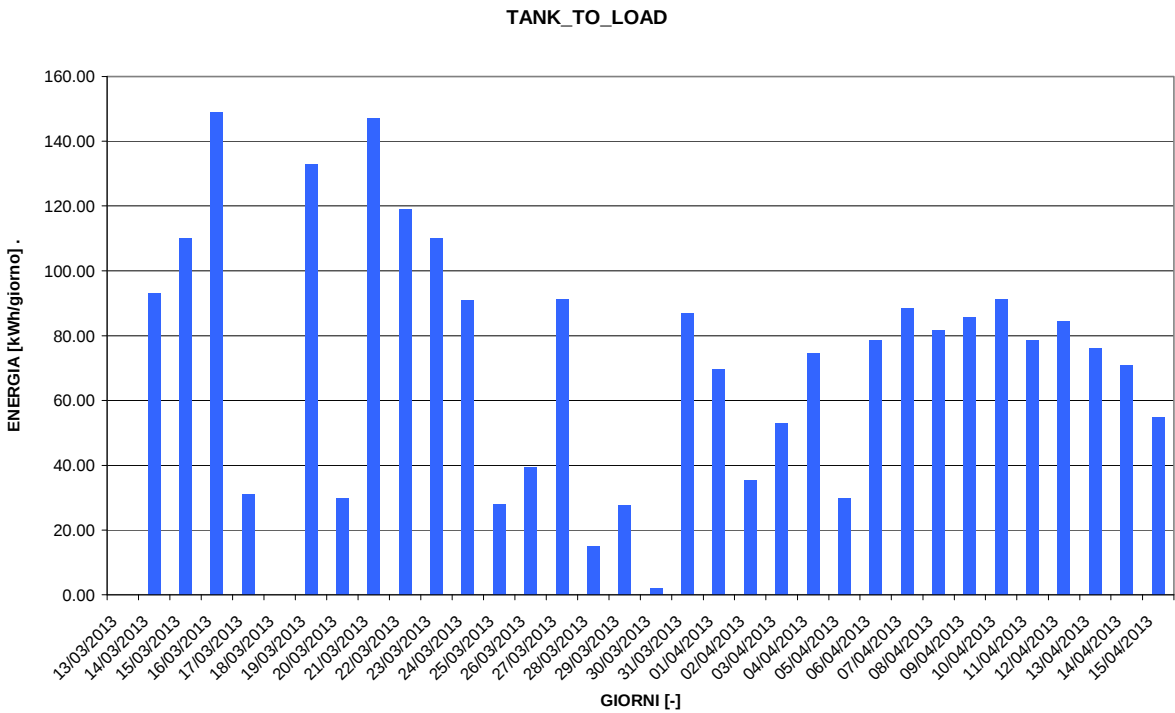


Figura 10 Energia termica giornaliera fornita dall’accumulo PCM a copertura fabbisogno di riscaldamento invernale edificio F-92 periodo 13 marzo – 15 aprile 2013

Tabella 1 Energie termiche rilevate nel periodo 13 marzo – 15 aprile 2013: Energia termica fornita all'accumulo dal campo collettori (FE02), energia termica fornita dall'accumulo PCM all'edificio F-92 (TANK_TO_LOAD), energia termica fornita dalla caldaia all'edificio F-92 (FE03) e fabbisogno edificio F-92 (FE07)

DATA	FE02 [kWh]	TANK_TO_LOAD [kWh]	FE03 [kWh]	FE07 [kWh]
13/03/2013	7	0	132	130
14/03/2013	98	93	107	200
15/03/2013	123	110	80	190
16/03/2013	176	149	51	200
17/03/2013	21	31	119	150
18/03/2013	5	0	131	130
19/03/2013	157	133	67	200
20/03/2013	17	30	100	130
21/03/2013	178	147	43	190
22/03/2013	156	119	31	150
23/03/2013	110	110	30	140
24/03/2013	93	91	39	130
25/03/2013	29	28	82	110
26/03/2013	38	39	111	150
27/03/2013	134	91	35	126
28/03/2013	0	15	78	93
29/03/2013	45	28	104	132
30/03/2013	11	2	96	98
31/03/2013	113	87	57	144
TOTALE 13-31 marzo	1512	1303	1493	2793

DATA	FE02 [kWh]	TANK_TO_LOAD [kWh]	FE03 [kWh]	FE07 [kWh]
01/04/2013	85	70	48	118
02/04/2013	37	35	80	115
03/04/2013	100	53	51	104
04/04/2013	57	75	47	122
05/04/2013	34	30	91	121
06/04/2013	127	78	41	119
07/04/2013	128	89	10	99
08/04/2013	108	81	18	99
09/04/2013	122	86	10	96
10/04/2013	116	91	9	100
11/04/2013	94	79	26	105
12/04/2013	103	84	24	108
13/04/2013	125	76	24	100
14/04/2013	80	71	9	80
15/04/2013	78	55	15	70
TOTALE 01-15 aprile	1394	1053	503	1556

	FE02 [kWh]	TANK_TO_LOAD [kWh]	FE03 [kWh]	FE07 [kWh]
TOTALE PERIODO	2906	2355	1997	4349

I dati sopra riportati:

- sono ottenuti da dati orari rilevati da misuratori di flusso CONTATERMIE tranne che per l'energia fornita dall'accumulo PCM, TANK_TO_LOAD, che risulta calcolata come differenza tra FE07 e FE03.
- Vengono qui confrontati per valutare il diverso comportamento dell'accumulo con PCM rispetto alla soluzione con accumulo standard.

Tabella 2 Accumulo PCM: caratteristiche fisiche tubi utilizzati tipo S46

DESCRIZIONE		2013
NUMERO DI TUBI PCM	[-]	120
LUNGHEZZA TUBO PCM	[mm]	1000
DIAMETRO TUBO PCM	[mm]	50
MASSA TUBO PCM	[kg/tubo]	2.8
VOLUME TOTALE TUBI PCM	[l]	236
CALORE SPECIFICO PCM	[kJ/(kg °C)]	2.41
CALORE LATENTE PER TUBO	[kJ/tubo]	532.8

In Tabella 2 sono riportate le caratteristiche fisiche e termodinamiche utilizzate nelle valutazioni che seguono relative all'accumulo: i 120 tubi sono stati posati all'interno dell'accumulo da 1000 l nominali nella parte inferiore come evidenziato in Figura 11. Nelle figura si nota:

- disco di 840 mm di diametro e 15 mm di spessore per l'appoggio dei tubi posto ad un'altezza di 315 mm dal pavimento;
- piastre forate (121 fori) per la tenuta in posizione dei 120 tubi PCM (1 foro centrale risulta non utilizzato).

La capacità teorica dell'accumulo valutata considerando sia il calore sensibile che quello latente è presentata in Tabella 3; nel caso specifico l'accumulo standard 2012 ha solo la componente sensibile¹, mentre l'accumulo con PCM ha sia la componente sensibile (considerando sia l'acqua che il PCM) che quella latente dei PCM. Dal confronto emerge che l'accumulo con PCM ha una capacità teorica di 300 MJ (83,3 kWh) che risulta quindi inferiore del 25% rispetto a quella dell'accumulo tradizionale di 408 MJ (113,3 kWh).

¹ L'energia sensibile viene calcolata considerando la temperatura minima di 30 °C e la temperatura massima dell'accumulo di 95 °C prevista dalla logica dell'impianto.

kWh). La componente sensibile del solo volume d’acqua rappresenta il 61%: la restante parte è ripartita tra latente (21%, 17,8 kWh) e sensibile (18%, 14,7 kWh) (vedi Tabella 3 e Figura 12).

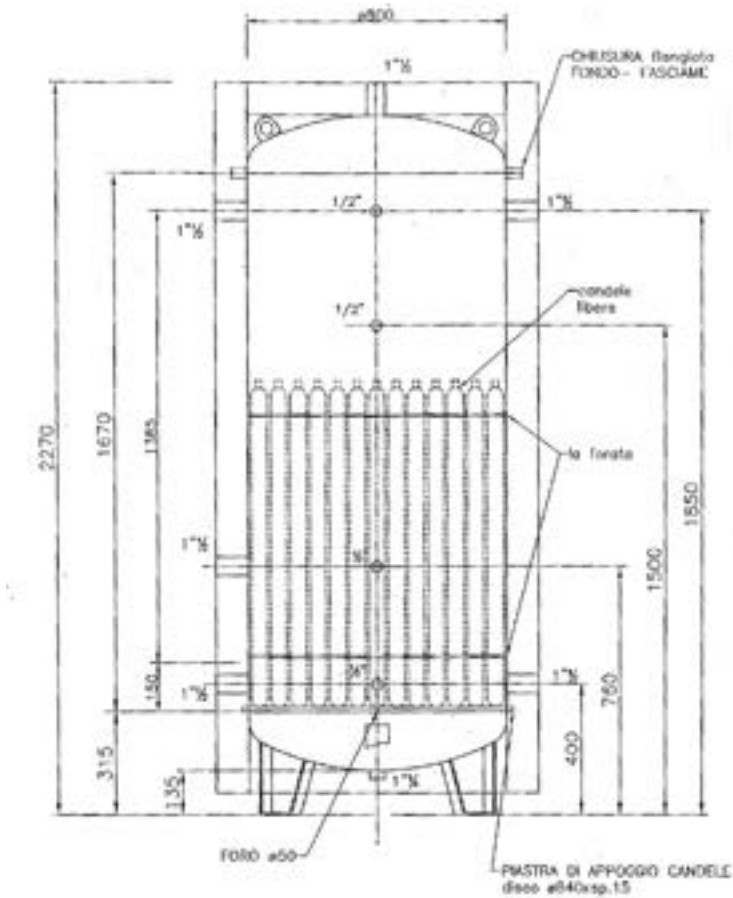


Figura 11 Accumulo PCM: vista in sezione

Tabella 3 Accumulo std VS accumulo PCM: capacità termica teorica

		CAPACITA' TERMICA LATENTE SERBATOIO	CAPACITA' TERMICA SENSIBILE SERBATOIO	CAPACITA' TERMICA TOTALE
SERBATOIO STD		[MJ/m3]	[MJ/m3]	[MJ/m3]
		0	272	272
		[MJ]	[MJ]	[MJ]
		0	408	408
SERBATOIO PCM*	ACQUA	[MJ/m3]	[MJ/m3]	[MJ/m3]
		0	201	201
		[MJ]	[MJ]	[MJ]
		0	183	183
	TUBI PCM	[MJ/m3]	[MJ/m3]	[MJ/m3]
		71	58	129
		[MJ]	[MJ]	[MJ]
		64	53	117

* Volume considerato pari alla somma del volume d’acqua e del volume dei tubi PCM

ACCUMULO PCM

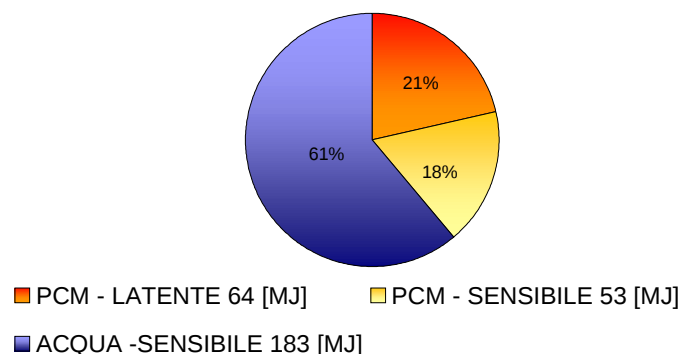


Figura 12 Accumulo PCM: dettaglio capacità teorica di accumulo

3 Accumulo caldo: confronto 2012-2013

Di seguito viene presentata l'analisi dei dati sperimentali ottenuti sull'impianto nel periodo 13 marzo – 15 aprile 2012 e 2013.

In Tabella 4 vengono riassunti alcuni parametri di confronto:

- ❑ Temperatura media periodo: i giorni del mese di marzo 2012 sono stati nettamente più caldi dell'equivalente periodo del 2013 con una differenza in media di 3,3 °C. Viceversa i giorni del mese di aprile risultano più confrontabili avendo temperature medie che si discostano di 1 °C (vedi Figura 22).
- ❑ Volume accumulo caldo: per il 2012 è stato utilizzato un accumulo standard da 1500 l; per il 2013 è stato costruito un accumulo predisposto per contenere 120 tubi PCM da 1 m di lunghezza per 50 mm di diametro. L'accumulo in questione ha una piastra nella parte inferiore che separa circa 100 l dal totale volume nominale dell'accumulo di 1000 l (in particolare, anche se è presente un foro da 50 mm di diametro nella parte centrale della piastra, si fa l'ipotesi che tale volume contribuisca solo marginalmente all'accumulo di calore). Inoltre, il volume occupato dai tubi PCM è stimato in 236 l riducendo a 671 l il volume reale di acqua dell'accumulo (di cui 254 l tra il fasciame dei tubi PCM e separati dal volume superiore d'acqua da una piastra per la tenuta in sede dell'accumulo, vedi Figura 11).
- ❑ Temperatura edificio e correzione con gradi giorno: la temperatura di setpoint dell'edificio è stata aumentata da 20 °C del 2012 a 22 °C del 2013. Tale differenza di temperatura comporta un carico termico richiesto dall'edificio tendenzialmente superiore per il 2013 rispetto all'anno precedente: al fine di garantire la bontà del confronto tra periodi di anni diversi, il fabbisogno dell'edificio (FE07) e il contributo dell'accumulo al fabbisogno dell'edificio (TANK_TO_LOAD) sono stati corretti dividendoli per il numero di gradi giorno del relativo periodo². Dalla tabella i giorni di aprile 2012-2013 risultano avere un indice FE07/GG più simile, rispettivamente di 12,6 kWh/GG e 11,9 kWh/GG, rispetto ai giorni di marzo; il periodo di aprile risulta quindi maggiormente adatto al confronto. Se consideriamo l'indice relativo al contributo dell'accumulo al riscaldamento dell'edificio (TANK_TO_LOAD/GG) otteniamo un valore per il 2013 pari a 8 kWh/GG, in linea con gli 8,7 kWh/GG del 2012.
- ❑ SOLAR FRACTION: il contributo dell'accumulo al fabbisogno dell'edificio nei primi 15 giorni di aprile (periodo preferibile per il confronto) è risultato pressoché simile con una percentuale di 69% per il 2012 e di 68% per il 2013. La percentuale di utilizzo dell'energia solare data dall'accumulo

² Gradi Giorno (GG) calcolati come sommatoria nel periodo considerato (13-31 marzo, 1-15 aprile) della differenze positive tra temperatura interna di setpoint e temperatura media giornaliera nelle 24 ore

(TANK_TO_LOAD/FE02) risulta pari a 76% nel caso di accumulo con PCM (2013) contro il 64 % dell'accumulo std (2012): tale dato, come già visto, è in parte condizionato da una temperatura di setpoint 2013 dell'edificio superiore di 2 °C rispetto al valore utilizzato nel 2012 contro un aumento della temperatura media dell'aria esterna di circa 1 °C dal 2012 al 2013.

Il confronto dell'andamento della radiazione solare nel periodo considerato (Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21) mette in evidenza come nel marzo 2012 (28 giorni) ci sono stati almeno 8 giorni con irraggiamento elevato contro 3 giorni di marzo 2013. Anche in questo caso i primi 15 giorni di aprile risultano più simili tra i due anni considerati.

Il confronto tra i dati di energia su base giornaliera tra i due anni (Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27) evidenzia come vi sia un comportamento non direttamente correlabile: tuttavia è possibile individuare alcuni giorni in cui i valori misurati sono simili (vedi barre evidenziate in rosso). In particolare si può porre l'attenzione sui flussi di calore in ingresso (FE02) e uscita (TANK_TO_LOAD) dall'accumulo per cercare di trovare un giorno in cui tali valori siano entrambi confrontabili tra 2012 e 2013. Il 15 aprile l'accumulo fornisce all'edificio 59 kWh nel 2012 e 55 kWh nel 2013, mentre riceve energia dal campo collettori per 70 kWh nel 2012 e 78,1 kWh nel 2013. Tuttavia, mancando dati dei profili di temperatura nell'accumulo per l'anno 2012 del giorno in questione, non è stato possibile operare il confronto su tale giorno.

Per meglio evidenziare il differente comportamento tra accumulo std e accumulo PCM, si è cercato di individuare un giorno del periodo 2012 che avesse caratteristiche simili di flussi di calore FE02 e TANK_TO_LOAD. Il 26 marzo 2012 l'accumulo ha ricevuto 123 kWh e ha fornito 87 kWh; tali valori sono confrontabili con quelli del giorno analizzato in Figura 37 (13 aprile 2013), ossia rispettivamente, 125 kWh e 76 kWh.

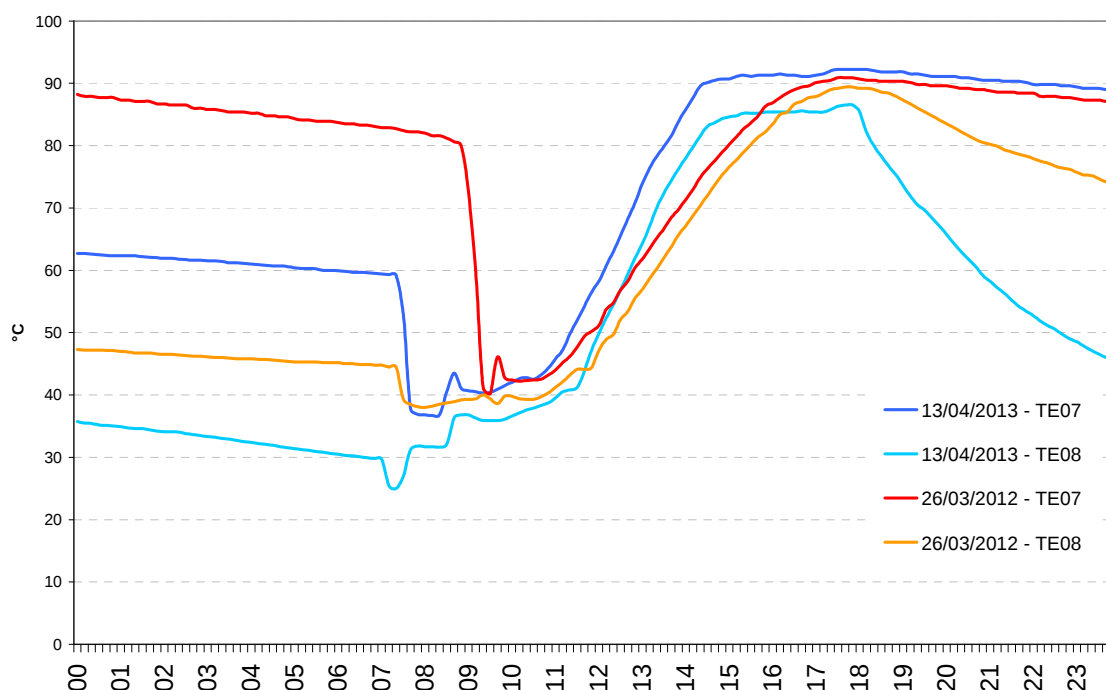


Figura 13 Profili di temperature superiore (TE07) ed inferiore (TE08) accumulo: confronto tra standard (26/03/2012) e PCM (13/04/2013) a condizioni simili di energia giornaliera immessa (FE02) e prelevata (TANK_TO_LOAD)

In Figura 13 sono messi a confronto i profili di temperatura all'interno dei due accumuli:

- i profili rosso/arancio fanno riferimento, rispettivamente, alle temperature delle sonde TE07/TE08 nell'accumulo standard rilevate il 26/03/2012

- i profili blue/azzurro fanno riferimento, rispettivamente, alle temperature delle sonde TE07/TE08 nell'accumulo PCM rilevate il 13/04/2013

Notiamo come le curve rosso/arancio sono tendenzialmente più ravvicinate rispetto alle curve blue/azzurro suggerendo una minor stratificazione dell'accumulo: in effetti la presenza del PCM è delle piastre di tenuta in sede dei tubi agevolano la stratificazione. Inoltre si nota come la temperatura della sonda TE08 decresce molto più rapidamente ove vi sono tubi PCM.

Alle ore 10:30 gli accumuli std/PCM hanno la temperatura superiore a 42,4/42,5 °C e quella inferiore a 39,3/37,9 °C.

Tra le 10:30 e le 17:50 l'accumulo std raggiunge i 90,9 °C con una pendenza inferiore a quella della soluzione PCM probabilmente a causa di un volume d'acqua di più del 60% superiore.

Dopo le ore 17:50 si assiste ad un identico comportamento del profilo di temperatura TE07 nell'accumulo std che decresce lentamente con la stessa pendenza del profilo TE07 nell'accumulo PCM. Viceversa il profilo di temperatura nella parte inferiore dell'accumulo std arriva a 63,3 °C alle ore 7:00 del giorno dopo (nel grafico la curva viene troncata alle ore 24:00 alla temperatura di 73,6 °C) con una differenza di temperatura di circa 30 °C. L'effetto è dovuto in entrambi i casi alla dispersione termica notturna che induce successivamente una stratificazione interna³. Per avere una visione più chiara del comportamento dell'accumulo sarebbe stato utile avere più di due sonde all'interno dell'accumulo.

Tabella 4 Accumulo STD vs accumulo PCM: confronto

	MARZO 2012	MARZO 2013			APRILE 2012	APRILE 2013	
TEMPERATURA MEDIA PERIODO	14.3	11.0	[°C]	TEMPERATURA MEDIA PERIODO	13.3	14.3	[°C]
VOLUME ACCUMULO	1500	906	[l]	VOLUME ACCUMULO	1500	906	[l]
TEMPERATURA INTERNA EDIFICIO	20.0	22.0	[°C]	TEMPERATURA INTERNA EDIFICIO	20.0	22.0	[°C]
FE07/GG	12.0	13.4	[kWh/GG]	FE07/GG	12.6	11.9	[kWh/GG]
TANK_TO_LOAD/GG	9.9	6.2	[kWh/GG]	TANK_TO_LOAD/GG	8.7	8.0	[kWh/GG]
FE07	1 290	2 793	[kWh]	FE07	1 070	1 556	[kWh]
FE03	229	1 493	[kWh]	FE03	331	503	[kWh]
FE02	1 677	1 512	[kWh]	FE02	1 159	1 394	[kWh]
TANK_TO_LOAD	1 061	1 303	[kWh]	TANK_TO_LOAD	739	1 053	[kWh]
SOLAR FRACTION	82%	47%	%	SOLAR FRACTION	69%	68%	%

Tabella 5 Accumulo std VS accumulo PCM: caratteristiche fisiche

DESCRIZIONE		2012	2013
VOLUME NOMINALE	[l]	1500	1000
VOLUME INTERNO UTILE TOTALE	[l]	1500	906
VOLUME TOTALE PCM	[l]	-	236
VOLUME INTERNO ACQUA	[l]	1500	671
VOLUME ACQUA A CONTATTO TRA PCM	[l]	0	254
VOLUME ACQUA SOPRA PCM	[l]	0	416
ALTEZZA UTILE	[l]	-	1850
DIAMETRO INTERNO	[l]	-	790

³ Se supponiamo che la potenza dispersa sia la stessa per entrambi gli accumuli e che quindi la riduzione di temperatura sia funzione della massa d'acqua presente, possiamo stimare che la riduzione di temperatura sia inversamente proporzionale al volume d'acqua. Nel caso in esame, la parte inferiore dell'accumulo std (750 l) subisce una riduzione di temperatura di 15,4 °C; su 254 l d'acqua della parte inferiore dell'accumulo PCM mi dovrei quindi aspettare una riduzione di circa 45,4 °C. Nel caso in esame la riduzione è stata di 40,5 °C.

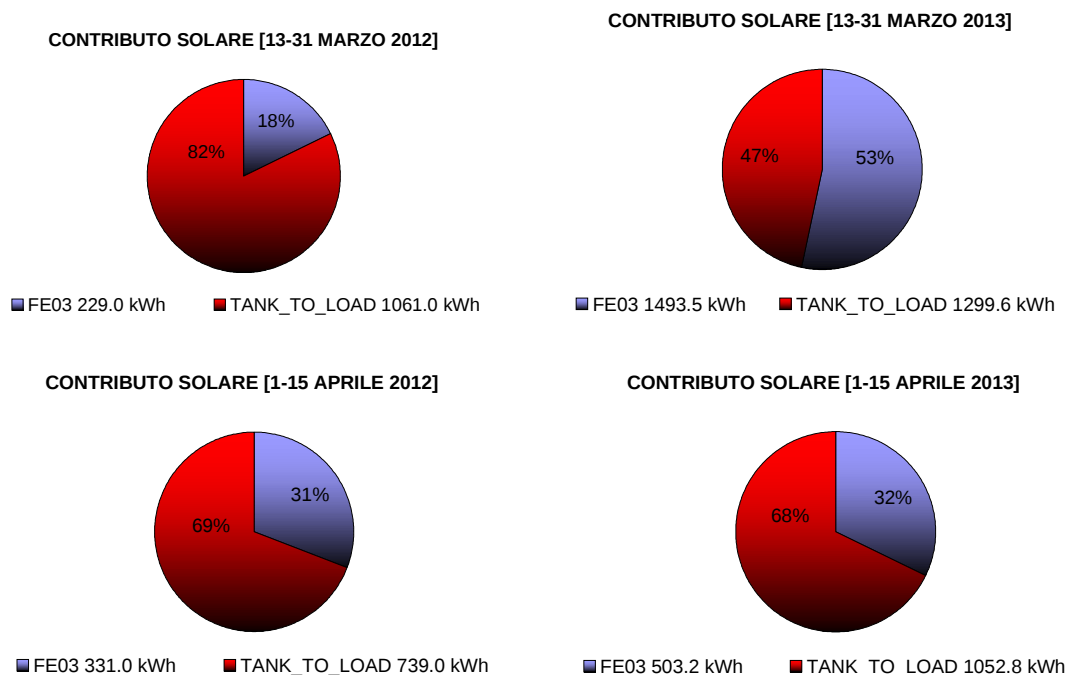


Figura 14 Energie termiche rilevate nel periodo 13 marzo – 15 aprile 2012/2013: frazione energia termica fornita dall'accumulo PCM all'edificio F-92 (TANK_TO_LOAD) ed energia termica fornita dalla caldaia (FE03) a copertura dei fabbisogni dell'edificio stesso (FE07)

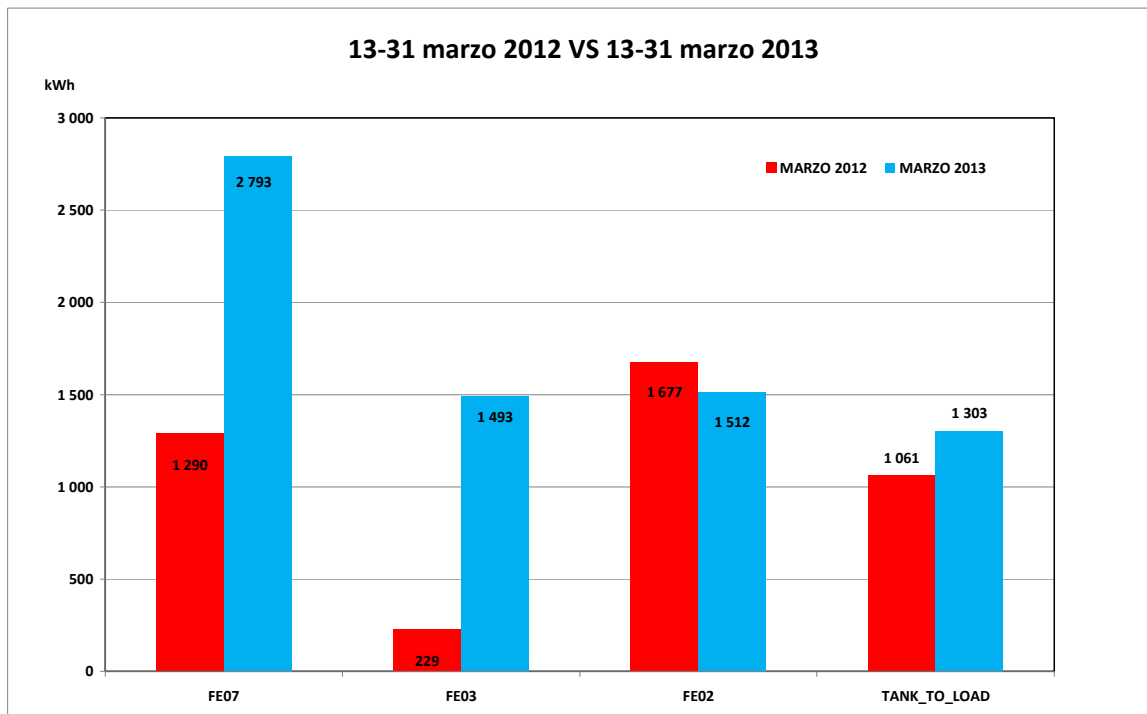


Figura 15 Energie termiche impianto periodo 13 marzo – 31 marzo: confronto anno 2012/2013

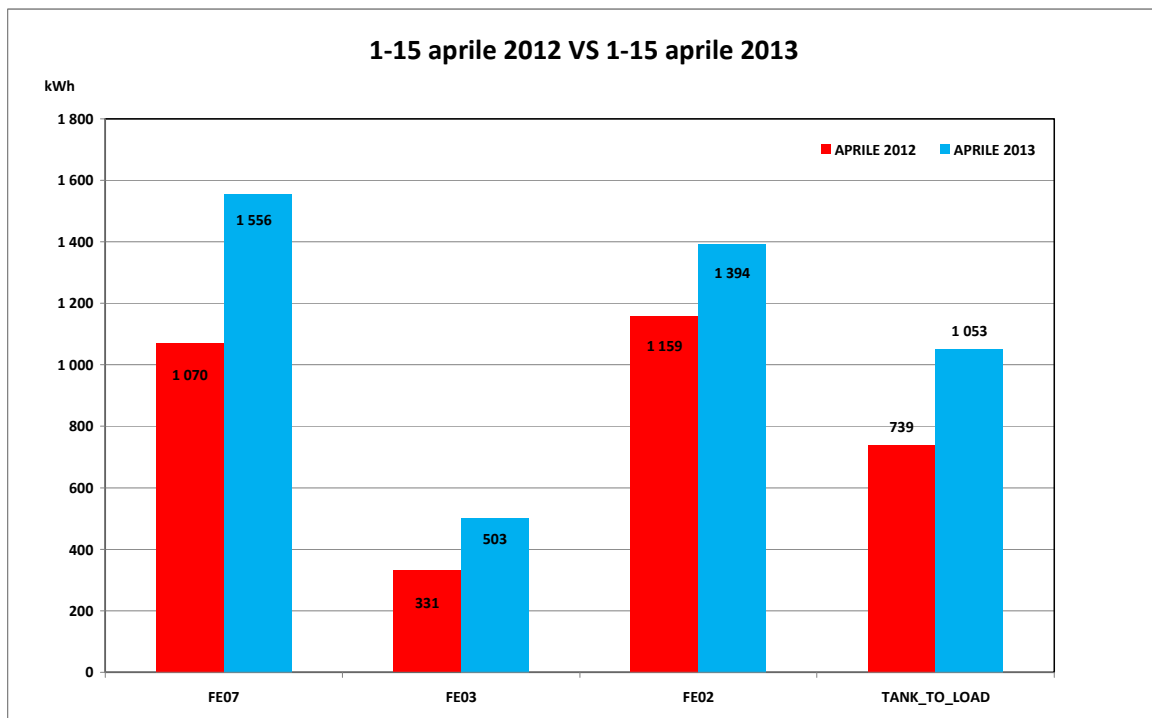


Figura 16 Energie termiche impianto periodo 1-15 aprile: confronto anno 2012/2013

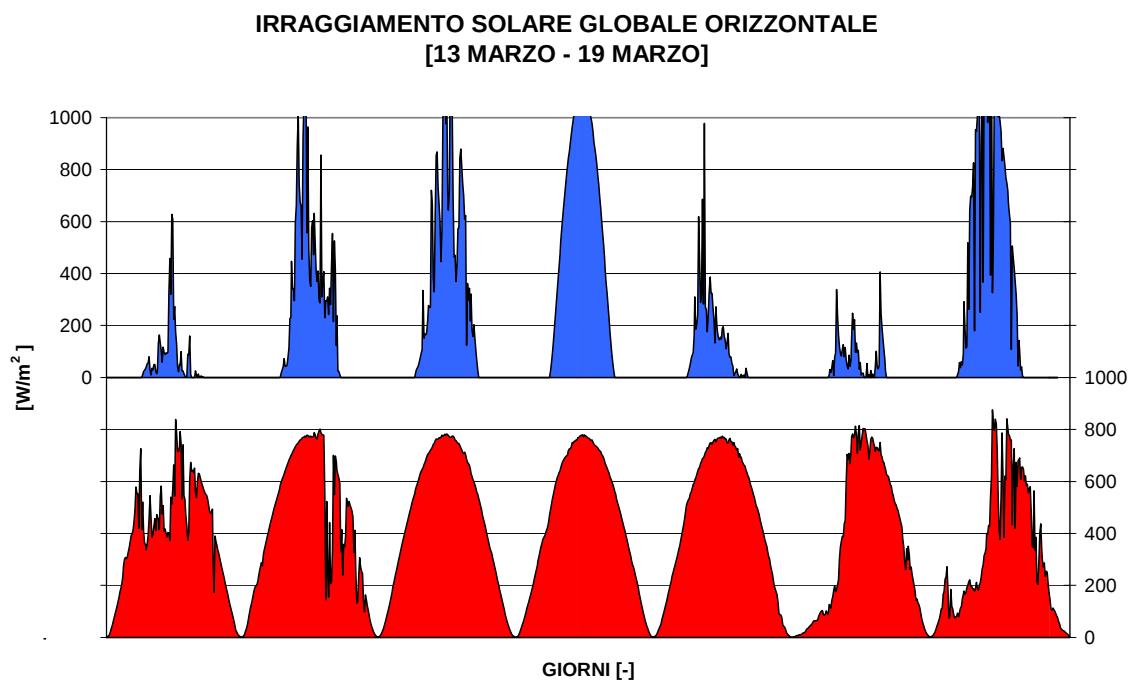


Figura 17 Irraggiamento solare globale orizzontale nel periodo 13 marzo – 19 marzo: confronto 2012 (area rossa) – 2013 (area blu) (NB: i dati relativi al 2012 sono relativi a dati misurati non direttamente)

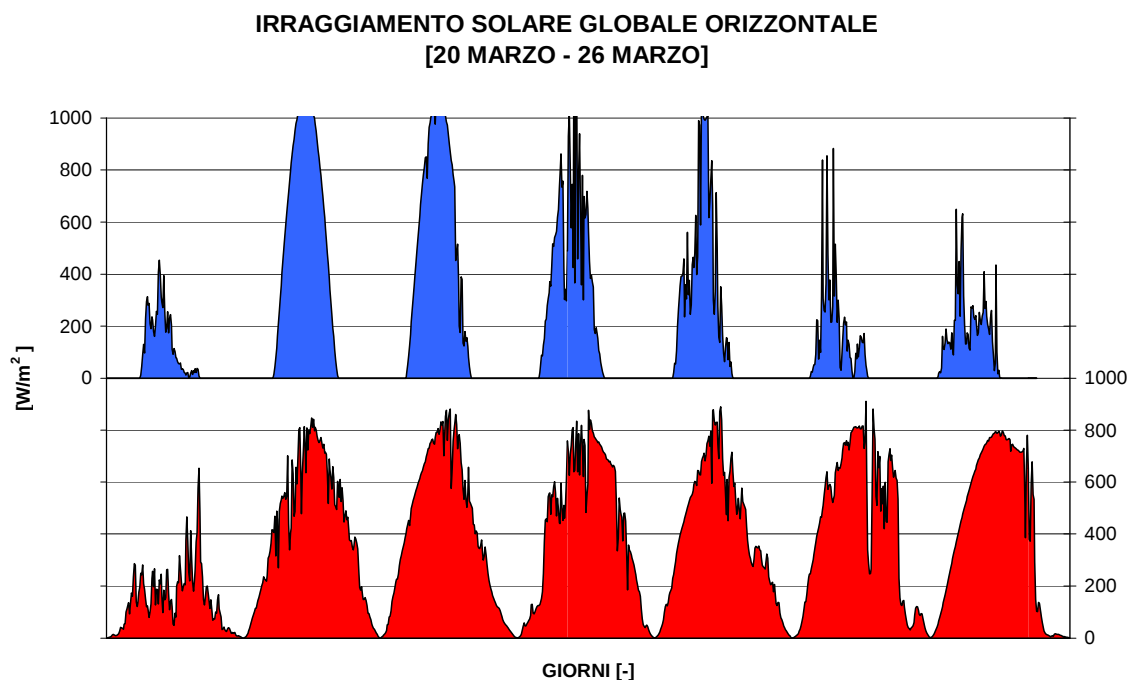


Figura 18 Irraggiamento solare globale orizzontale nel periodo 20 marzo – 26 marzo: confronto 2012 (area rossa) – 2013 (area blu) (NB: i dati relativi al 2012 sono relativi a dati misurati non direttamente)

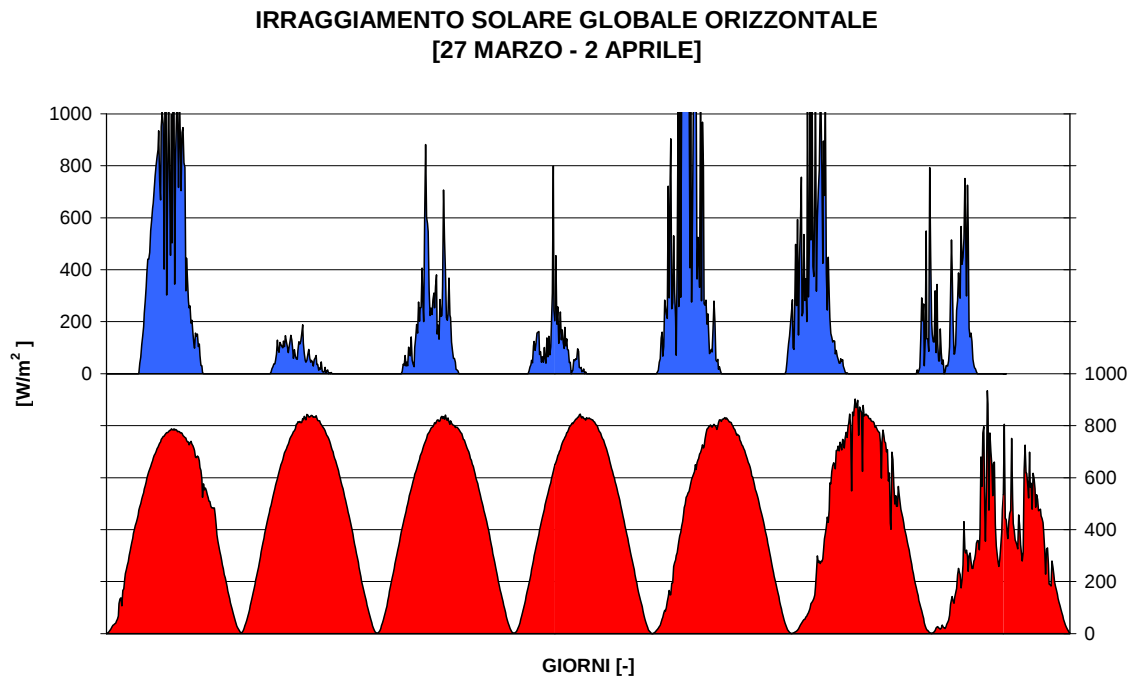


Figura 19 Irraggiamento solare globale orizzontale nel periodo 27 marzo – 2 aprile: confronto 2012 (area rossa) – 2013 (area blu) (NB: i dati relativi al 2012 sono relativi a dati misurati non direttamente)

IRRAGGIAMENTO SOLARE GLOBALE ORIZZONTALE
[3 APRILE - 9 APRILE]

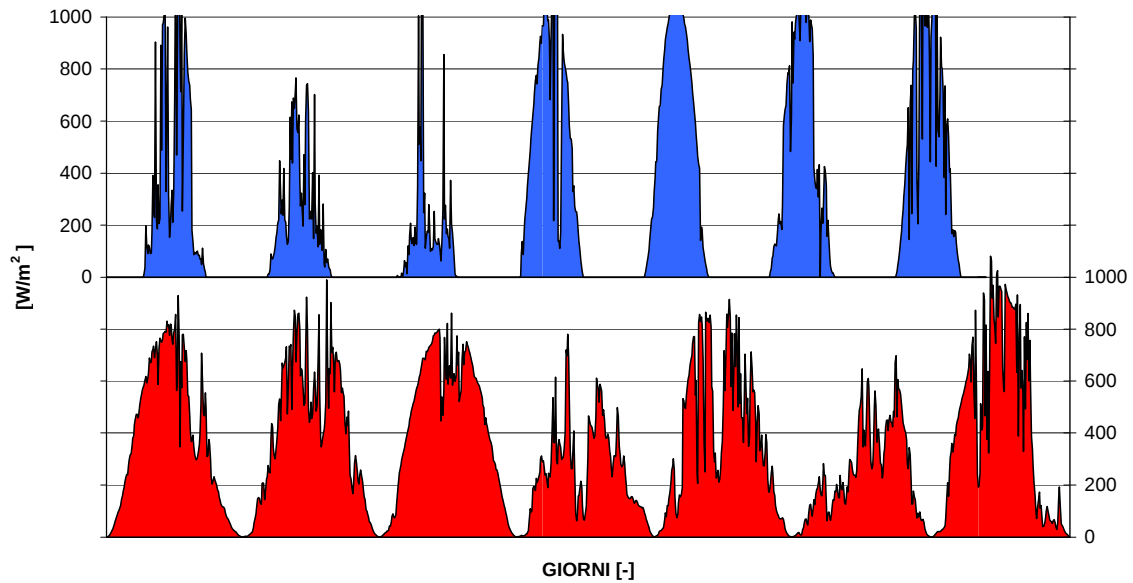


Figura 20 Irraggiamento solare globale orizzontale nel periodo 3 aprile – 9 aprile: confronto 2012 (area rossa) – 2013 (area blu) (NB: i dati relativi al 2012 sono relativi a dati misurati non direttamente)

IRRAGGIAMENTO SOLARE GLOBALE ORIZZONTALE
[10 APRILE - 15 APRILE]

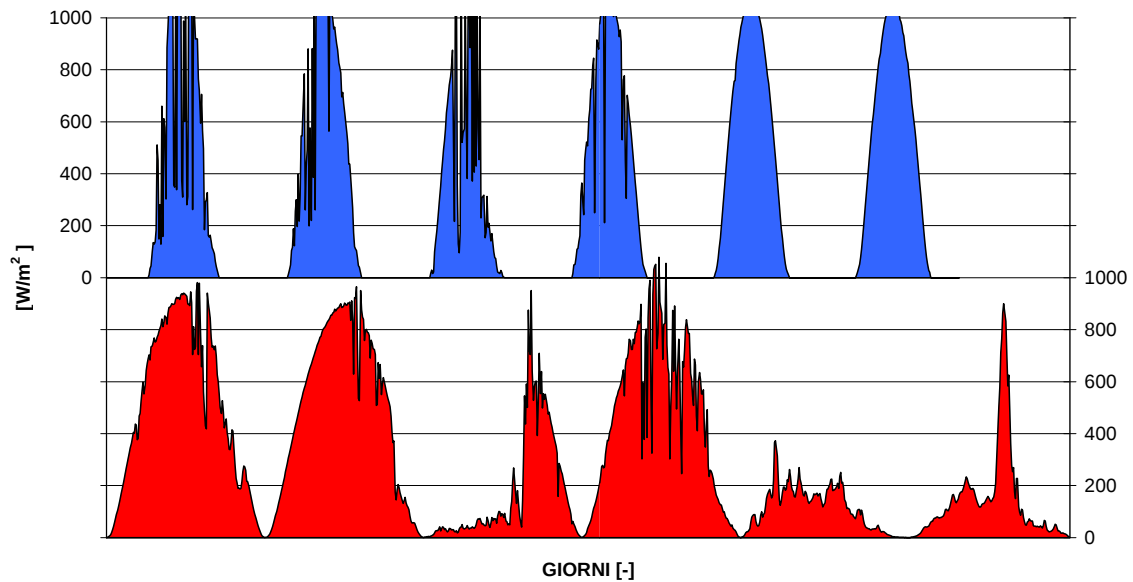


Figura 21 Irraggiamento solare globale orizzontale nel periodo 10 aprile – 15 aprile: confronto 2012 (area rossa) – 2013 (area blu) (NB: i dati relativi al 2012 sono relativi a dati misurati non direttamente)

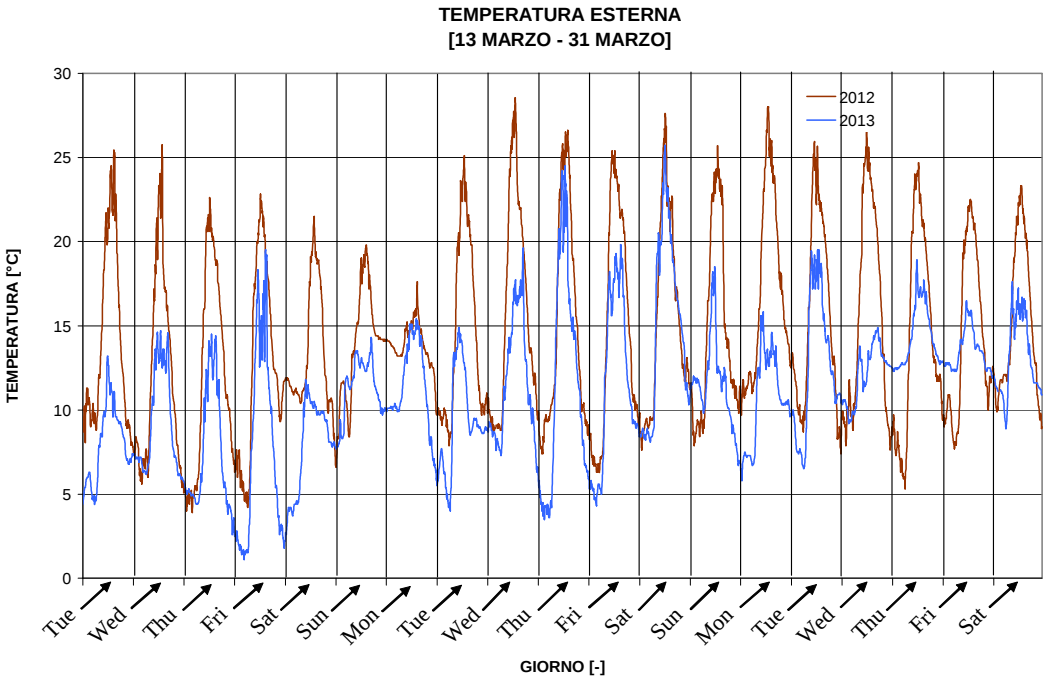


Figura 22 Temperatura esterna: confronto 13-31 marzo 2012-2013

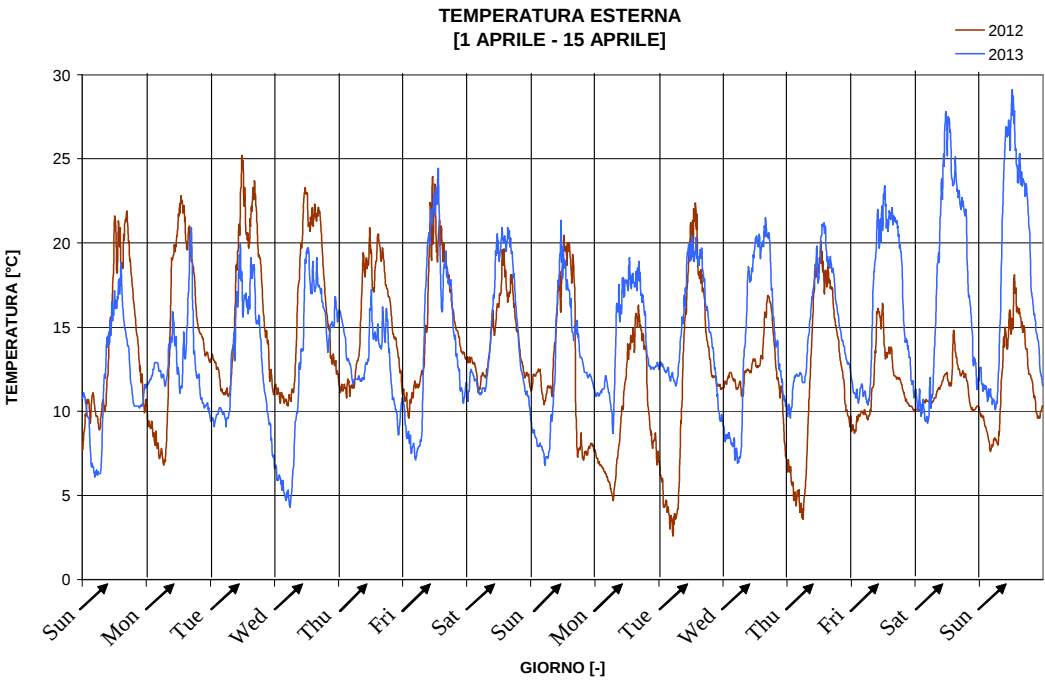


Figura 23 Temperatura esterna: confronto 1-15 aprile 2012-2013

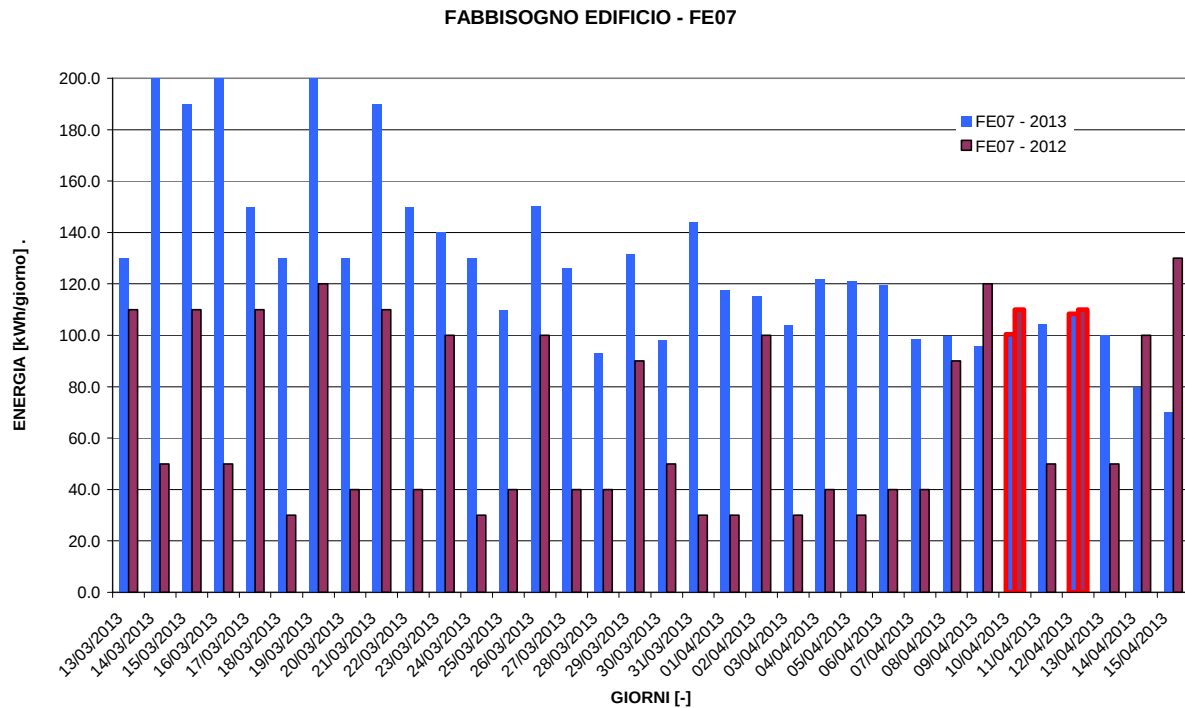


Figura 24 Fabbisogno energia termica riscaldamento invernale periodo 13 marzo – 15 aprile: confronto 2012-2013

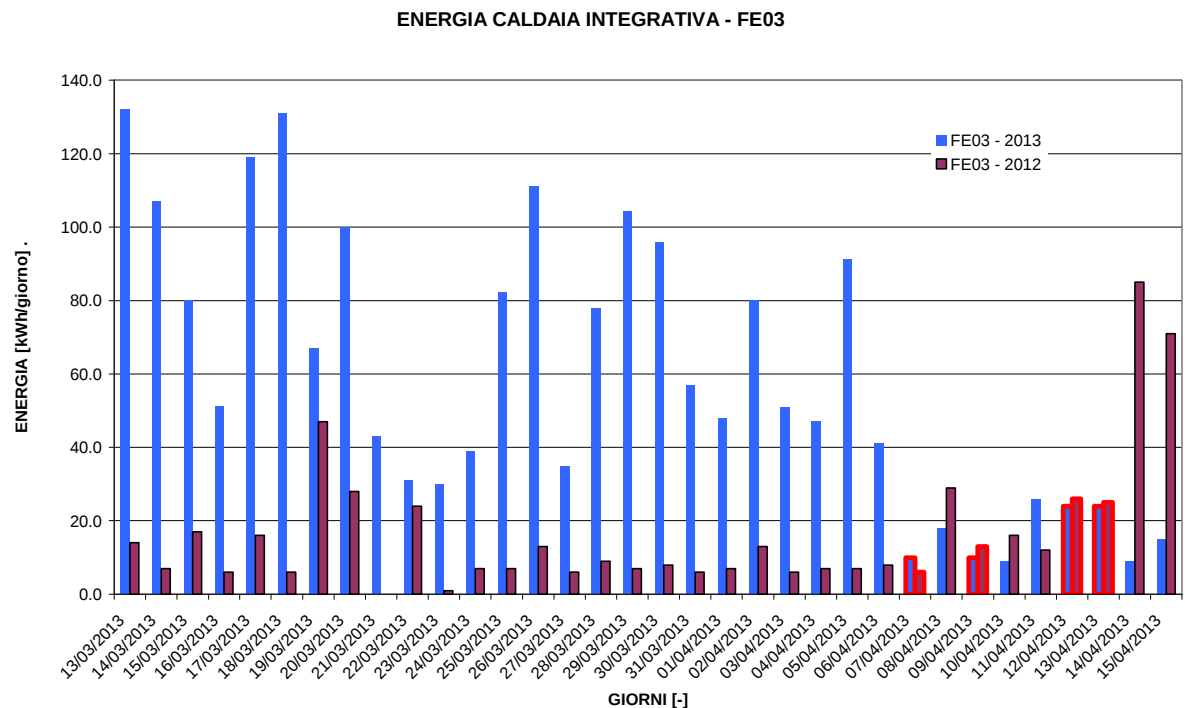


Figura 25 Energia fornita dalla caldaia su base giornaliera all'edificio F-92 a copertura del fabbisogno per riscaldamento: confronto 2012-2013

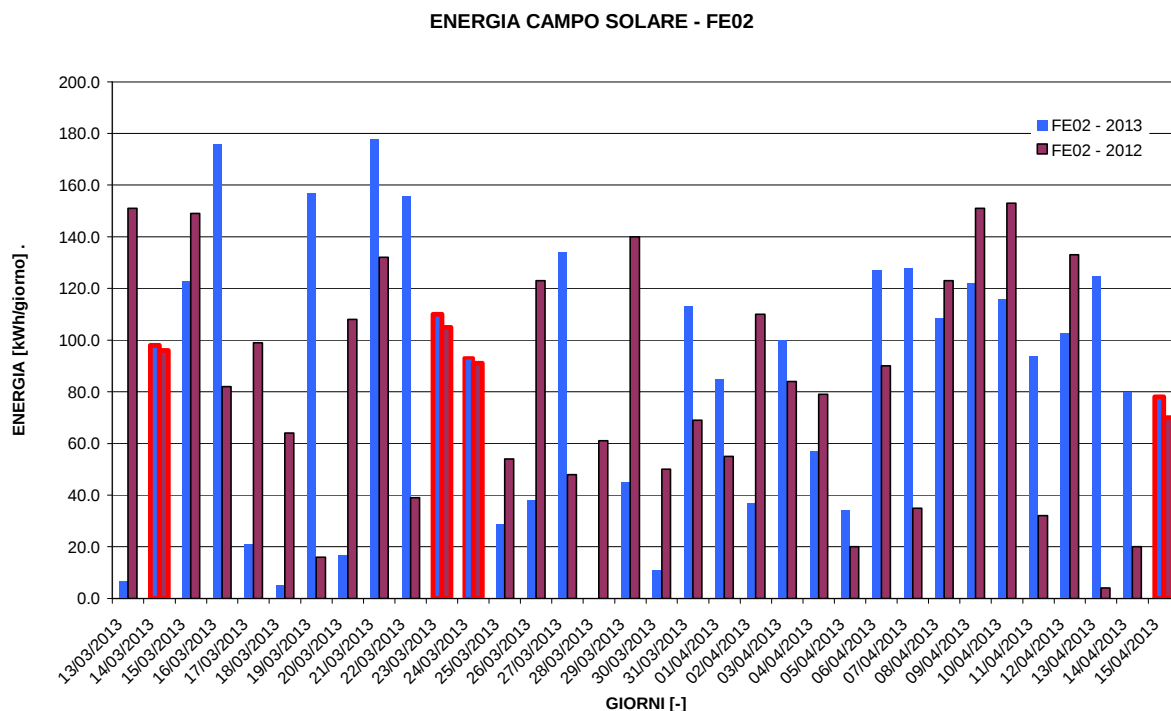


Figura 26 Energia solare su base giornaliera proveniente dal campo collettori a tubi evacuati e ceduta all'accumulo PCM: confronto 2012-2013

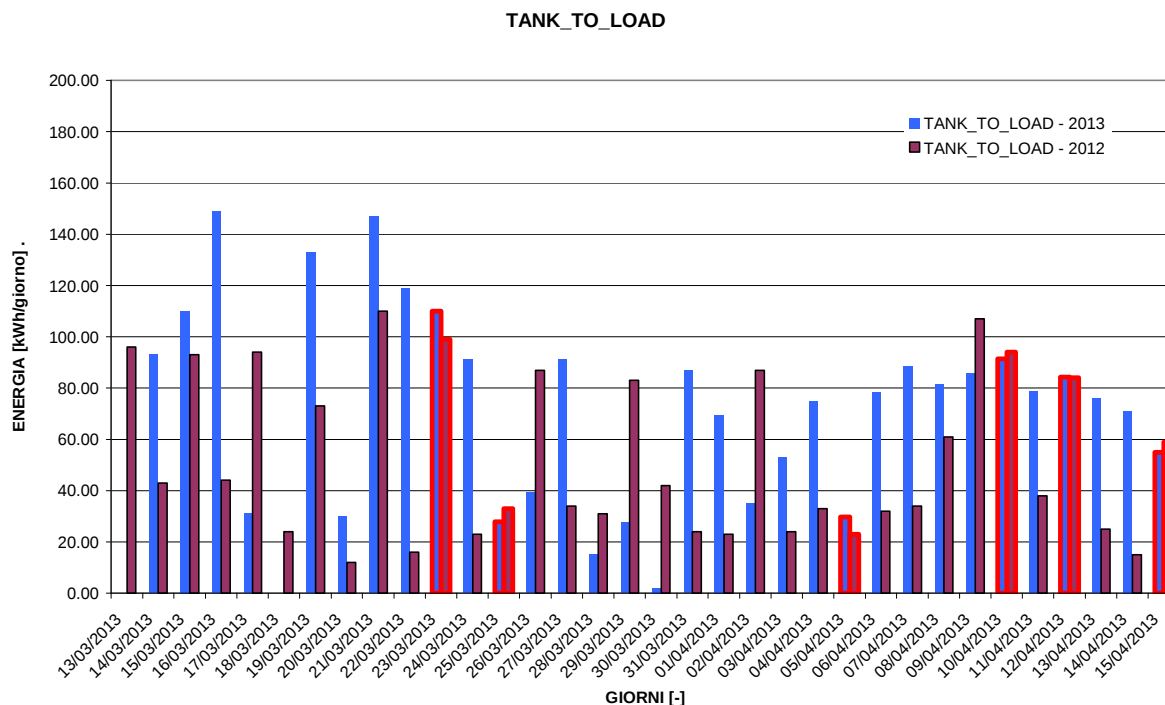


Figura 27 Energia termica giornaliera fornita dall'accumulo PCM a copertura fabbisogno di riscaldamento invernale edificio F-92: confronto 2012-2013

Per l'osservazione dettagliata del funzionamento dell'accumulo nell'arco delle 24 ore si è partiti dalla configurazione 2012 analizzata utilizzando un grafico del tipo in Figura 28. La figura rappresenta l'andamento dei profili di temperatura sul lato alto (TE07 – curva arancione) e sul lato basso (TE08 – curva

azzurra) dell'accumulo in funzione dell'energia termica immessa (area rossa) e prelevata (area blu); la linea tratteggiata nera rappresenta il bilancio orario tra energia immessa e prelevata dall'accumulo.

Le grandezze rappresentate nei grafici che seguono sono le seguenti:

- ❑ TE07 – temperatura parte alta accumulo (valore medio nei 10 minuti)
- ❑ TE08 – temperatura parte bassa accumulo (valore medio nei 10 minuti)
- ❑ FE02 – apporto energia termica collettori solari all'accumulo (valore medio orario)
- ❑ TANK_TO_LOAD – contributo accumulo solare al fabbisogno edificio

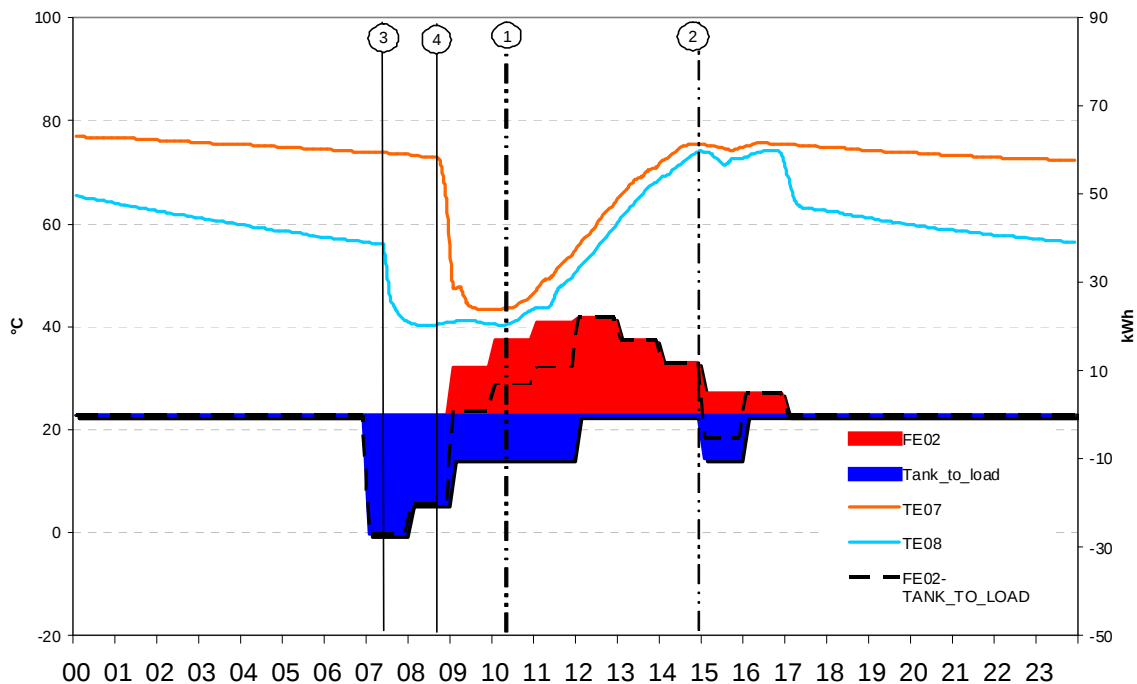


Figura 28 Accumulo STD - 2 aprile 2012: carica dell'accumulo (1-2)

Nell'esempio considerato abbiamo:

- ❑ Tra le 7:20 e le 8:40 (intervallo 3-4) la temperatura sulla parte alta dell'accumulo rimane invariata intorno ai 73 °C a fronte di una richiesta di calore da parte dell'edificio. Nella parte inferiore dell'accumulo invece la temperatura si abbassa da 55,9 °C a 40,5 °C (intervallo 3-4) come conseguenza del prelievo di calore per 27 kWh. Se consideriamo che tutto il volume d'acqua sia ad una temperatura media di circa 65-70 °C otteniamo che circa 2/3 dell'energia sensibile dell'accumulo viene utilizzata.
- ❑ Tra le 8:40 e le 10:20 (intervallo 4-1) la temperatura superiore dell'accumulo si porta a 43,4 °C (quella inferiore rimane pressoché costante) a fronte di un prelievo netto di 19 kWh (vedi linea tratteggiata); tale valore è coerente con l'energia residua dell'accumulo (1/3 su 45 kWh).
- ❑ Tra le 10:20 e le 15:00 (intervallo 1-2) la temperatura superiore passa da 43,6 °C a 75,3 °C e quella inferiore da 40,5 °C a 74,0 °C con profili con pendenza abbastanza costante.
- ❑ Dopo le 15:00 un flusso netto in uscita di calore di 5 kWh porta la temperatura a ridursi di circa 3 °C; si osserva poi, dopo una prima riduzione netta della TE08, che i profili di temperatura TE08 e TE07 decrescono con la stessa leggera pendenza rispettivamente da 75,3 °C a 69,4 °C e da 63 °C a 50,3 °C fino alle ore 7:00 del giorno successivo (nel grafico la curva viene troncata alle ore 24:00).

Estrapolando i dati ottenuti durante la campagna di misura del 2012 è stato possibile costruire la Tabella 6 in cui sono stati messi a confronto quattro giorni nell'intervallo temporale dal 13 marzo al 15 aprile come segue:

- ❑ **FUNZIONAMENTO GIORNALIERO:** è riportata l'energia fornita dal solare all'accumulo (FE02) e quella che l'accumulo ha fornito all'edificio (TANK_TO_LOAD) nell'arco delle 24 ore; per differenza viene calcolato il contributo netto all'accumulo.
- ❑ **FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO:** nell'arco della giornata è stato isolato l'intervallo (vedi Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, intervallo 1-2) in cui l'accumulo si carica per effetto dell'apporto solare con o senza contemporaneo prelievo di calore verso l'utenza. E' stato quindi calcolato il calore netto fornito all'accumulo mediante 1° principio della termodinamica⁴ utilizzando la temperatura media all'inizio del processo e alla fine (TANK – TOTALE CALCOLATO).

Tabella 6 Fase di carica dell'accumulo durante la climatizzazione dell'edificio (anno 2012): confronto tra energia accumulata calcolata sulla base dei dati di temperatura e misurata con CONTATERMIE

			15/03/2012	29/03/2012	02/04/2012	12/04/2012	
FUNZIONAMENTO GIORNALIERO		FE02	[kWh]	149.1	140.2	110	133
			[MJ]	536.8	504.7	396	478.8
		TANK_TO_LOAD	[kWh]	-93.0	-63.0	-87	-89
			[MJ]	-334.8	-226.8	-313.2	-320.4
		TANK	[kWh]	56.1	77.2	23	44
			[MJ]	202.0	277.9	82.8	158.4
FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO 2012	INIZIO	TIME	[h]	10.00	10.30	10.20	9.00
		TE07	[°C]	41.3	48.5	43.6	35.7
		TE08	[°C]	36.4	43.0	40.5	33.2
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	38.9	45.8	42.05	34.45
	FINE	TIME	[h]	16.00	17.00	15.00	17.10
		TE07	[°C]	81.8	93.9	75.3	70.1
		TE08	[°C]	79.8	92.6	74.0	68.1
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	80.8	93.3	74.7	69.1
	ENERGIE	A - TANK - TOTALE CALCOLATO	[kWh]	73.2	82.9	56.9	60.4
			[MJ]	263.5	298.3	204.7	217.6
		FE02	[kWh]	118.1	111.1	89.0	131.0
			[MJ]	425.2	400.0	320.4	471.6
		TANK_TO_LOAD	[kWh]	-30.0	-10.0	-20.0	-63.0
			[MJ]	-108.0	-36.0	-72.0	-226.8
		B - TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	88.1	101.1	69.0	68.0
			[MJ]	317.2	364.0	248.4	244.8
		TANK - TOTALE	[kWh]	-14.9	-18.2	-12.1	-7.6
		[A-B]	[%]	-16.9%	-18.0%	-17.6%	-11.1%

Il dato, confrontato con il valore misurato dal misuratore CONTATERMIE (TANK – TOTALE MISURATO), risulta avere uno scostamento percentuale sempre in difetto (calore calcolato con profili di temperatura inferiore a quello desunto dalle misure con contatori) compreso tra l'11% e il 18%⁵. Tale minor calore può attribuirsi in parte all'effetto delle dispersioni termiche sulla linea tra scambiatore solare SC01 ed accumulo ed in parte alle dispersioni termiche lungo la linea tra accumulo e termodotto⁶. Se rappresentiamo graficamente l'errore di misura del calore accumulato

⁴ Vengono trascurate le perdite di calore per dissipazione attraverso il contenitore

⁵ Il valore medio dello scostamento è pari a 16%; tale valore è stato utilizzato anche per correggere i dati misurati nel 2013 con accumulo PCM.

⁶ Il calore fornito dall'accumulo, TANK_TO_LOAD, viene stimato come differenza tra fabbisogno dell'edificio, misurato all'inizio del termodotto dalla sonda FE07, e calore fornito dalla caldaia FE03; quindi il calore calcolato come differenza ingloba anche le dispersioni termiche lungo le linee/componenti d'impianto tra l'accumulo, la sonda FE03 (locale caldaia) e la sonda FE07. Comunque, va rilevato che le temperature in/out dello scambiatore solare SC02 lato accumulo (TE05 e TE06), ad esempio per il giorno 29/03/2012, contabilizzano tra le 15:00 e le 18:00 (in condizioni di accumulo molto caldo) una energia immessa a fronte di una temperatura in ingresso allo scambiatore superiore a quella in uscita; in tali casi sembra ci sia un dato errato dalle sonde di temperatura.

in funzione della temperatura massima raggiunta dall'accumulo notiamo come l'errore tende ad aumentare all'aumentare della temperatura del serbatoio solare.

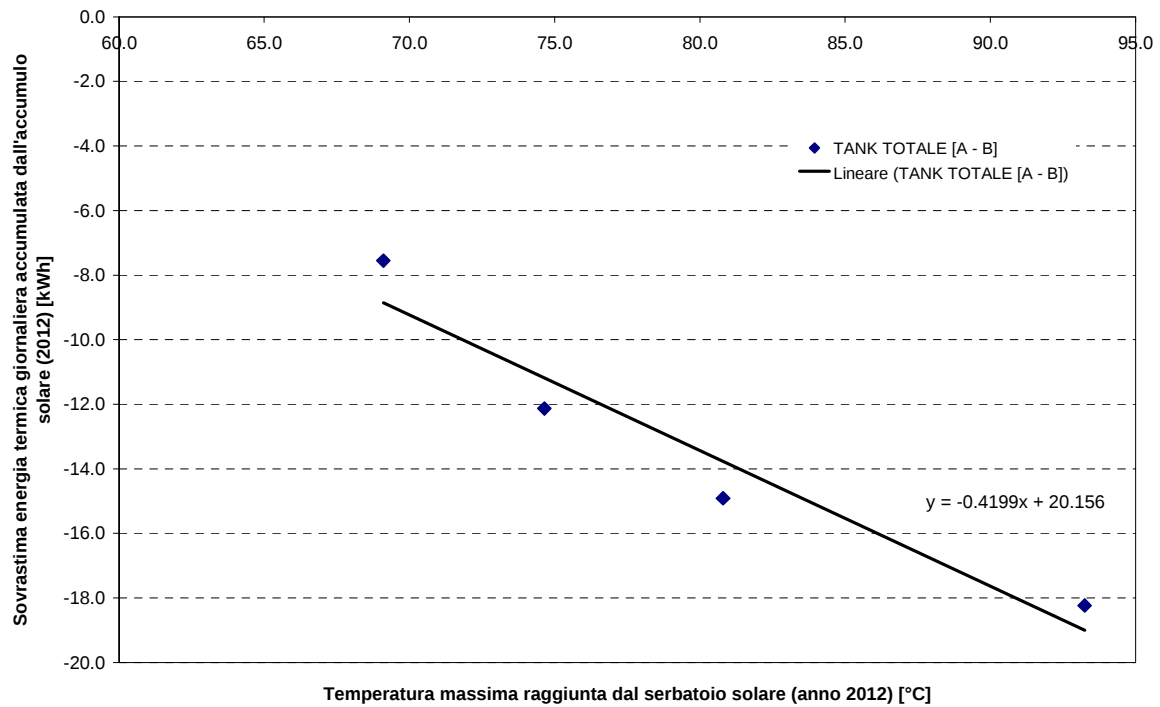


Figura 29 Accumulo standard 2012: sovrastima calore accumulato in funzione della temperatura massima dell'accumulo

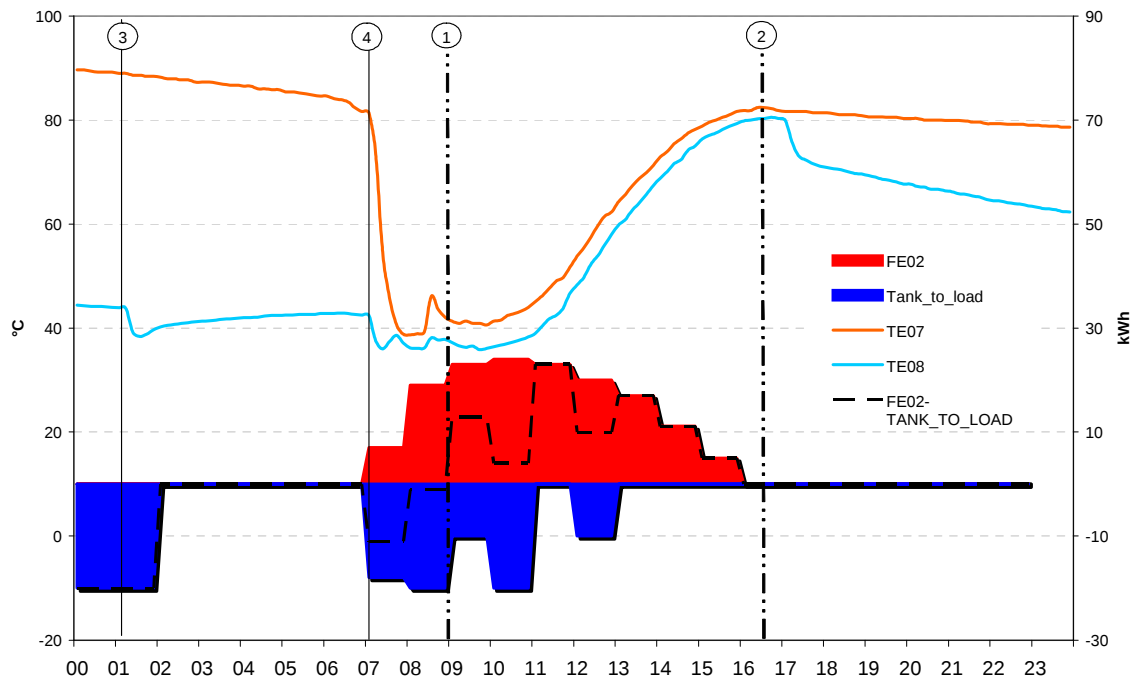


Figura 30 Accumulo STD - 15 marzo 2012: carica dell'accumulo (1-2)

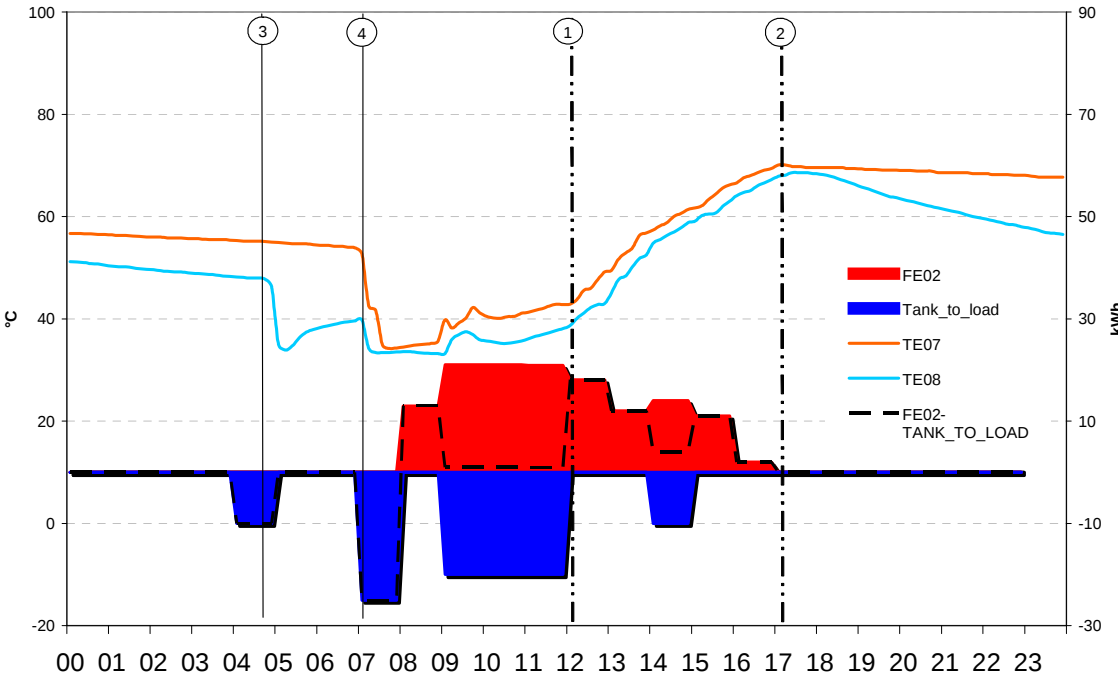


Figura 31 Accumulo STD - 29 marzo 2012: carica dell'accumulo (1-2)

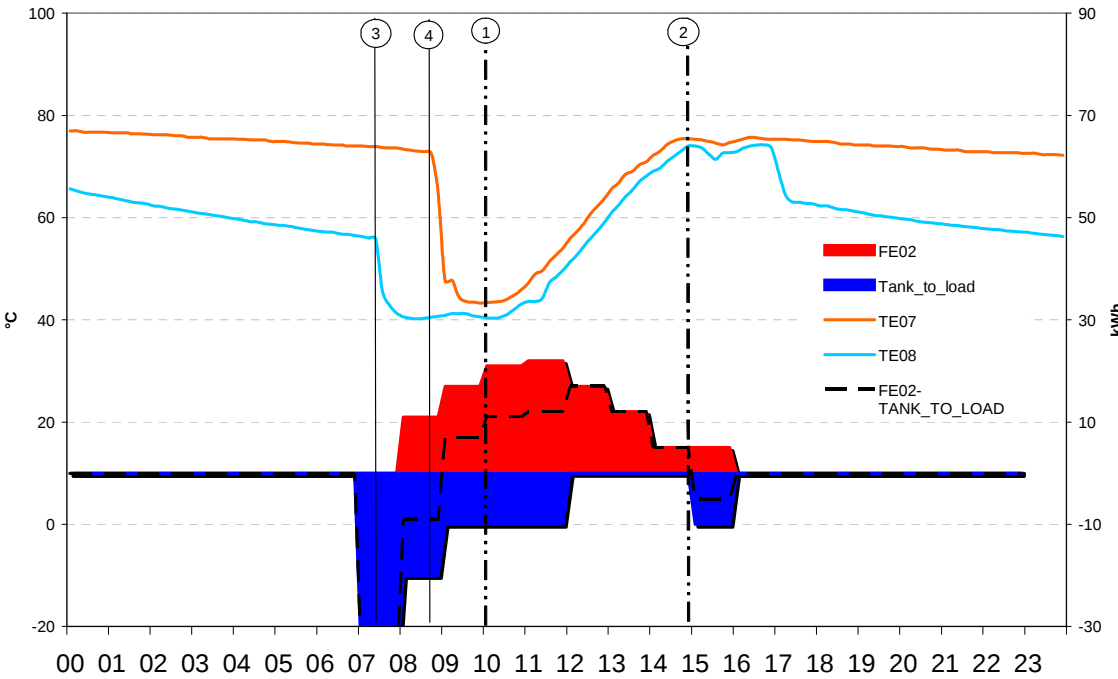


Figura 32 Accumulo STD - 2 aprile 2012: carica dell'accumulo (1-2)

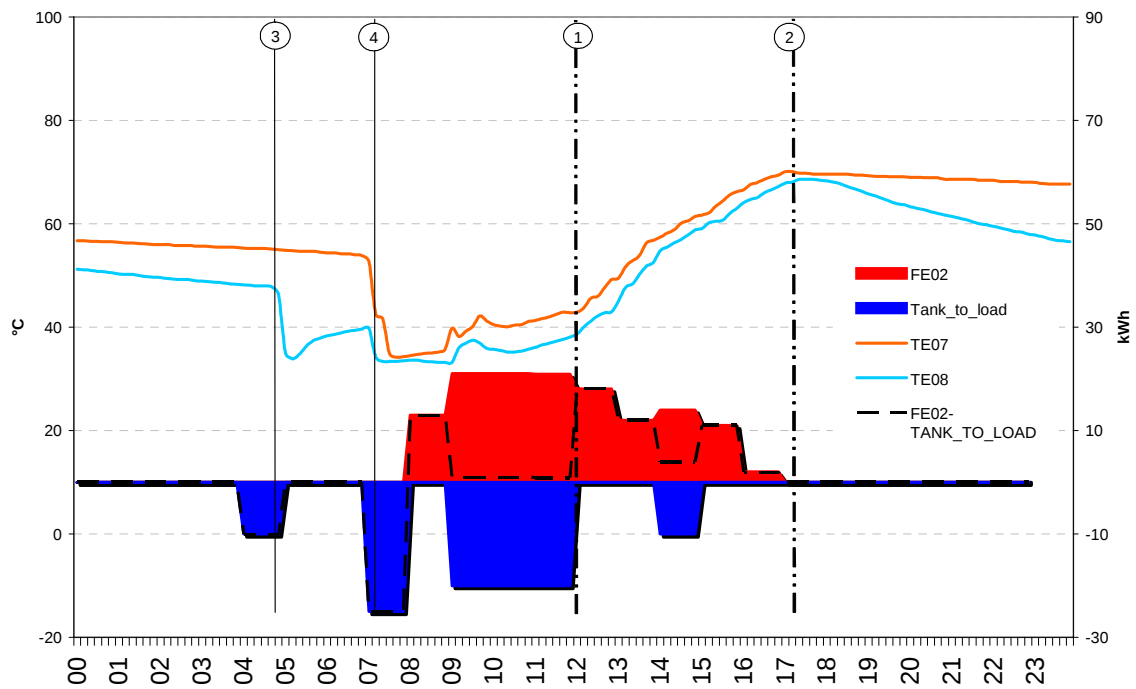


Figura 33 Accumulo STD - 12 aprile 2012: carica dell'accumulo (1-2)

Tabella 7 Fase di carica dell'accumulo durante la climatizzazione dell'edificio (anno 2013): confronto tra energia accumulata calcolata sulla base dei dati di temperatura e misurata con CONTATERMIE

			16/03/2013	21/03/2013	22/03/2013	13/04/2013	14/04/2013	15/04/2013		
FUNZIONAMENTO O GIORNALIERO	FE02		[kWh]	176.0	178.1	156	125.0	80	78.1	
			[MJ]	633.6	641.16	561.6	450.0	288	281.16	
	TANK_TO_LOAD		[kWh]	-156.0	-155	-125.7	-76.0	-71	-55	
			[MJ]	-561.6	-558	-452.52	-273.6	-255.6	-198	
	TANK - TOTALE		[kWh]	20.0	23.1	30.3	49.0	9	23.1	
			[MJ]	72.0	83.16	109.08	176.4	32.4	83.16	
FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO 2013	INIZIO	TIME	[h]	10.00	10.00	10.00	8.00	9.00	8.20	
		TE07	[°C]	39.0	39.8	40.9	36.8	44.8	38	
		TE08	[°C]	31.5	32.7	34.4	31.7	39.5	35.7	
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	36.2	37.1	38.4	34.9	42.8	37.1	
	FINE	TIME	[h]	15.30	15.30	16.30	18.00	13.20	15.30	
		TE07	[°C]	64.8	66.2	77.7	92.2	92.6	93.0	
		TE08	[°C]	58.7	59.9	70.8	85.4	86.0	86.5	
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	62.5	63.8	75.1	89.6	90.1	90.5	
	A - TANK - SENSIBILE CALCOLATO		[kWh]	20.5	20.8	28.6	42.7	36.9	41.7	
			[MJ]	74.0	75.0	102.9	153.8	132.9	150.0	
	ENERGIE	FE02		[kWh]	133.0	131.1	119.0	125.0	68.0	72.1
				[MJ]	478.8	472.0	428.4	450.0	244.8	259.6
		TANK_TO_LOAD		[kWh]	-96.0	-100	-80.0	-63.0	-20.0	-20.0
				[MJ]	-345.6	-360	-288.0	-226.8	-72.0	-72.0
		B - TANK - TOTALE MISURATO		[kWh]	37.0	31.1	39.0	62.0	48.0	52.1
				[MJ]	133.2	112.0	140.4	223.2	172.8	187.6
		B' - TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO		[kWh]	31.1	26.2	32.8	52.1	40.4	43.8
				[MJ]	112.0	94.1	118.1	187.7	145.3	157.7
	PCM [B-A]		[kWh]	16.5	10.3	10.4	19.3	11.1	10.4	
			[MJ]	59.2	37.0	37.5	69.4	39.9	37.5	
	PCM CORRETTO [B'-A]		[kWh]	10.6	5.3	4.2	9.4	3.5	2.1	
			[MJ]	38.0	19.1	15.1	33.9	12.4	7.7	
	PCM CORRETTO / TANK - TOT.MISURATO CORRETTO [(B'-A)/B']		[%]	34%	20%	13%	18%	9%	5%	

Nella Tabella 7 è riportato il confronto fatto per l'anno 2013 su sei giorni selezionati nell'intervallo dal 13 marzo al 15 aprile sull'impianto con accumulo PCM. Come già fatto per l'anno 2012 abbiamo valutato la fase di carica diurna dell'accumulo solare:

- ❑ **FUNZIONAMENTO GIORNALIERO:** è riportata l'energia fornita dal solare all'accumulo (FE02) e quella che l'accumulo ha fornito all'edificio (TANK_TO_LOAD) nell'arco delle 24 ore; per differenza viene calcolato il contributo netto all'accumulo.
- ❑ **FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO:** nell'arco della giornata è stato isolato l'intervallo (Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39 intervallo 1-2) in cui l'accumulo si carica per effetto dell'apporto solare con o senza contemporaneo prelievo di calore verso l'utenza. E' stato quindi calcolato il calore netto fornito all'accumulo mediante 1° principio della termodinamica⁷ utilizzando la temperatura media all'inizio e alla fine del processo (TANK – SENSIBILE). Il dato confrontato con il valore estrapolato (TANK – TOTALE) come somma algebrica tra l'energia FE02 e TANK_TO_LOAD risulta in questo caso avere uno scostamento non trascurabile e sempre positivo variabile dal 10,3 a 19,3 kWh. Tale scostamento è indicato alla voce PCM [B-A] ed è attribuibile al contributo latente/sensibile dei PCM. Tuttavia, il contributo così stimato va corretto per lo scostamento percentuale medio dovuto alle dispersioni termiche rilevato nelle misure dell'accumulo standard nel 2012 (vedi Tabella 6). Il risultato è evidenziato alla voce PCM [B'-A]: il contributo varia ora tra 2.1 e 10.6 kWh: sulla totale energia accumulata (fase di carica), la quota relativa ai PCM varia, per tutti i giorni considerati, tra 5% e 34% in funzione del calore accumulato e dello stato del materiale nei tubi all'inizio del processo di carica. Nello specifico si nota una progressiva riduzione del contributo dei PCM, a partire dal primo giorno di test (16/03/2013) con il valore massimo, fino all'ultimo giorno considerato con il valore minimo. La causa del comportamento si può ipotizzare essere legata alla mancata solidificazione dei PCM in fase di scarica dell'accumulo a causa delle temperature notturne elevate dello stesso.

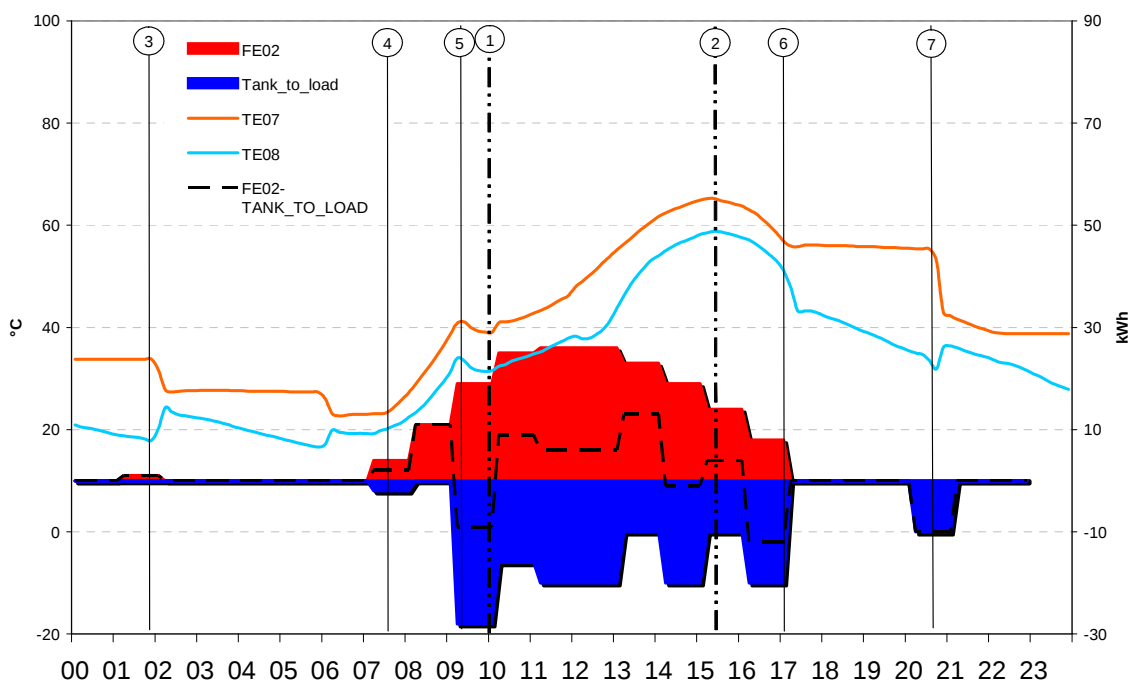


Figura 34 Accumulo PCM - 16 marzo 2013: carica dell'accumulo (1-2)

⁷ Al lordo di eventuali perdite per dissipazione attraverso l'involucro del serbatoio

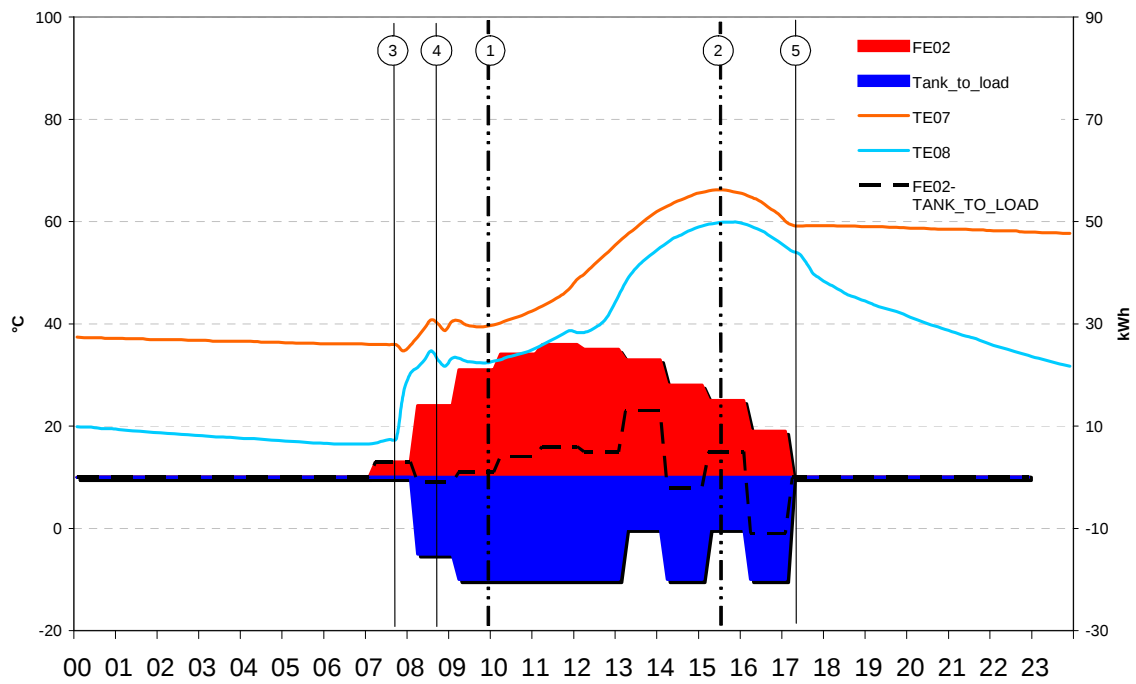


Figura 35 Accumulo PCM - 21 marzo 2013: carica dell'accumulo (1-2)

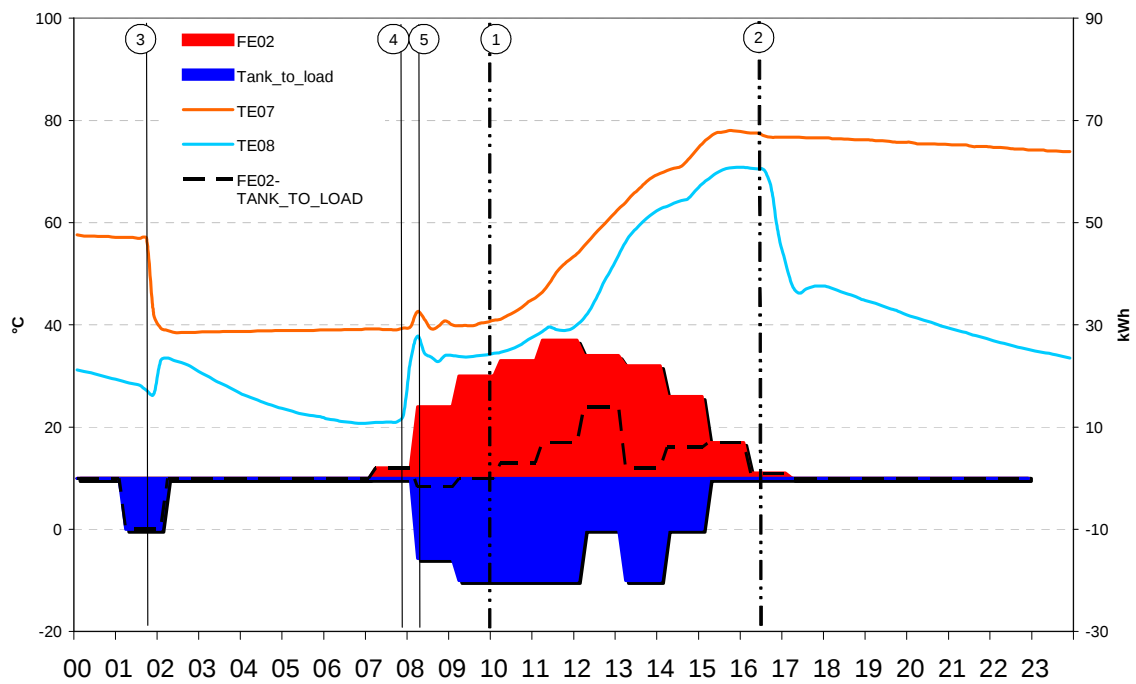


Figura 36 Accumulo PCM - 22 marzo 2013: carica dell'accumulo (1-2)

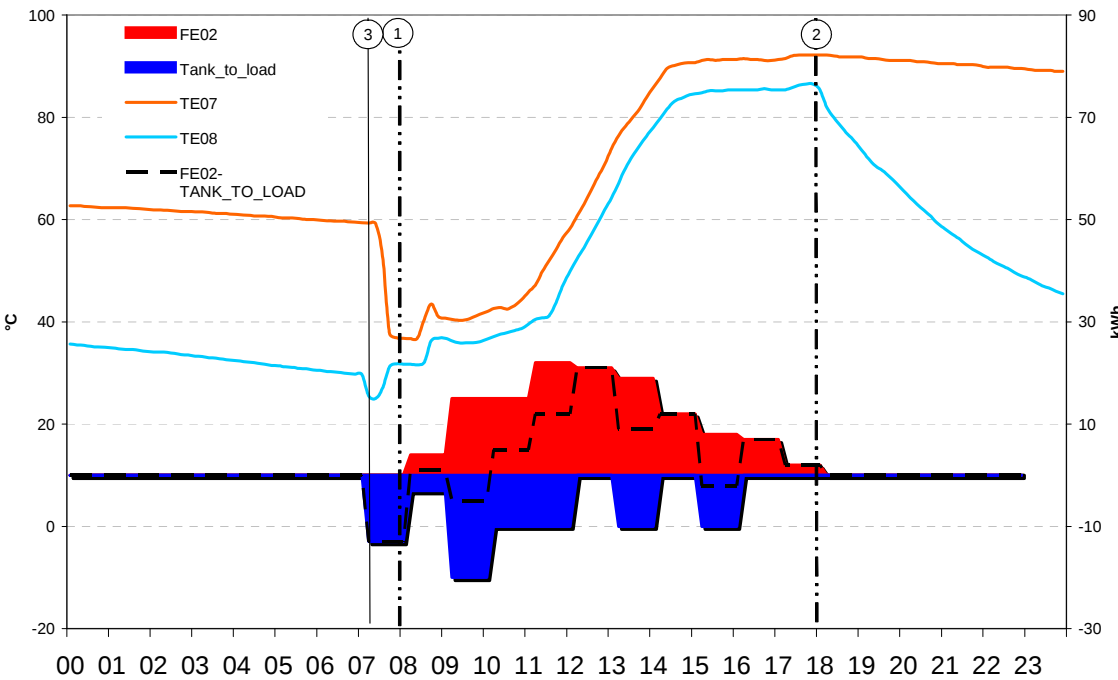


Figura 37 Accumulo PCM - 13 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2)

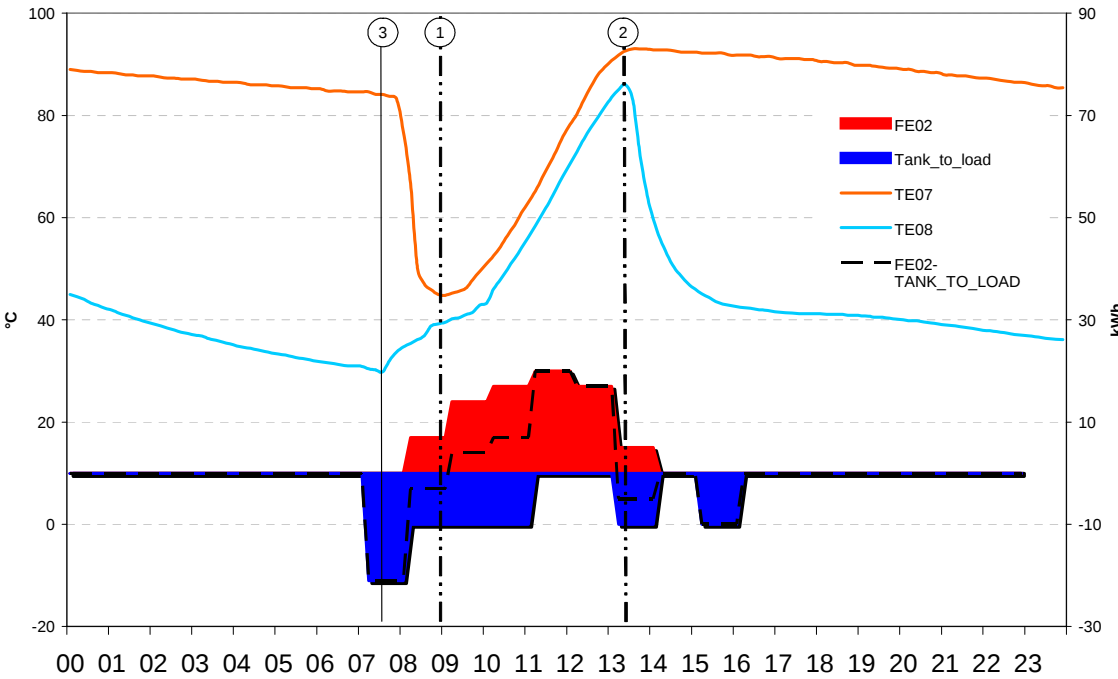


Figura 38 Accumulo PCM - 14 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2)

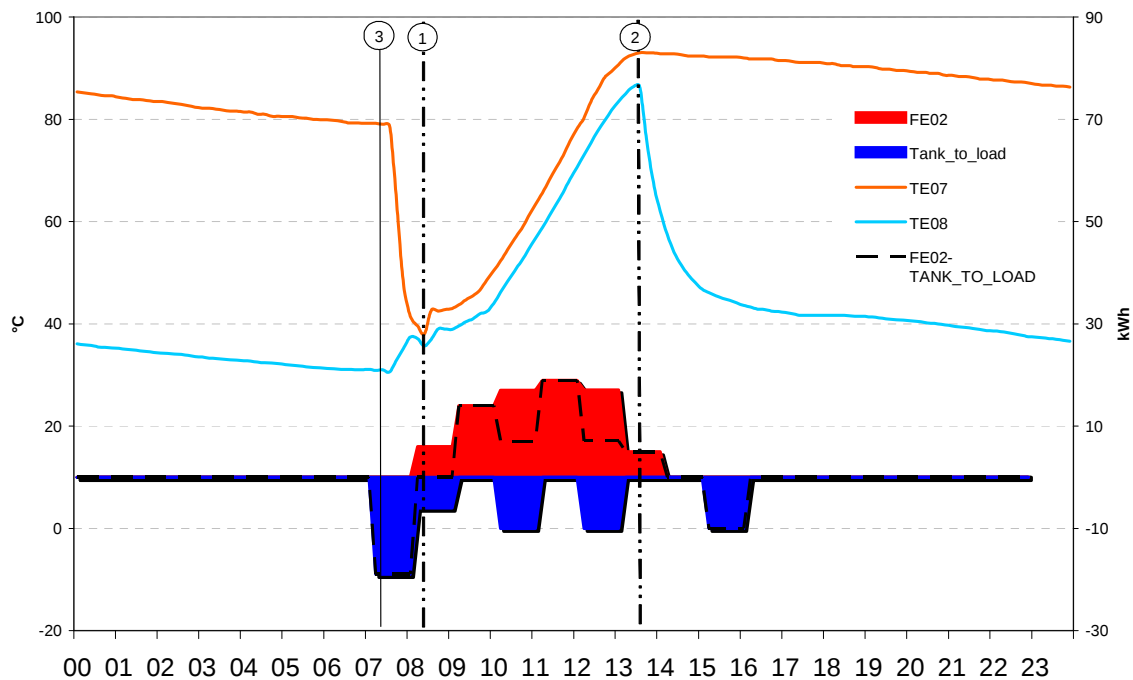


Figura 39 Accumulo PCM - 15 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2)

4 Processo di carica/scarica accumulo PCM

Di seguito vengono presentati i risultati relativi ai dati rilevati nel processo di carica diurna e scarica serale-notte (a partire dalle ore 18:00) dell'accumulo PCM, effettuato a partire dal 16 aprile fino al 5 maggio 2013.

Nei grafici vengono rappresentate le seguenti grandezze:

- ❑ TE07 – temperatura parte alta accumulo (valore medio nei 10 minuti)
- ❑ TE08 – temperatura parte bassa accumulo (valore medio nei 10 minuti)
- ❑ FE02 – apporto energia termica collettori solari all'accumulo (valore medio orario)
- ❑ TANK_TO_LOAD – contributo accumulo solare al fabbisogno edificio

In Figura 40 vengono prese in esame le misure effettuate il giorno 18 aprile 2013:

- ❑ L'accumulo alle ore 8:00 si trova ad una temperatura nella parte più calda inferiore a 40 °C. Siamo quindi al di sotto della temperatura di fusione caratteristica del PCM pari a 46 °C. Il PCM è parzialmente o totalmente in fase solida.
- ❑ Nella prima fase di carica diurna (0-1) l'accumulo riceve dalle ore 8:00 alle ore 12:40 energia pari a 57 kWh rappresentata dall'area rossa nella parte inferiore del grafico; tale energia porta la temperatura interna dell'accumulo da 38,7 °C a 93 °C nella parte superiore e da 31,4 °C a 86,5 °C nella parte inferiore. La pendenza simile tra i due profili di temperatura non evidenzia la presenza del PCM nella parte bassa dell'accumulo. Tuttavia, il calore sensibile fornito al volume interno effettivo d'acqua di 671 l è pari a 43 kWh. La differenza di energia tra 43 kWh e 57 kWh (14 kWh) è imputabile all'effetto di carica dei PCM.
- ❑ Nelle successive 4 ore e 40 minuti (1-2) non vi sono flussi di calore in ingresso o uscita dall'accumulo e la temperatura della parte alta rimane pressoché inalterata fino alle ore 17:20, abbassandosi leggermente a 90,9 °C.
- ❑ Nello stesso intervallo di tempo la temperatura della parte inferiore dell'accumulo varia invece vistosamente portandosi alle ore 17:20 al valore di 61,9 °C (1° FASE DI SCARICA DELL'ACCUMULO); questo effetto può essere ricondotto all'assorbimento di calore latente/sensibile (surriscaldamento

di parte del PCM fuso) dei tubi PCM. Il profilo non è ben definito e si notano dei punti in cui la temperatura tende a rimanere costante per poi ridiscendere: possiamo quindi ipotizzare che vi sia l'effetto di fusione del PCM nella parte inferiore del tubo unito alla successiva migrazione del materiale fuso verso la parte superiore. Tale processo induce uno scambio discontinuo e quindi un profilo irregolare.

Inoltre, se andiamo a considerare il volume d'acqua presente tra il fasciame dei tubi (separato tra l'altro dalla parte superiore dell'accumulo da una piastra per la tenuta in posizione dei tubi) troviamo che esso è pari a 254 l. Ipotizzando che l'energia scambiata tra acqua e tubi sia relativa alla metà inferiore dei tubi (127 l) otteniamo un'energia assorbita pari a circa 13 MJ (3,6 kWh, che sommati ai precedenti 14 kWh uguagliano la capacità latente totale dei PCM⁸).

- Tra le 17:20 e le 18:00 (2-3) abbiamo un ulteriore apporto di calore solare per 1 kWh che si traduce in un innalzamento della temperatura inferiore dell'accumulo da 61,9 °C a 81,4 °C per effetto del mescolamento dell'acqua del livello inferiore con quella proveniente dal livello più alto dell'accumulo. In questo caso si nota come una limitata quantità di energia prelevata (circa 40 l) porta la temperatura dell'acqua nella parte inferiore dell'accumulo ad aumentare in maniera vistosa giustificando un elevato gradiente di temperatura tra l'acqua a contatto con i tubi PCM.
- Tra le 18:00 e le 19:00 (3-4) vengono prelevati dall'accumulo 20 kWh di energia termica (vedi area blue) che si traducono in un abbassamento brusco della temperatura inferiore dell'accumulo da 81,4 °C a 44,5 °C. Nello stesso arco di tempo, però, si nota anche un aumento momentaneo della temperatura (fino a 47,7 °C) probabilmente dovuto al rimescolamento tra acqua immessa e acqua dell'accumulo. Se consideriamo la temperatura di ritorno dal termodotto intorno ai 45 °C⁹ possiamo stimare un prelievo d'acqua di circa 400 l pari al volume d'acqua sopra i PCM.
- Tra le 19:00 e le 22:30 (4-5) l'accumulo rimane ben stratificato fino ad un ulteriore prelievo di energia di 10 kWh tra le 21:00 e le 22:00: se consideriamo la temperatura di ritorno dal termodotto verso l'accumulo di 45°C otteniamo un prelievo d'acqua dall'accumulo di circa 200 l; tale quantità d'acqua, unita a quella già prelevata prima delle 19:00, è pari a circa il 90% del volume d'acqua dell'accumulo ((200+400)/671).
- Infatti, circa mezz'ora dopo, tra le 22:30 e le 01:20 (5-6) si assiste ad una progressiva riduzione di temperatura (2° FASE DI SCARICA DELL'ACCUMULO) per effetto:
 - del rimescolamento interno fino ad una temperatura prossima a quella della parte bassa dell'accumulo passando da 83,7 °C a 45,3 °C. Tale riduzione è marginalmente legata alla presenza nell'accumulo dei PCM;
 - del prelievo tra 24:00 e le 1:00 di acqua per 10 kWh che, sommati ai precedenti prelievi, portano a completo esaurimento del volume d'acqua calda.
- Tra le 01:20 e le 4:00 (6-7) l'accumulo non è più stratificato e la temperatura è inferiore ai 45 °C: si osserva una progressiva riduzione temperatura. Tra le 4:00 e le 8:00 la temperatura della parte alta dell'accumulo è di 38,9 °C e tende leggermente a salire con un effetto di scarica dei tubi PCM mentre la temperatura della parte bassa continua a scendere anche per il prelievo di 6 kWh di energia da parte dell'utenza.

I dati delle energie misurati/calcolati sopra riportati vanno quindi corretti, per tenere conto degli scostamenti rilevati durante la campagna di misure del 2012 dovuti alle dispersioni termiche, come presentato nelle successive Tabella 8 e Tabella 9.

⁸ Possiamo ipotizzare che i PCM siano solidi o quasi completamente solidi all'inizio del processo essendo l'acqua nell'accumulo nella parte più alta rimasta ad una temperatura inferiore ai 40 °C per 6-7 ore e con un prelievo di 12 kWh

⁹ Le temperature di mandata e di ritorno termodotto rilevate dalle sonde di temperatura TE19 e TE20 sono molto simili e con valore costante intorno ai 45-46 °C

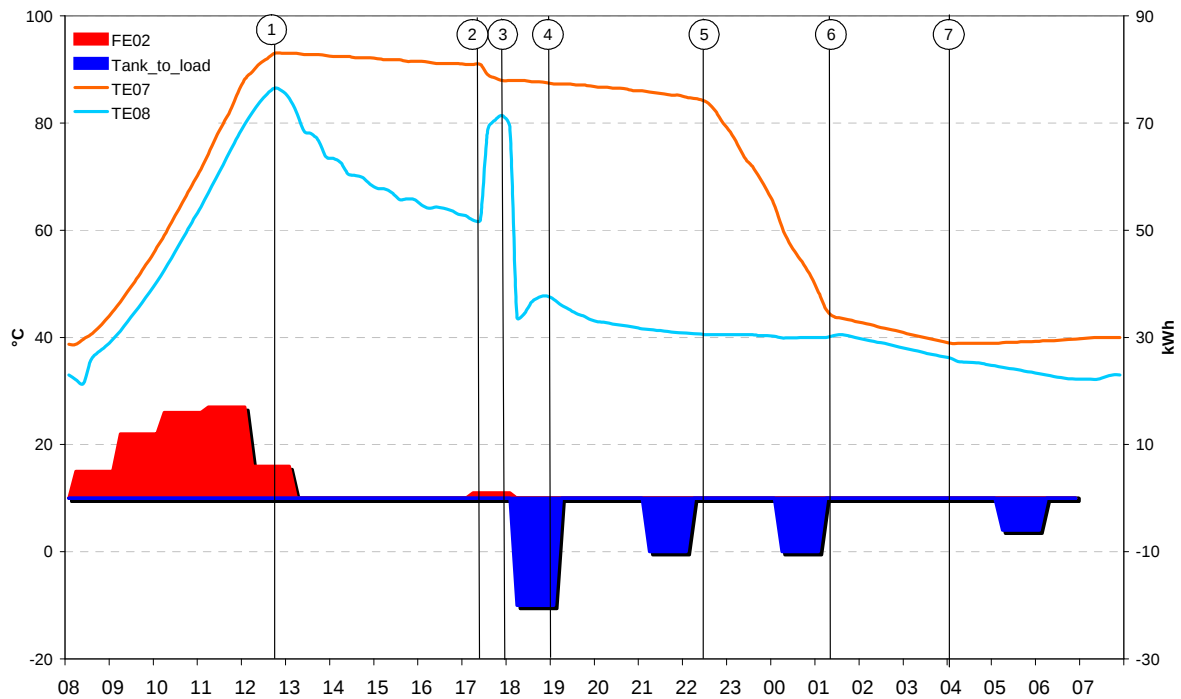


Figura 40 Carica-scarica accumulo 18 aprile 2013

Il comportamento osservato il giorno successivo 19 aprile (Figura 41) è sostanzialmente simile a quanto già osservato il 18 aprile a parte per il contributo dei collettori solari tra le 17:00 e le 18:00.

Il confronto tra i profili di temperatura di tre giorni consecutivi dal 29 aprile al 1 maggio, riportato in Figura 42, mette in risalto come le temperature rilevate nell'accumulo sono tra loro simili a prescindere dai differenti prelievi di calore indicati nella parte bassa del grafico.

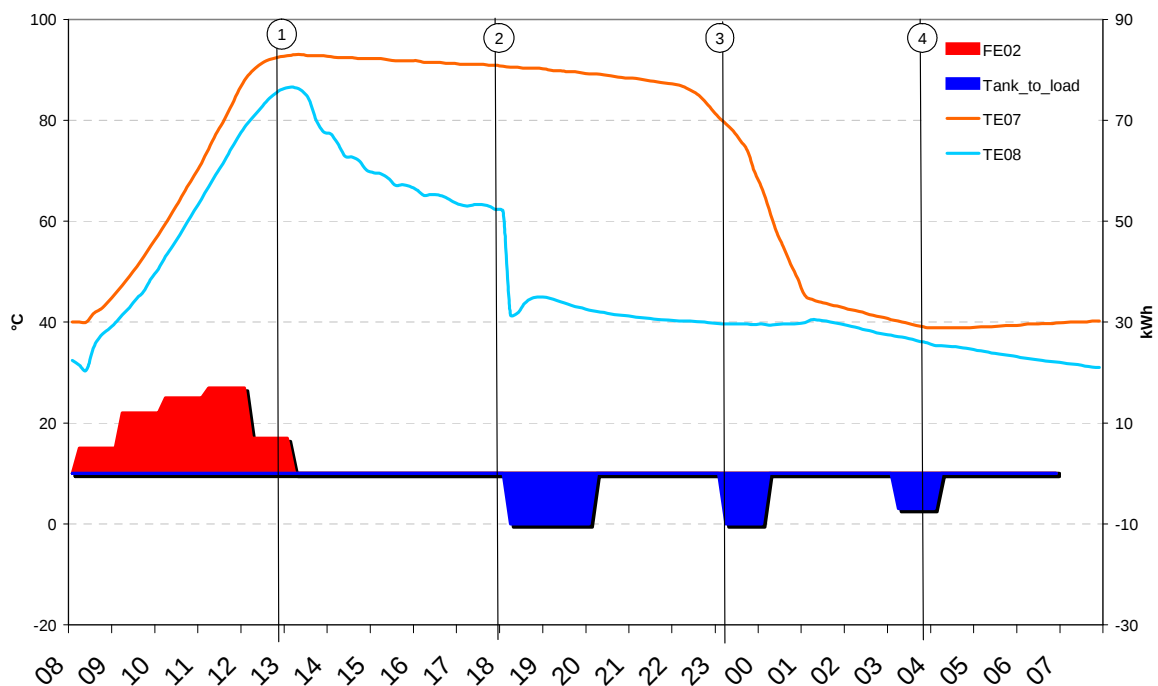


Figura 41 Carica-scarica accumulo 19 aprile 2013

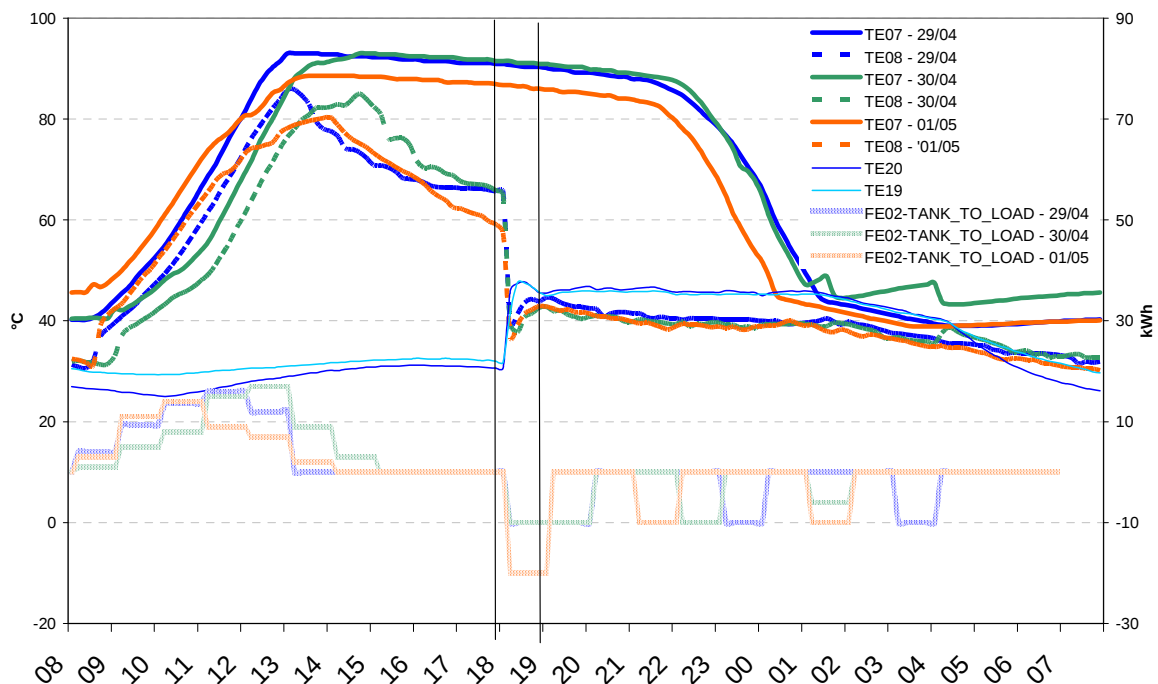


Figura 42 Carica-scarica accumulo su tre giorni consecutivi 29, 30 aprile e 1 maggio 2013

Nella Tabella 8 vengono presentati i dati della campagna di misura sull'impianto con accumulo PCM riassunti ed elaborati per sei giorni selezionati nell'intervallo dal 16 aprile al 5 maggio 2013 (vedi Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48).

Distinguiamo tre fasi principali:

- FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO: nell'arco della giornata è stato isolato l'intervallo (intervallo 1-2) in cui l'accumulo si carica per effetto dell'apporto solare senza che vi siano prelievi di calore verso l'utenza (vedi orario di inizio fine e temperature relative misurate). L'energia fornita all'accumulo (FE02) risulta quindi coincidere con l'energia accumulata (TANK – TOTALE MISURATO). Il calore accumulato è stato inoltre calcolato mediante 1° principio della termodinamica¹⁰ utilizzando la temperatura media all'inizio e alla fine del processo (TANK – SENSIBILE CALCOLATO). La differenza tra i due valori citati risulta essere positiva e variabile tra 13,8 e 17,9 kWh. Tale scostamento è indicato alla voce 0 - PCM ed è attribuibile al contributo latente/sensibile dei PCM nell'arco delle 4-5 ore della fase di carica.
- 1° FASE DI SCARICA DELL'ACCUMULO: la fase successiva (intervallo 2-3) non prevede l'utilizzo del calore da parte dell'utenza e si può osservare che:
 - o -la temperatura nella parte alta dell'accumulo TE07 rimane abbastanza costante nell'intervallo considerato con un andamento lineare leggermente decrescente;
 - o -la temperatura nella parte bassa dell'accumulo TE08 decresce invece in maniera molto maggiore rispetto a quanto già osservato per l'accumulo senza PCM dovuto al processo di stratificazione interna.

In questo caso è fatta l'ipotesi¹¹ che la temperatura rilevata TE08 sia, in prima approssimazione e come già detto, relativa a circa metà volume d'acqua tra i PCM (127 l su 254 l): da un lato la presenza della piastra, necessaria a tenere in sede i tubi, separa internamente l'accumulo in due volumi e ne favorisce la stratificazione, dall'altro il PCM in posizione verticale tenderà a portare il materiale fuso nella parte alta del tubo lasciando nella parte inferiore il materiale solido (vedi

¹⁰ Vengono trascurate le perdite di calore per dissipazione attraverso il contenitore

¹¹ L'ipotesi utilizzata al fine di stimare il contributo dei tubi PCM in questa fase specifica non condiziona il contributo totale stimato dei PCM nel processo di carica-scarica diurno (PCM TOTALE)

andamento non lineare del profilo di temperatura). Tale fatto porta ad accentuare la stratificazione tra i tubi dal basso verso l'alto.

I PCM attraversano quindi un'ulteriore fase di carica variabile tra 3,2 e 4,0 kWh mediamente nell'arco di circa 5 ore.

- ❑ 2° FASE DI SCARICA DELL'ACCUMULO: dopo le 18:00 l'accumulo viene scaricato imponendo una richiesta di calore verso l'utenza (intervallo 3-4). La potenza termica richiesta fa variare l'intervallo di scarica dell'accumulo da un minimo di 2 ore a un massimo di 7 ore e mezza. In questa fase per quattro giorni su sei considerati abbiamo un leggero aumento di calore accumulato dai PCM. Viceversa, per i due giorni in cui si osserva una riduzione della temperatura nell'arco di 2 ore, i PCM si trovano a dover cedere calore. E' chiaro che il processo di scarica/carica è in questo caso funzione del livello di "carica" dei tubi PCM.
- ❑ PCM TOTALE: il totale calore accumulato dai tubi PCM viene calcolato come differenza tra energia netta accumulata TANK TOTALE MISURATO (FE02 + TANK_TO_LOAD) ed energia netta accumulata calcolata come incremento di temperatura dell'accumulo tra l'inizio e la fine dell'intervallo considerato. Risulta un accumulo variabile tra 15,6 e 24,7 kWh.

Durante la fase di carica e di scarica è verosimile che sia presente un errore di stima dei flussi di calore FE02 e TANK_TO_LOAD come già visto per le misure realizzate durante il funzionamento dell'impianto in climatizzazione invernale. In Tabella 8 viene quindi corretto A - TANK TOTALE - MISURATO come fatto in precedenza (togliendo cioè l'errore di sovrastima medio pari a circa 16%) per ottenere A' - TANK TOTALE MISURATO CORRETTO.

Il contributo in fase di carica dell'accumulo è stato allora stimato come segue:

$$PCM \% = \frac{0 - PCM \times \frac{PCM_TOTALE_CORRETTO}{PCM_TOTALE}}{TANK_TOTALE_MISURATO}$$

In alternativa alla stima sopra riportata è stato corretto direttamente il valore di FE02 in fase di carica dell'accumulo (quindi senza considerare il prelievo di calore non contemporaneo): il risultato in Tabella 9 vede un peggioramento del contributo dei PCM che varia ora tra l'11% e il 17%.

Tabella 8 Fase di carica e scarica diurna dell'accumulo: stima del contributo del PCM e correzione del TANK
TOTALE - MISURATO

				19/04/2013	24/04/2013	28/04/2013	29/04/2013	03/05/2013	04/05/2013
FASE DI CARICA ACCUMULO	INIZIO	ORA	[h]	8.20	9.00	8.00	8.30	8.00	8.00
		TE07	[°C]	40	38.3	36.2	40.6	39.9	40.8
		TE08	[°C]	30.5	25.8	24	32.1	29.7	31.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	36.4	33.6	31.6	37.4	36.0	37.4
	FINE	ORA	[h]	13.00	13.20	13.30	13.00	12.50	12.50
		TE07	[°C]	92.8	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0
		TE08	[°C]	86.5	85.4	85.8	85.8	83.9	84.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	90.4	90.1	90.3	90.3	89.6	89.9
	TOTALE	FE02	[kWh]	60.0	61.7	62.0	55.0	56.0	55.1
			[MJ]	216.0	222.0	223.2	198.0	201.6	198.4
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	60.0	61.7	62.0	55.0	56.0	55.1
			[MJ]	216.0	222.0	223.2	198.0	201.6	198.4
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	42.1	44.1	45.8	41.2	41.7	40.9	
		[MJ]	151.6	158.7	164.7	148.5	150.2	147.4	
0 - PCM	[kWh]	17.9	17.6	16.2	13.8	14.3	14.2		
	[MJ]	64.4	63.3	58.5	49.5	51.4	51.0		
1° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	ORA	[h]	13.00	13.20	13.30	13.00	12.50	12.50
		TE07	[°C]	92.8	93	93	93	93	93
		TE08	[°C]	86.5	85.4	85.8	85.8	83.9	84.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	90.4	90.1	90.3	90.3	89.6	89.9
	FINE	ORA	[h]	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
		TE07	[°C]	90.7	90.9	91.1	90.9	90.5	90.5
		TE08	[°C]	61.9	62.3	63.6	65.7	61.1	62.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	85.3	85.6	86.0	86.2	85.0	85.3
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	-4.0	-3.6	-3.4	-3.2	-3.5	-3.6	
		[MJ]	-14.3	-12.8	-12.1	-11.4	-12.7	-12.8	
	1 - PCM	[kWh]	4.0	3.6	3.4	3.2	3.5	3.6	
		[MJ]	14.3	12.8	12.1	11.4	12.7	12.8	
2° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	TIME	[h]	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
		TE07	[°C]	90.7	90.9	91.1	90.9	90.5	90.5
		TE08	[°C]	61.9	62.3	63.6	65.7	61.1	62.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	85.3	85.6	86.0	86.2	85.0	85.3
	FINE	TIME	[h]	1.00	20.00	20.00	1.30	1.30	1.20
		TE07	[°C]	45.3	42.4	39.8	43.8	45.3	44.2
		TE08	[°C]	39.9	39.5	37.4	40.5	39.5	39.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	43.3	41.3	38.9	42.6	43.1	42.5
	TOTALE	TANK_TO_LOAD	[kWh]	-30.0	-40.0	-40.0	-30.0	-30.0	-30.0
			[MJ]	-108.0	-144.0	-144.0	-108.0	-108.0	-108.0
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	-30.0	-40.0	-40.0	-30.0	-30.0	-30.0
			[MJ]	-108.0	-144.0	-144.0	-108.0	-108.0	-108.0
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	-32.8	-34.5	-36.7	-34.0	-32.7	-33.4	
		[MJ]	-118.1	-124.2	-132.1	-122.5	-117.6	-120.2	
	2 - PCM	[kWh]	2.8	-5.5	-3.3	4.0	2.7	3.4	
		[MJ]	10.1	-19.8	-11.9	14.5	9.6	12.2	
	A - TANK - TOTALE MISURATO			[kWh]	30.0	21.7	22.0	25.0	25.1
				[MJ]	108.0	78.0	79.2	90.0	90.4
A' - TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO			[kWh]	25.2	18.2	18.5	21.0	21.1	
			[MJ]	90.8	65.6	66.6	75.7	76.0	
B - TANK - TOTALE CALCOLATO			[kWh]	5.3	6.0	5.7	4.0	4.0	
			[MJ]	19.2	21.7	20.5	14.5	14.3	
PCM TOTALE [0+1+2] [A-B]			[kWh]	24.7	15.6	16.3	21.0	20.5	21.1
			[MJ]	88.8	56.3	58.7	75.5	73.8	76.0
PCM TOTALE CORRETTO[A'-B]			[kWh]	19.9	12.2	12.8	17.0	16.4	17.1
			[MJ]	71.6	43.9	46.1	61.2	58.9	61.7
0-PCM / TANK TOTALE MISURATO CORRETTO (FASE DI CARICA)			[%]	24%	22%	21%	20%	20%	21%

Tabella 9 Fase di carica e scarica diurna dell'accumulo: stima del contributo del PCM e correzione del FE02 e del TANK TO_LOAD

			19/04/2013	24/04/2013	28/04/2013	29/04/2013	03/05/2013	04/05/2013	
FASE DI CARICA ACCUMULO	INIZIO	ORA	[h]	8.20	9.00	8.00	8.30	8.00	8.00
		TE07	[°C]	40	38.3	36.2	40.6	39.9	40.8
		TE08	[°C]	30.5	25.8	24	32.1	29.7	31.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	36.4	33.6	31.6	37.4	36.0	37.4
	FINE	ORA	[h]	13.00	13.20	13.30	13.00	12.50	12.50
		TE07	[°C]	92.8	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0
		TE08	[°C]	86.5	85.4	85.8	85.8	83.9	84.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	90.4	90.1	90.3	90.3	89.6	89.9
	TOTALE	FE02	[kWh]	60.0	61.7	62.0	55.0	56.0	55.1
			[MJ]	216.0	222.0	223.2	198.0	201.6	198.4
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	60.0	61.7	62.0	55.0	56.0	55.1
			[MJ]	216.0	222.0	223.2	198.0	201.6	198.4
	TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO	[kWh]	50.5	51.9	52.1	46.2	47.1	46.3	
		[MJ]	181.6	186.7	187.7	166.5	169.5	166.8	
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	42.1	44.1	45.8	41.2	41.7	40.9	
[MJ]		151.6	158.7	164.7	148.5	150.2	147.4		
0 - PCM CORRETTO	[kWh]	8.3	7.8	6.4	5.0	5.4	5.4		
	[MJ]	30.0	27.9	22.9	18.0	19.3	19.4		
1° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	ORA	[h]	13.00	13.20	13.30	13.00	12.50	12.50
		TE07	[°C]	92.8	93	93	93	93	93
		TE08	[°C]	86.5	85.4	85.8	85.8	83.9	84.8
		TE07/08 MEDIA	[°C]	90.4	90.1	90.3	90.3	89.6	89.9
	FINE	ORA	[h]	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
		TE07	[°C]	90.7	90.9	91.1	90.9	90.5	90.5
		TE08	[°C]	61.9	62.3	63.6	65.7	61.1	62.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	85.3	85.6	86.0	86.2	85.0	85.3
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	-4.0	-3.6	-3.4	-3.2	-3.5	-3.6	
		[MJ]	-14.3	-12.8	-12.1	-11.4	-12.7	-12.8	
		1 - PCM	[kWh]	4.0	3.6	3.4	3.2	3.5	3.6
			[MJ]	14.3	12.8	12.1	11.4	12.7	12.8
2° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	TIME	[h]	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
		TE07	[°C]	90.7	90.9	91.1	90.9	90.5	90.5
		TE08	[°C]	61.9	62.3	63.6	65.7	61.1	62.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	85.3	85.6	86.0	86.2	85.0	85.3
	FINE	TIME	[h]	1.00	20.00	20.00	1.30	1.30	1.20
		TE07	[°C]	45.3	42.4	39.8	43.8	45.3	44.2
		TE08	[°C]	39.9	39.5	37.4	40.5	39.5	39.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	43.3	41.3	38.9	42.6	43.1	42.5
	TOTALE	TANK_TO_LOAD	[kWh]	-30.0	-40.0	-40.0	-30.0	-30.0	-30.0
			[MJ]	-108.0	-144.0	-144.0	-108.0	-108.0	-108.0
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	-30.0	-40.0	-40.0	-30.0	-30.0	-30.0
			[MJ]	-108.0	-144.0	-144.0	-108.0	-108.0	-108.0
	TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO	[kWh]	-34.8	-46.4	-46.4	-34.8	-34.8	-34.8	
		[MJ]	-125.2	-166.9	-166.9	-125.2	-125.2	-125.2	
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	-32.8	-34.5	-36.7	-34.0	-32.7	-33.4	
		[MJ]	-118.1	-124.2	-132.1	-122.5	-117.6	-120.2	
2 - PCM	[kWh]	-2.0	-11.9	-9.7	-0.7	-2.1	-1.4		
	[MJ]	-7.1	-42.7	-34.8	-2.7	-7.5	-5.0		
A - TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO			[kWh]	15.7	5.5	5.8	11.5	12.3	11.6
			[MJ]	56.5	19.8	20.8	41.3	44.3	41.6
B - TANK - TOTALE CALCOLATO			[kWh]	5.3	6.0	5.7	4.0	5.5	4.0
			[MJ]	19.2	21.7	20.5	14.5	19.8	14.3
PCM TOTALE [0+1+2] [A-B]			[kWh]	10.3	-0.5	0.1	7.4	6.8	7.6
			[MJ]	37.2	-1.9	0.3	26.8	24.5	27.3
0-PCM / TANK TOTALE MISURATO CORRETTO (FASE DI CARICA)			[%]	17%	15%	12%	11%	11%	12%

In Tabella 10 viene analizzato la scarica notturna dell'accumulo come già fatto nella tabella precedente.

Si nota come per quasi tutti i giorni considerati in cui vi è una richiesta di calore notturna (tutti tranne il 3 maggio) abbiamo anche una contemporanea cessione di calore da parte dei PCM variabile da un minimo di 2 kWh ad un massimo di 18,6 kWh. Tale effetto è favorito dalla bassa temperatura dell'acqua dell'accumulo e dal miglior scambio termico indotto dalla circolazione forzata d'acqua, ma soprattutto dall'intervallo temporale più lungo disponibile (circa 5 ore in più).

Tabella 10 Fase di scarica notturna dell'accumulo: stima del contributo del PCM

				19/04/2013	24/04/2013	28/04/2013	29/04/2013	03/05/2013	04/05/2013
3° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	TIME	[h]	1.00	20.00	20.00	1.50	1.50	1.20
		TE07	[°C]	45.3	42.4	39.8	43.8	45.3	44.2
		TE08	[°C]	39.9	39.5	37.4	40.5	39.5	39.7
		TE07/08 MEDIA	[°C]	43.3	41.3	38.9	42.5	43.1	42.5
	FINE	TIME	[h]	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
		TE07	[°C]	39.9	40.1	40.1	40.0	40.5	39.8
		TE08	[°C]	31.9	28.3	32.3	33.0	31.9	32.0
		TE07/08 MEDIA	[°C]	36.9	35.6	37.1	37.3	37.2	36.8
	TANKE	TANK_TO_LOAD	[kWh]	-7.0	-15.0	-20.0	-10.0	0.0	-10.0
			[MJ]	-25.2	-54.0	-72.0	-36.0	0.0	-36.0
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	-7.0	-15.0	-20.0	-10.0	0.0	-10.0
			[MJ]	-25.2	-54.0	-72.0	-36.0	0.0	-36.0
	TANK - SENSIBILE CALCOLATA	[kWh]	-5.0	-4.4	-1.4	-4.1	-4.6	-4.6	-4.4
		[MJ]	-17.9	-15.9	-4.9	-14.6	-16.5	-16.5	-15.9
	3 - PCM	[kWh]	-2.0	-10.6	-18.6	-5.9	4.6	-5.6	-5.6
		[MJ]	-7.3	-38.1	-67.1	-21.4	16.5	-20.1	-20.1

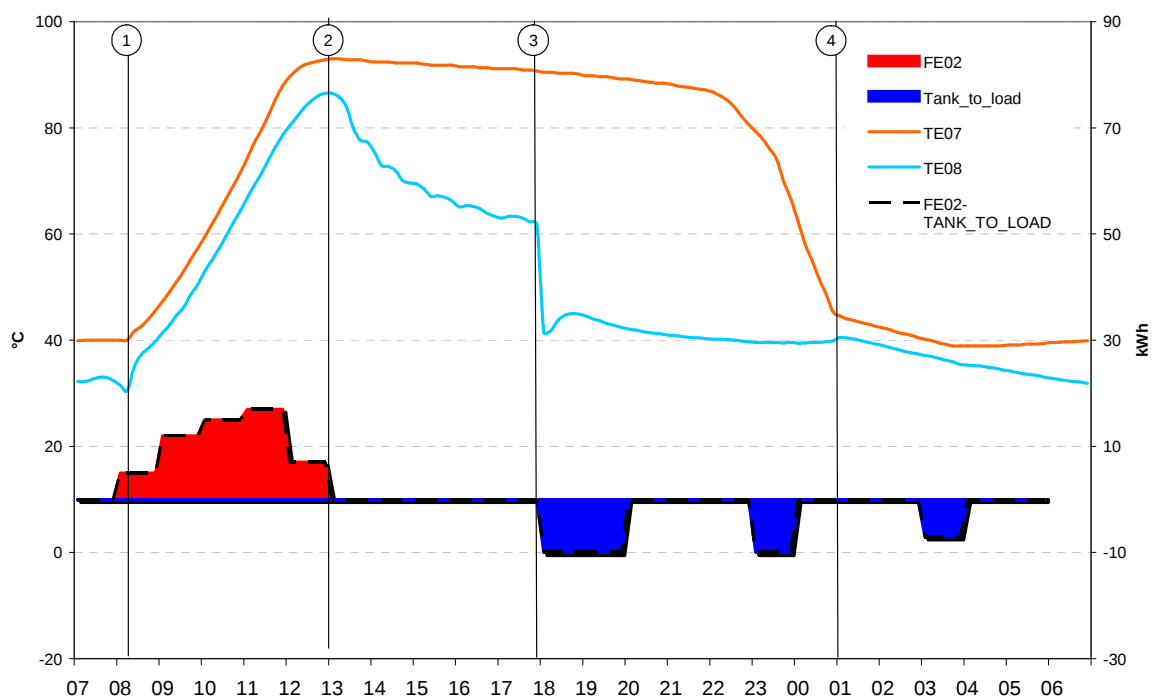


Figura 43 Accumulo PCM - 19 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2); 1° scarica accumulo (2-3); 2° scarica accumulo (3-4)

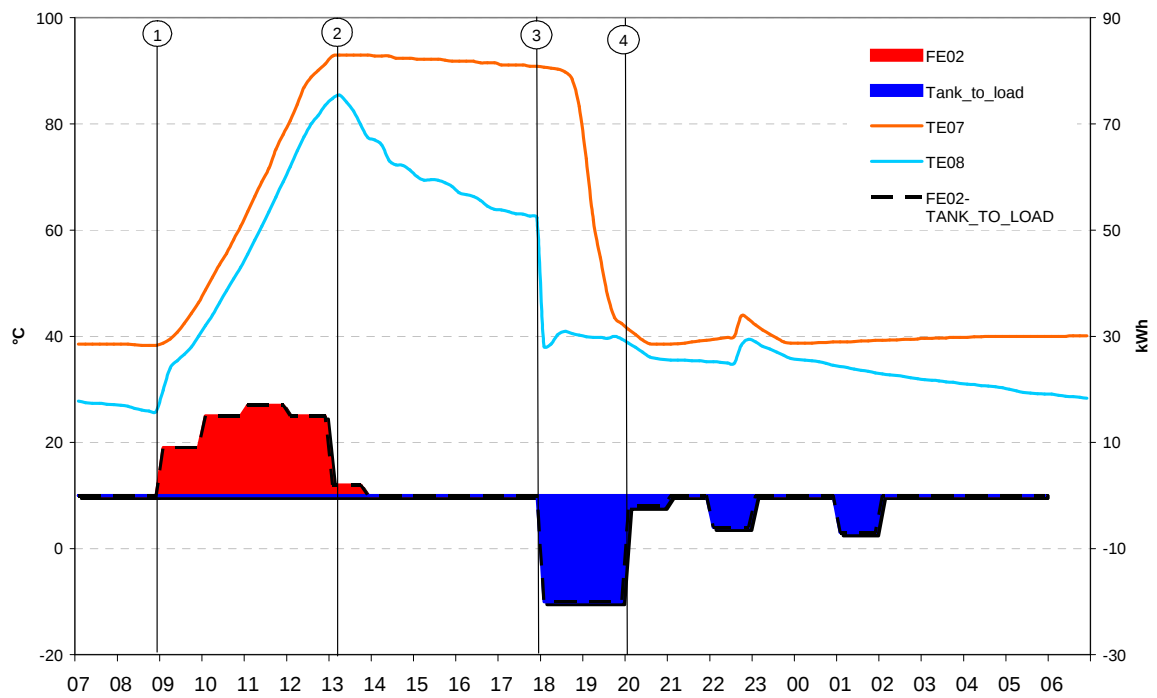


Figura 44 Accumulo PCM - 24 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2); 1° scarica accumulo (2-3); 2° scarica accumulo (3-4)

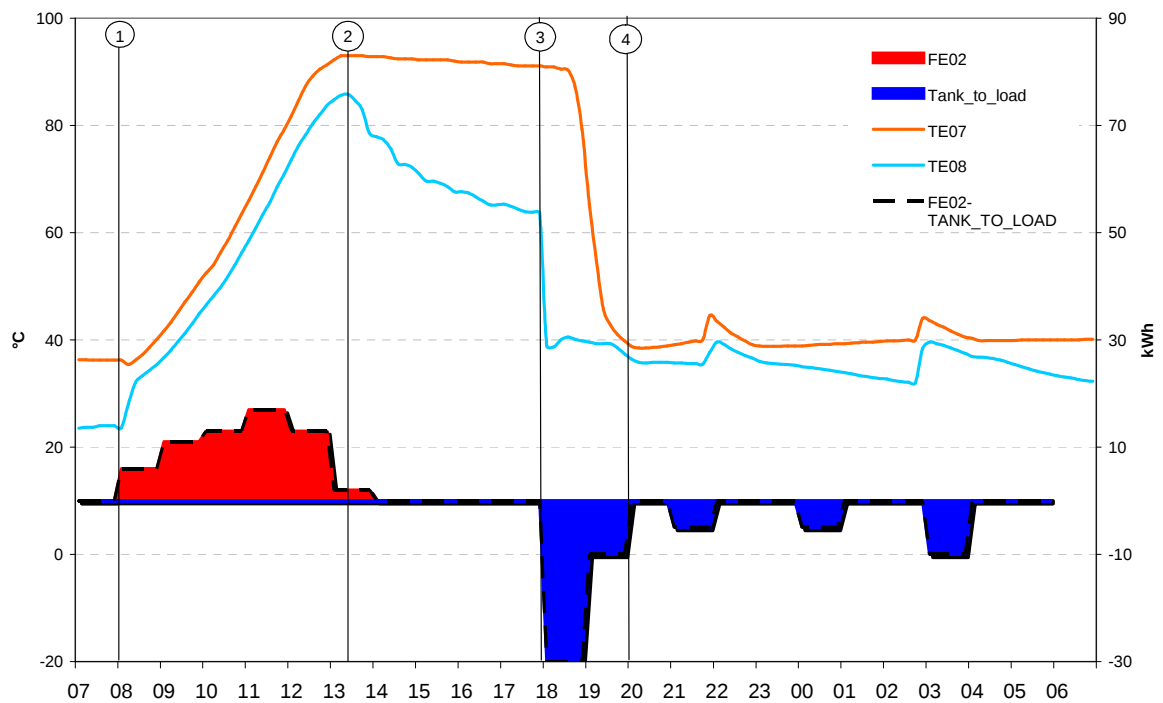


Figura 45 Accumulo PCM - 28 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2); 1° scarica accumulo (2-3); 2° scarica accumulo (3-4)

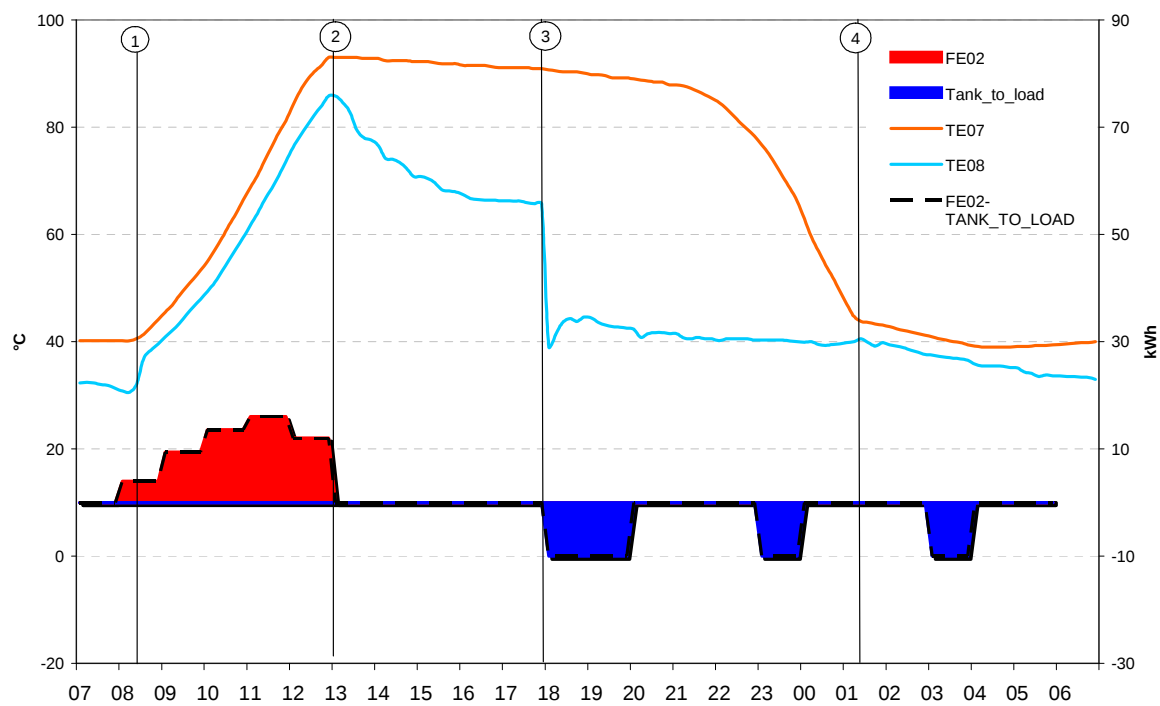


Figura 46 Accumulo PCM - 29 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2); 1° scarica accumulo (2-3); 2° scarica accumulo (3-4)

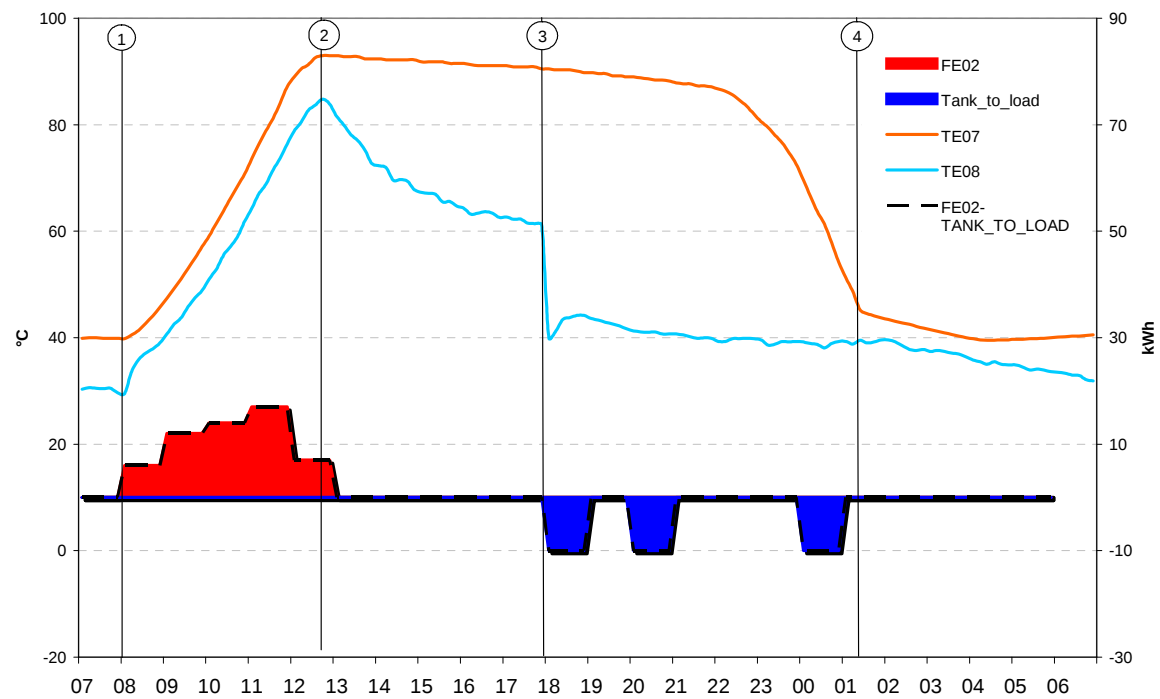


Figura 47 Accumulo PCM - 3 maggio 2013: carica dell'accumulo (1-2); 1° scarica accumulo (2-3); 2° scarica accumulo (3-4)

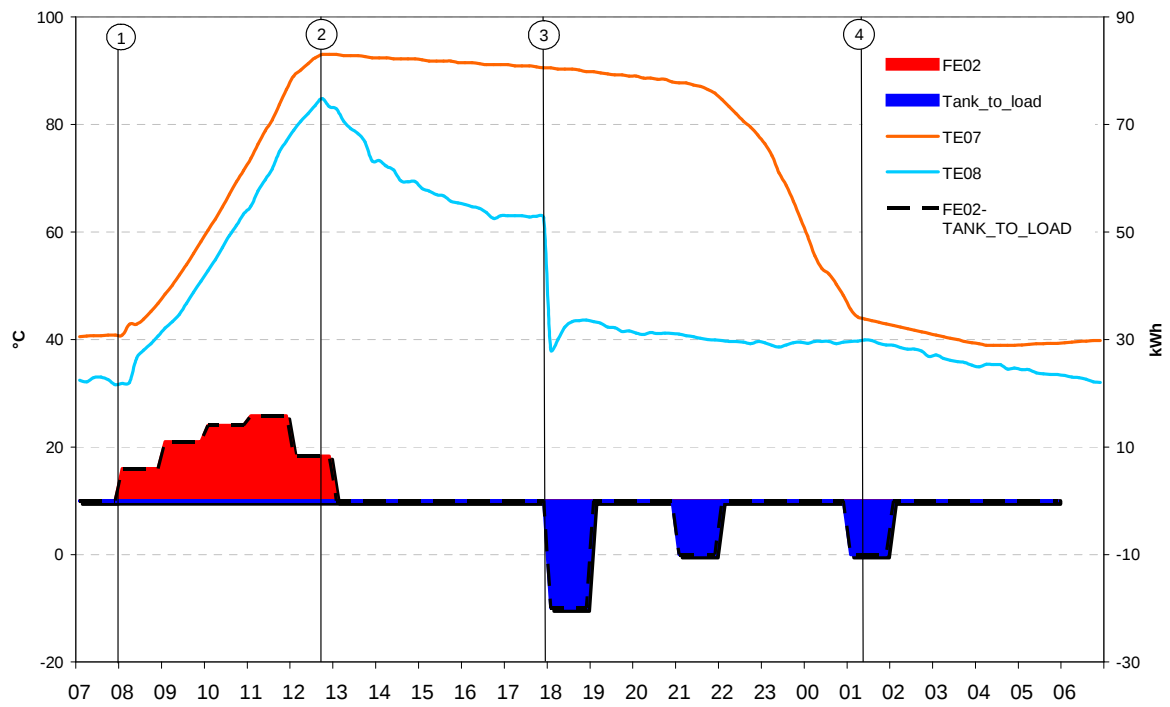


Figura 48 Accumulo PCM - 4 maggio 2013: carica dell'accumulo (1-2); 1° scarica accumulo (2-3); 2° scarica accumulo (3-4)

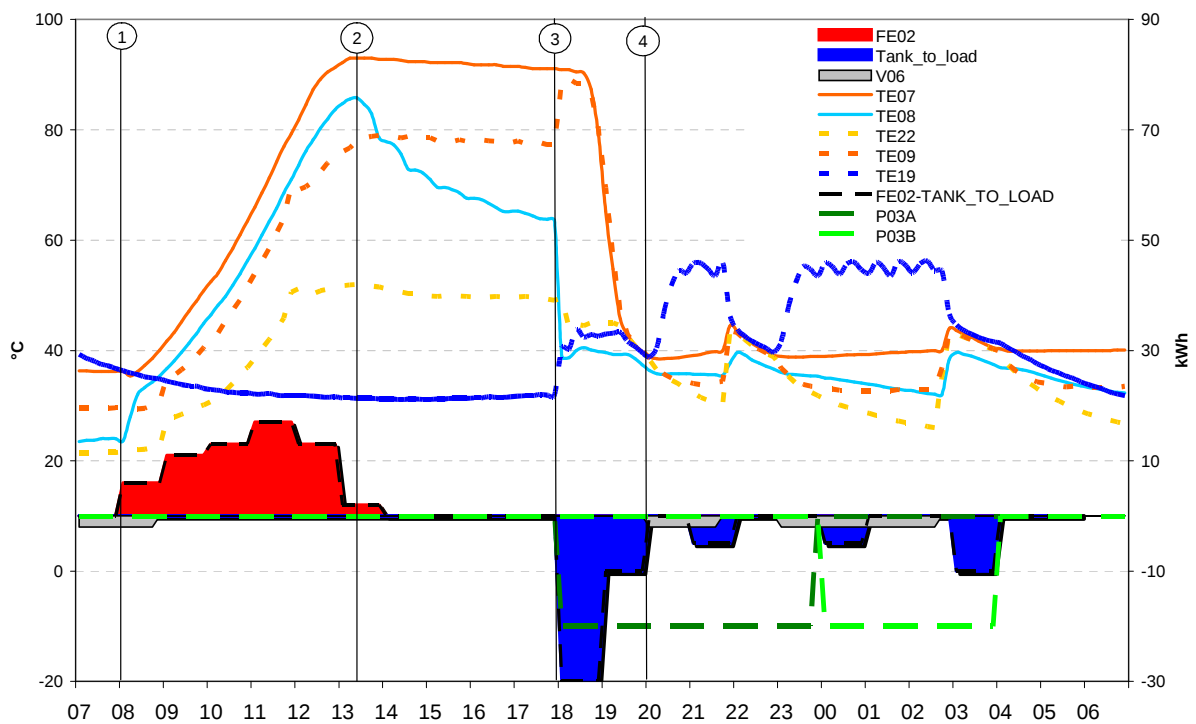


Figura 49 Accumulo PCM - 28 aprile 2013: profili delle temperature, stato delle pompe e delle valvole lato termodotto

In Figura 49 vengono riportati gli andamenti delle temperature e lo stato delle pompe e delle valvole sul lato tra accumulo e termodotto:

- ❑ L'area grigia evidenzia lo stato chiuso verso l'accumulo della valvola V06 in concomitanza con il funzionamento della caldaia per alimentare i fancoils: la curva tratteggiata blue evidenzia la temperatura di ritorno intorno ai 55 °C. In questo caso le temperature all'uscita dall'accumulo (TE09 e TE22) decrescono per effetto della dissipazione termica (circuiti esclusi), mentre nell'accumulo le temperature salgono leggermente fino ad arrivare a 40 °C: a quel punto viene esclusa la caldaia e viene aperta la valvola V06 verso l'accumulo. L'innalzamento di temperatura è legato al rimescolamento dell'accumulo e alla temperatura di ritorno dall'accumulo (curva blue) elevata.
- ❑ Le pompe P03A e P03B sono attive tra le 18:00 e le 4:00 del giorno successivo (ma mai contemporaneamente)¹².
- ❑ La temperatura a valle della valvola V02 è impostata a 45 °C e il profilo della sonda TE22 tende a portarsi a tale temperatura alle 22:00 ed alle 3:00.
- ❑ La temperatura in uscita dall'accumulo TE09 si porta a circa 80 °C ad accumulo carico; quando inizia il prelievo d'acqua la sonda rileva un aumento di temperatura fino a valori prossimi alla TE07 (interna all'accumulo).
- ❑ Tra le 19:00 e le 20:00 si nota un profilo simile tra temperature interne all'accumulo e temperatura di ritorno dal termodotto TE19 fino alla temperatura di 39 °C (temperatura per l'avvio della caldaia)¹³.

5 Simulazione TRNSYS dell'accumulo STD e dell'accumulo PCM: type 60 vs type 860

Per approfondire il comportamento osservato sperimentalmente dell'accumulo STD e dall'accumulo con materiale in cambiamento di fase è stato utilizzato l'ambiente di simulazione TRNSYS; in particolare sono state impiegate due type (Figura 50):

- ❑ type 60: simulazione accumulo stratificato cilindrico verticale con 2 input e 2 output;
- ❑ type 860: simulazione accumulo stratificato cilindrico verticale con 2 input e 2 output + PCM cilindrico verticale.

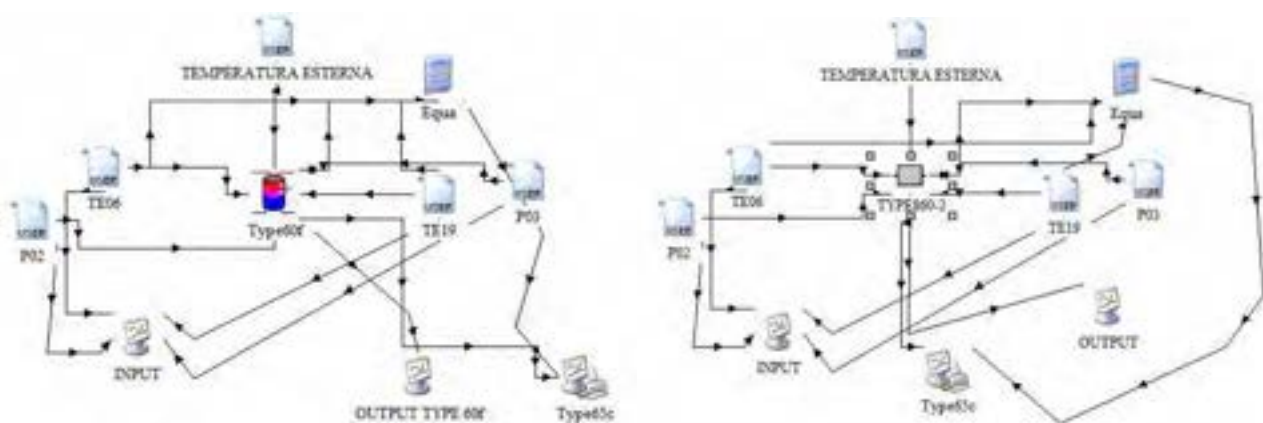


Figura 50 Modelli TRNSYS: type 60 e type 860

¹² Si nota, in questo caso, una discordanza tra stato della valvola V06 chiuso tra le 23:00 e le 3:00 del giorno successivo e il prelievo d'acqua dall'accumulo.

¹³ Lo stesso profilo di temperature si rileva anche per altri giorni in cui, però, non risulta essere presente un prelievo di calore dall'accumulo. Sembra quindi verosimile che la valvola V02 permetta il passaggio con una portata, più o meno costante, d'acqua dall'accumulo verso il termodotto. Questo giustifica un profilo delle temperature regolare.

Sono stati considerati quattro giorni per la simulazione con i modelli con un intervallo temporale di 10 minuti:

- ❑ 2 aprile 2012 – accumulo STD (type 60);
- ❑ 13 aprile 2013 – accumulo PCM (type 860);
- ❑ 19 aprile 2013 – accumulo PCM (type 860).

Le configurazioni utilizzate per la simulazione degli accumuli e dei tubi PCM sono elencate nei file allegati:

- ❑ TYPE 60 - PARAMETRI.txt
- ❑ TYPE 860 - PARAMETRI.txt

Gli input utilizzati derivano dai valori sperimentali misurati nei giorni considerati:

- ❑ TE06 – temperatura ingresso accumulo lato solare
- ❑ TE19 – temperatura ingresso accumulo lato termodotto
- ❑ TEMPERATURA ESTERNA – temperatura sonda ambiente esterno
- ❑ P02 – portata pompa ingresso accumulo lato solare (portata massima considerata = 5400 l/h)
- ❑ P03 – portata pompa ingresso accumulo lato termodotto (portata massima considerata = 4200 l/h)

Le portate sono state stimate sulla base dei valori sperimentali con intervallo temporale di 10 minuti come segue¹⁴:

$$P02 = \frac{FE02 \times 3600}{4,187 \times (TE06 - TE05)} \quad P03 = \frac{TANK_TO_LOAD \times 3600}{4,187 \times (TE19 - TE09)}$$

Va chiarito che:

- ❑ la portata P03 è la portata d'acqua che viene prelevata dall'accumulo dal lato termodotto/edificio; quindi sarà pari alla portata effettiva della pompa P03 tolta la portata d'acqua bypassata dalla valvola V02.
- ❑ Essendo FE02 e TANK_TO_LOAD delle energie (esprese in kWh) su base oraria, nella formula sopra riportata vengono considerate come potenze medie (kW) nell'ora considerata.

Le temperature iniziali dell'acqua nell'accumulo sono state ipotizzate essere uguali ai valori sperimentali rilevati dalla sonda TE08 per l'acqua tra i tubi PCM e dalla sonda TE07 per il volume d'acqua sopra i tubi PCM¹⁵.

Per ogni giorno considerato è stato riportato il grafico dei profili di temperatura per i vari nodi in cui è stato suddiviso l'accumulo (13 per l'accumulo STD e 18 per l'accumulo PCM) come segue:

ACCUMULO STD

- ❑ TOP – temperatura della parte più alta dell'accumulo (curva rossa)
- ❑ BOTTOM – temperatura della parte più bassa dell'accumulo (curva blue)
- ❑ -1....-13 – numero di nodi a partire dalla parte superiore dell'accumulo
- ❑ -2 – nodo al livello della sonda TE07 (curva arancio)
- ❑ -12 – nodo al livello della sonda TE08 (curva fuxia)

ACCUMULO PCM

- ❑ 32 – temperatura della parte più alta dell'accumulo (curva rossa)
- ❑ 33 – temperatura della parte più bassa dell'accumulo (curva blue)
- ❑ 34....49 – numero di nodi a partire dalla parte superiore dell'accumulo
- ❑ 35 – nodo al livello della sonda TE07 (curva arancio)
- ❑ 47 – nodo al livello della sonda TE08 (curva verde)

La simulazione dei tubi PCM utilizza la configurazione e le formule utilizzate di seguito [1] (Figura 51).

¹⁴ I valori ottenuti sono risultati abbastanza coerenti con i valori medi di portata rilevati per il 2013 (es. 3400 l/h per P02); tuttavia in taluni casi e per brevi periodi le sonde di temperatura sono sembrate non seguire correttamente l'andamento della temperatura.

¹⁵ Il modello di simulazione dell'accumulo PCM considera anche il volume sotto la piastra di supporto dei tubi PCM.

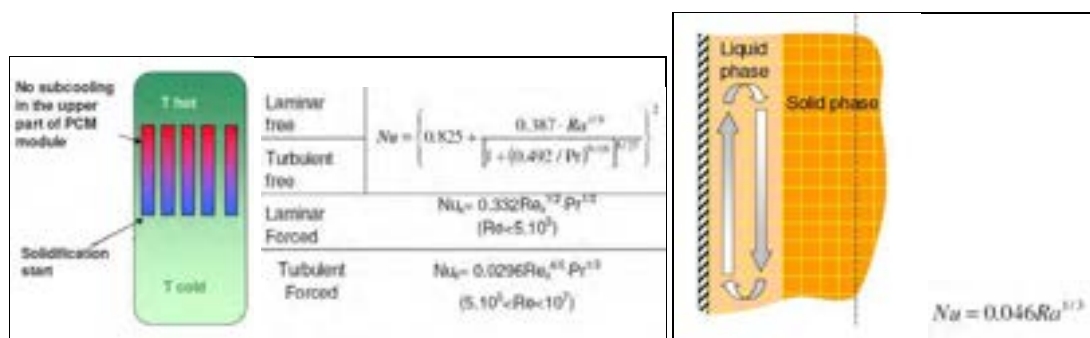


Figura 51 Type 860: coefficienti utilizzati per stimare lo scambio convettivo tra tubo e acqua (riquadro di destra) e tra tubo e PCM in fase liquida (riquadro di sinistra)

Confrontando i dati sperimentali con le simulazioni otteniamo:

- 2 aprile 2012 (Figura 52, Figura 53, Figura 28, Tabella 6): i profili di temperatura simulati sono in buon accordo con quelli sperimentali, l'accumulo risulta ben stratificato fino al primo prelievo d'acqua verso le 7:00 (vedi curve colorate). Durante la fase di carica dell'accumulo i profili sono molto vicini tra loro (vista l'elevata portata d'acqua) e si portano ad una temperatura massima di 76 °C (75,4 °C dato sperimentale). Considerando i flussi di calore nell'intervallo 1-2 di Figura 28 troviamo che il calore accumulato da simulazione (55 kWh) è in linea con il valore calcolato (56,9 kWh):

DESCRIZIONE	DATO SIMULATO	DATO SPERIMENTALE
	[kWh]	[kWh]
FE02	81	89
TANK_TO_LOAD	-26	-20
TANK TOTALE	55	69
TANK TOTALE CALCOLATO	-	56,9

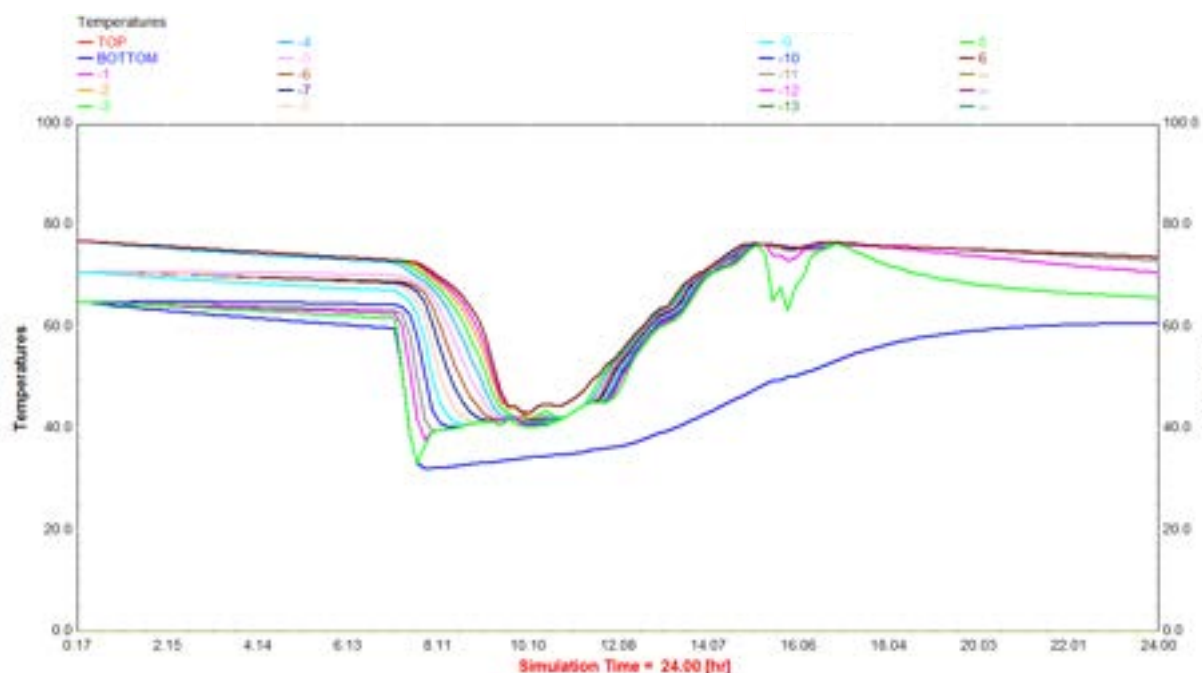


Figura 52 Simulazione accumulo STD - 2 aprile 2012: profili di stratificazione

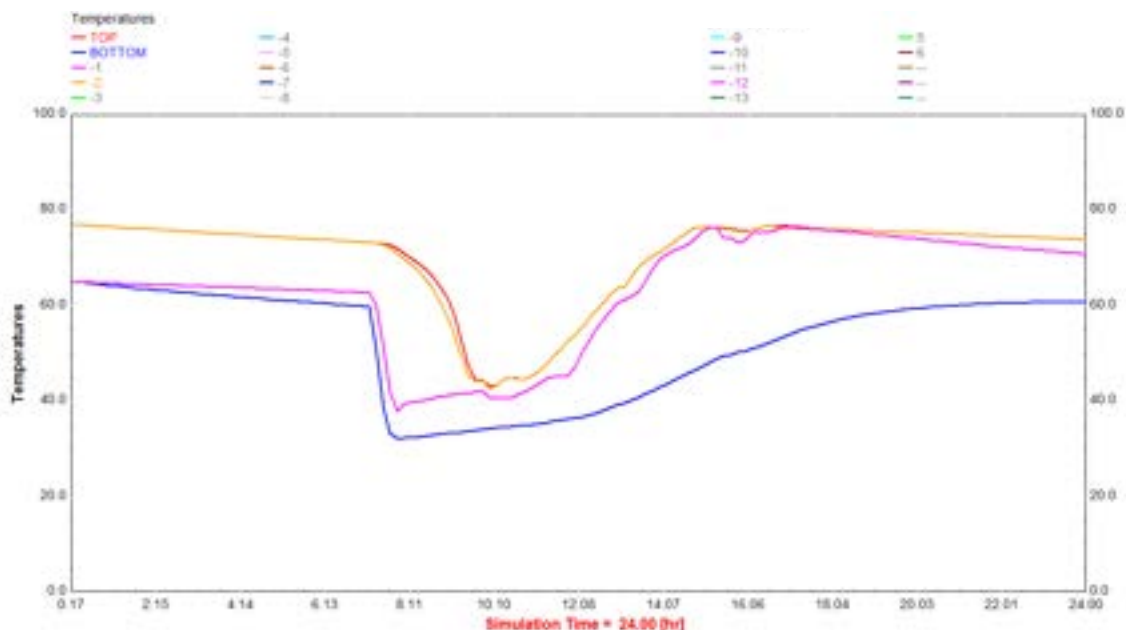


Figura 53 Simulazione accumulo STD - 2 aprile 2012: temperature sonde

- 13 aprile 2013 (Figura 54, Figura 55, Figura 37, Tabella 7): i profili di temperatura simulati sono in buon accordo con quelli sperimentali; anche in questo caso notiamo i due profili 48 e 49 che descrivono la temperatura del volume d'acqua sotto i PCM senza piastra di separazione: la temperatura del volume aumenta mediamente di circa 20 °C giustificando l'ipotesi semplificativa di esclusione del volume dal calcolo di stima del calore sensibile accumulato¹⁶. Durante la fase di carica dell'accumulo i profili sono molto vicini tra loro vista l'elevata portata d'acqua e si portano ad una temperatura massima di 93 °C (91,5-85,4 °C dato sperimentale). Considerando i flussi di calore nell'intervallo 8:00-18:00 (1-2) di Figura 37 troviamo che il calore accumulato simulato (56 kWh) è in linea con il valore sperimentale corretto per l'errore di sovrastima rilevato durante le misure del 2012 (52,1 kWh):

DESCRIZIONE	DATO SIMULATO	DATO SPERIMENTALE
	[kWh]	[kWh]
FE02	117	125
TANK_TO_LOAD	-61	-63
TANK TOTALE	56	62
TANK TOTALE CORRETTO		52,1

¹⁶ Il calore fornito al volume sotto ai PCM è pari a 2,3 kWh

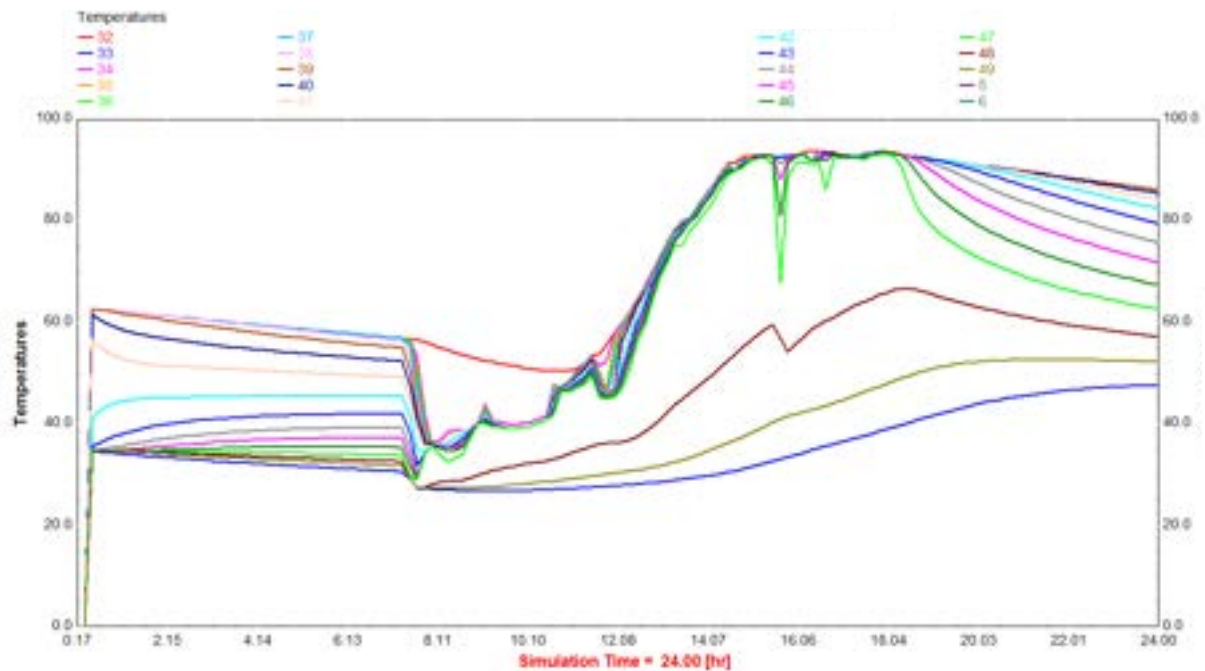


Figura 54 Simulazione accumulo PCM - 13 aprile 2013: profili di stratificazione

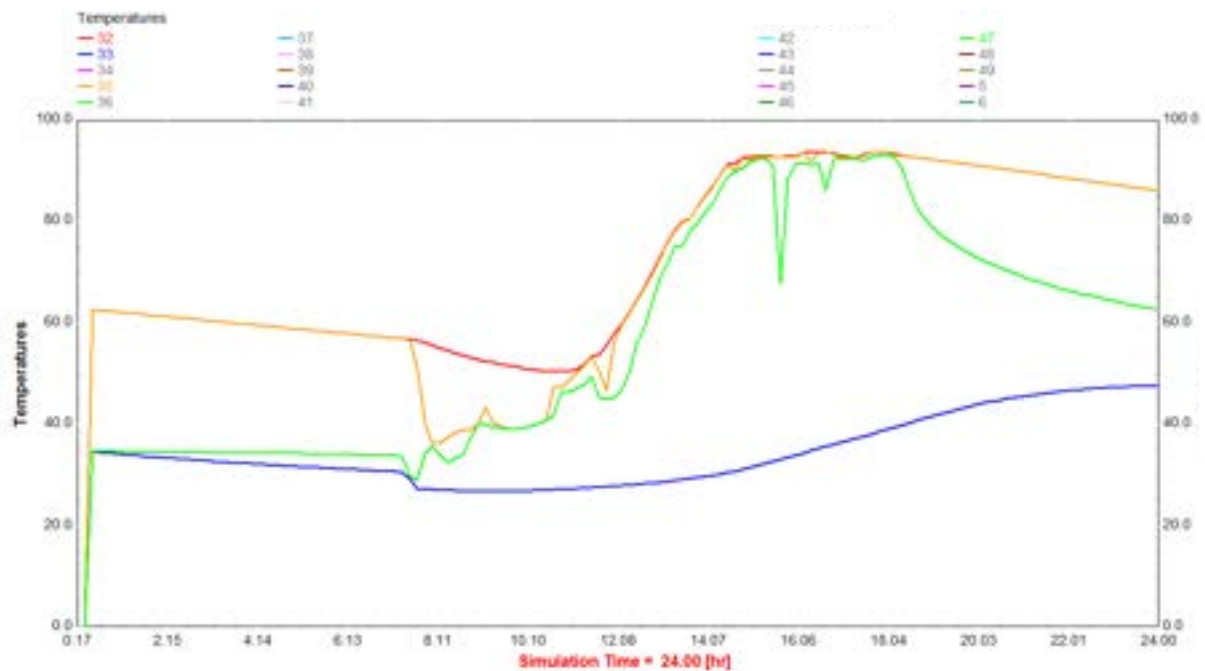


Figura 55 Simulazione accumulo PCM - 13 aprile 2013: temperature sonde

- 19 aprile 2013 (Figura 56, Figura 58, Figura 43 Tabella 9): i profili di temperatura simulati sono in buon accordo con quelli sperimentali; anche in questo caso notiamo i due profili 48 e 49 che descrivono la temperatura del volume d'acqua sotto i PCM senza piastra di separazione: la temperatura del volume aumenta mediamente di circa 10-15 °C giustificando l'ipotesi semplificativa di esclusione del volume dal calcolo di stima del calore sensibile accumulato¹⁷. Durante la fase di carica dell'accumulo i profili sono molto vicini tra loro vista l'elevata portata

¹⁷ Il calore fornito al volume sotto ai PCM è pari a 1,1-1,7 kWh

d'acqua e si portano ad una temperatura massima di 95 °C (86,5-92,6 °C dato sperimentale). Considerando i flussi di calore nell'intervallo 8:00-1:00 (1-4) di Figura 43 troviamo che il calore fornito/accumulato simulato (50 kWh) è in linea con il valore sperimentale corretto per l'errore di sovrastima rilevato durante le misure del 2012 (50,4 kWh - Tabella 9):

DESCRIZIONE	DATO SIMULATO	DATO SPERIMENTALE
	[kWh]	[kWh]
FE02	50	60
TANK_TO_LOAD	-20	-30
TANK TOTALE	30	30
FE02 CORRETTO		50,4

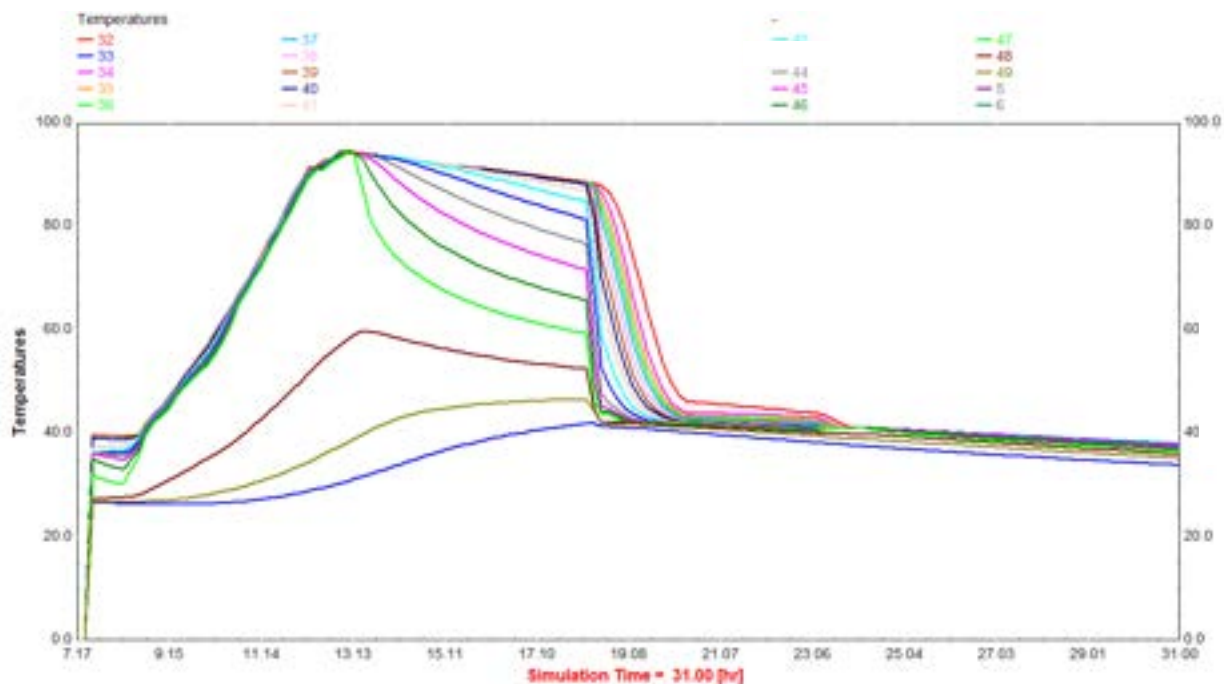


Figura 56 Simulazione accumulo PCM - 19 aprile 2013: profili di stratificazione

Tuttavia il calore prelevato dall'accumulo dalla simulazione (-22 kWh) risulta essere nettamente inferiore a quello misurato (-30 kWh). In effetti, la temperatura nell'accumulo rimane nella parte alta ad una intorno ai 90 °C fino alle 22:00 per poi calare rapidamente; viceversa con la simulazione la temperatura inizia a calare più di 2 ore prima con il risultato di riuscire a fornire una quantità di energia inferiore. In questo caso parte del calore è quindi assorbito dai PCM.

In questo caso si può ipotizzare essere presente, durante la fase di raffreddamento, un processo di isteresi/sottoraffreddamento come rappresentato in Figura 57: in buona sostanza il materiale in cambiamento di fase si porta ad una temperatura inferiore a quella di solidificazione permettendo alla temperatura dell'accumulo di portarsi a valori inferiori a quello nominale di solidificazione dei PCM. Il mancato rilascio di calore che si verifica durante il processo di sottoraffreddamento viene poi "recuperato" quando i PCM cominciano a solidificare; viceversa il processo di isteresi semplicemente porta ad un abbassamento della temperatura di solidificazione.

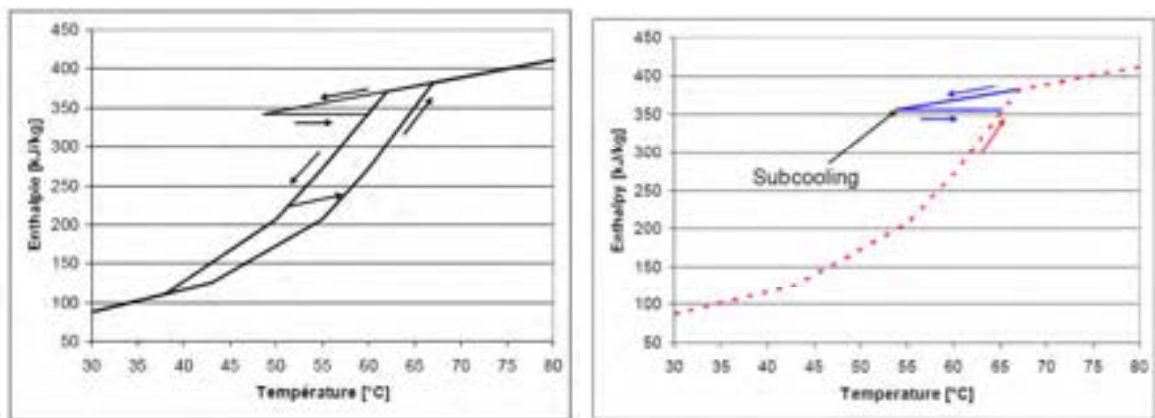


Figura 57 PCM: isteresi (sinistra) e sottoraffreddamento (destra) durante il processo di raffreddamento [1]

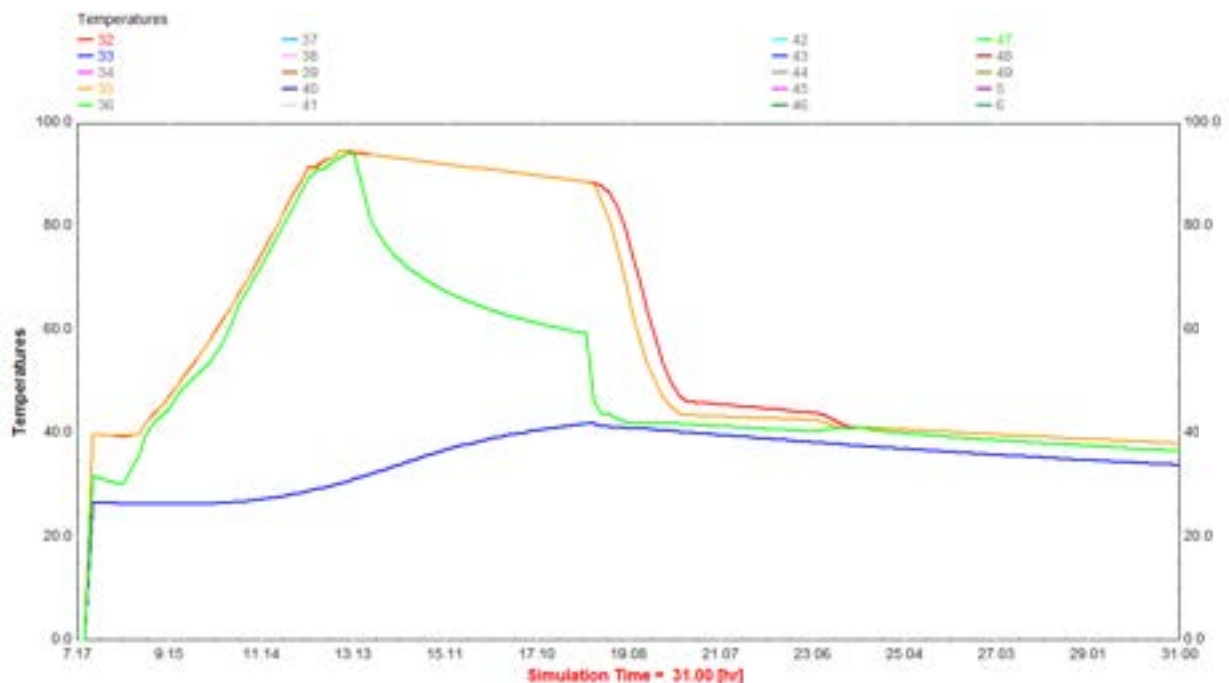


Figura 58 Simulazione accumulo PCM - 19 aprile 2013: temperature sonde

6 Pompa di calore aria-acqua ad integrazione del solare: valutazione sui dati sperimentali nel periodo 13 marzo-15 aprile 2013

Di seguito viene presentata una breve valutazione sull'utilizzo di una pompa di calore aria-acqua in alternativa alla caldaia a gas da 43,9 kW nominali per la produzione di acqua di alimento dei fancoils per la climatizzazione invernale dell'edificio F92.

La resa della pompa di calore è stata stimata a partire dai seguenti dati sperimentali con intervallo temporale di 10 min:

- ❑ TE10 – temperatura di ritorno acqua caldaia (uscita scambiatore SC02 lato caldaia);
- ❑ TE11 – temperatura di mandata acqua caldaia (entrata scambiatore SC02 lato caldaia);
- ❑ TEMPERATURA ESTERNA – temperatura sonda ambiente esterno;
- ❑ FE03 – calore fornito dalla caldaia integrativa per climatizzazione ambientale.

Il calcolo del COP può essere stimato, in assenza di dati dettagliati del costruttore, a partire dal rendimento exergetico nominale della pompa di calore come seguente [5]:

$$\eta_{ex,nom} = \frac{COP_{NOM}}{273,15 + T_{C,NOM} + \Delta T_{INT}} \left[(T_{C,NOM} + \Delta T_{INT}) - (T_{F,NOM} + \Delta T_{EXT}) \right]$$

dove

$T_{C,NOM}$ Temperatura di condensazione nominale [°C]

$T_{F,NOM}$ Temperatura aria esterna nominale [°C]

COP_{NOM} COP nominale della pompa di calore

ΔT_{INT} Differenza tra temperatura dell'acqua e temperatura di condensazione [°C]

ΔT_{EXT} Differenza tra temperatura dell'aria esterna e temperatura di evaporazione [°C]

In condizioni di lavoro diverse da quelle nominali il COP viene calcolato utilizzando il rendimento exergetico sopra calcolato (ed ipotizzato costante) con la seguente relazione [5]:

$$COP = \frac{273,15 + T_C + \Delta T_{INT}}{(T_C + \Delta T_{INT}) - (T_F + \Delta T_{EXT})} \eta_{ex,nom}$$

dove

T_C Temperatura di condensazione nel punto di lavoro considerato [°C]

T_F Temperatura aria esterna nel punto di lavoro considerato [°C]

La potenza della pompa di calore (Q_C) in condizioni diverse da quelle nominali (Q_{NOM}) viene calcolata come segue:

$$Q_C = \frac{(T_{C,NOM} + \Delta T_{INT}) - (T_{F,NOM} + \Delta T_{EXT})}{(T_C + \Delta T_{INT}) - (T_F + \Delta T_{EXT})} Q_{NOM}$$

Si ipotizza di utilizzare una pompa di calore aria-acqua con le seguenti condizioni nominali:

Q_{NOM} 17,5 kW

$T_{C,NOM}$ 60 °C

$T_{F,NOM}$ 7 °C

COP_{NOM} 2,61

ΔT_{INT} 5 °C

ΔT_{EXT} 5 °C

Le equazioni sopra riportate sono state utilizzate per stimare il COP della pompa di calore con produzione di acqua calda a 60 °C (vedi Tabella 11). In particolare è stato utilizzato il *bin method* suddividendo in intervalli di temperatura i dati sperimentali ottenuti come segue:

- ❑ FE03* - potenza media su base oraria ottenuta dall'energia misurata FE03;
- ❑ Q_C – potenza a massimo carico della pompa di calore operante con acqua in uscita a 60 °C e temperatura dell'aria esterna rilevata dalla sonda;
- ❑ PAR – parzializzazione della pompa di calore;
- ❑ n(h) – ore di funzionamento della pompa di calore;
- ❑ C2 – coefficiente di correzione del COP funzione della parzializzazione;
- ❑ C1 - coefficiente di correzione del COP funzione dei cicli di sbrinamento necessari legati all'umidità relativa dell'aria esterna;

Tabella 11 Pompa di calore aria-acqua a supporto del solare termico: potenza media su base oraria, ore di funzionamento e COP (produzione di acqua a 60 °C)

VALORE CENTRALE	FE03*	QC	COP	PAR	C2	n(h)	UR	C1	COP'	Energia primaria [kW]	
[°C]	[kW]	[kW]	[-]	[-]	[-]	[h]	[%]	[-]	[-]	PdC	Caldaia
19	10.20	22.62	3.37	0.45	1.00	1	58	1	3.37	6.6	10.2
17	6.05	21.57	3.22	0.28	1.00	13	83	1	3.22	53.2	78.7
15	8.18	20.61	3.07	0.40	1.00	29	88	1	3.07	167.7	237.15
13	9.40	19.73	2.94	0.48	1.00	63	89	1	2.94	437.6	592.5
11	13.23	18.93	2.82	0.70	1.00	32	86	1	2.82	326.0	423.3
9	16.00	18.19	2.71	0.88	1.00	24	89	0.95	2.58	324.0	384
7	22.70	17.50	2.61	1.30	1.00	7	87	0.95	2.48	139.3	158.9
5	24.00	16.86	2.52	1.42	1.00	2	64	0.9	2.26	46.1	48
3	28.00	16.27	2.43	1.72	1.00	1	57	0.92	2.23	27.3	28

Il COP atteso nel periodo considerato varia tra 2.23 e 3.37 con temperature medie dell'aria variabili tra 2 e 20 °C.¹⁸ L'energia primaria consumata nel caso PdC risulterebbe, per il periodo considerato, pari a 1528 kWh (avendo ipotizzato un rendimento di conversione elettrico/primaria pari al 46%), contro i 2179 kWh nel caso della caldaia (avendo ipotizzato, in via cautelativa, un rendimento medio globale pari a quello nominale, 90%). Il risparmio di energia primaria sarebbe quindi del 30%.

7 Conclusioni

La campagna di misure sull'impianto di solar cooling and heating presso l'edificio F92 Casaccia si è sviluppata in due fasi principali:

- ❑ misure con funzionamento in climatizzazione invernale (dal 13 marzo al 15 aprile 2013);
- ❑ misure con processo di carica/scarica controllato dell'impianto (dal 16 aprile al 5 maggio 2013).

A queste misure sono stati aggiunti i dati già rilevati durante l'impianto con accumulo standard nel periodo dal 13 marzo al 15 aprile 2012.

Dal confronto tra i dati del 2013 con quelli del 2012 emerge un comportamento simile tra i due tipi di accumuli per il periodo 1-15 aprile (periodo scelto per il confronto perché caratterizzato da condizioni meteorologiche/al contorno più simili). In particolare, i valori assunti dall'indice "energia fornita all'utenza per grado giorno" confermano il comportamento similare dei due accumuli (con accumulo PCM che presenta un ingombro inferiore di un terzo rispetto al serbatoio std). Se osserviamo la massima energia accumulata, troviamo tuttavia 82,9 kWh per l'accumulo standard e 52,1 kWh per quello PCM: quindi proporzionale al volume dell'accumulo e alle capacità teoriche calcolate (vedi Tabella 4).

La seconda fase ha permesso di analizzare nel dettaglio il comportamento dei tubi PCM in fase di carica, già evidenziato durante la climatizzazione invernale dell'edificio: su un potenziale di accumulo di 32 kWh (di cui latenti 17,8 kWh) si riescono a raggiungere 17,9 kWh (14,4 kWh/8,3 kWh corretti) con la 1° fase di carica alla quale si aggiungono altri 6,8 kWh (5,5 kWh/2 kWh corretti) nelle successive fasi di scarica dell'accumulo (carica dei PCM). Risulta quindi in generale utilizzata una quantità di calore inferiore al calore latente di fusione/solidificazione dei PCM.

8 Riferimenti bibliografici

1. S. Citherlet, J. Bony, "Simulation model of PCM modules plunged in a water tank", Report of IEA Solar Heating and Cooling programme - Task 32, Report C5 of Subtask C, 2007
2. N. Calabrese, A. Fanchiotti, "Messa in funzione, analisi sperimentale e caratterizzazione dell'innovativo impianto di solar heating and cooling realizzato a servizio dell'Edificio F92", Report RdS/2012/122, www.enea.it

¹⁸ Si ricorda che il setpoint dell'impianto è stato alzato nel 2013 a 22 °C

3. N. Calabrese, R. Trinchieri, A. Simonetti, “Solar heating and cooling innovativo su edificio F92”, Report RdS/2011/250, www.enea.it
4. R. Lazzarin, M. Noro, F. Busato, “Progettazione di un serbatoio di accumulo a cambiamento di fase”, Report RdS/2012/125, www.enea.it
5. R. Lazzarin, “Pompe di calore”, SGEEditoriali, Padova, 2011