



Ricerca di Sistema elettrico

## Analisi sperimentale di sistemi di accumulo del freddo innovativi per applicazioni residenziali: estensione dei risultati del PAR 2017

Mongibello L., Caliano M., Ciniglio G., Di Somma M., Graditi G.

ANALISI SPERIMENTALE DI SISTEMI DI ACCUMULO DEL FREDDO INNOVATIVI PER APPLICAZIONI  
RESIDENZIALI: ESTENSIONE DEI RISULTATI

Mongibello L., Caliano M., Ciniglio G., Di Somma M., Graditi G. (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: B Reti termiche distribuite

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

## Indice

Indice .....	3
Sommario .....	4
1. Risultati sperimentali relativi al serbatoio con acqua e PCM macro-incapsulato .....	4
1.1. Funzionamento con parzializzazione del flusso .....	4
1.2. Funzionamento senza parzializzazione del flusso .....	7
2. Risultati sperimentali relativi al serbatoio di PCM con mantello in plexiglass .....	10
2.1. Funzionamento con parzializzazione del flusso .....	10
2.2. Funzionamento senza parzializzazione del flusso .....	11
3. Stime economiche .....	12
4. Conclusioni.....	14

## Sommario

Questo documento presenta i risultati ottenuti dall'ENEA nel corso del periodo di estensione del progetto RdS PAR 2015-2017 (progetto d.1 obiettivo b), riguardanti l'utilizzo di materiale a cambiamento di fase (PCM) come materiale di accumulo per sistemi di accumulo del freddo innovativi per applicazioni residenziali. In questo periodo sono stati effettuati altri test sperimentali, nei quali sono state impiegate diverse quantità di PCM, ad integrazione e completamento dei test effettuati nel corso della terza annualità del progetto. In particolare, sono state effettuate diverse prove sperimentali utilizzando un serbatoio d'acqua da 400 litri con 120 bottiglie da 1 litro parzialmente riempite con PCM, ed il serbatoio col mantello in plexiglass isolato termicamente, descritto nel report relativo al PAR 2017.

Nel seguito si passerà direttamente alla discussione dei risultati sperimentali ottenuti, senza prima descrivere l'impianto sperimentale realizzato ed utilizzato per le simulazioni, né l'utenza residenziale simulata, né le strategie di funzionamento implementate, i cui dettagli possono essere trovati nei report precedenti.

## 1. Risultati sperimentali relativi al serbatoio con acqua e PCM macro-incapsulato

In questo capitolo sono mostrati i risultati ottenuti con il serbatoio da 400 litri con acqua e 120 bottiglie da 1 litro parzialmente riempite con PCM, implementando due differenti strategie di funzionamento dell'impianto, ovvero il funzionamento con parzializzazione del flusso e quello senza parzializzazione del flusso. In ognuno dei casi analizzati, sono stati simulati più giorni standard consecutivi al fine di ottenere la periodicità del funzionamento del chiller giorno dopo giorno. Pertanto, tutti i risultati mostrati in questo capitolo si riferiscono a condizioni periodiche di funzionamento del chiller, ed in particolare essi si riferiscono al terzo giorno di funzionamento.

### 1.1. Funzionamento con parzializzazione del flusso

In questo caso, la strategia di funzionamento implementata è quella che prevede la parzializzazione del flusso, secondo la logica descritta nel paragrafo 2.2 del report relativo al PAR 2017.

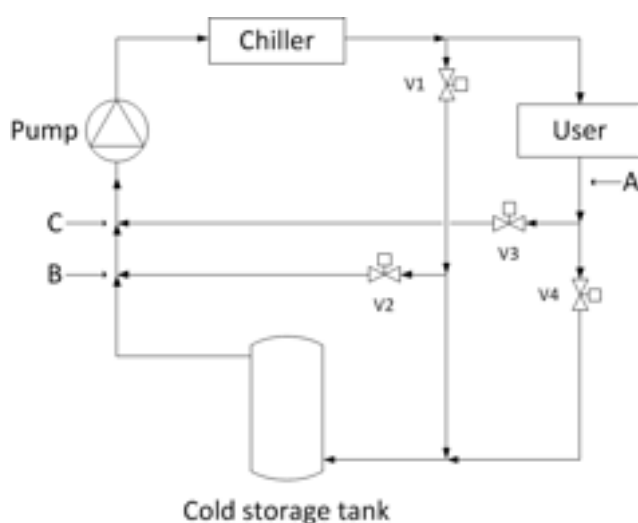
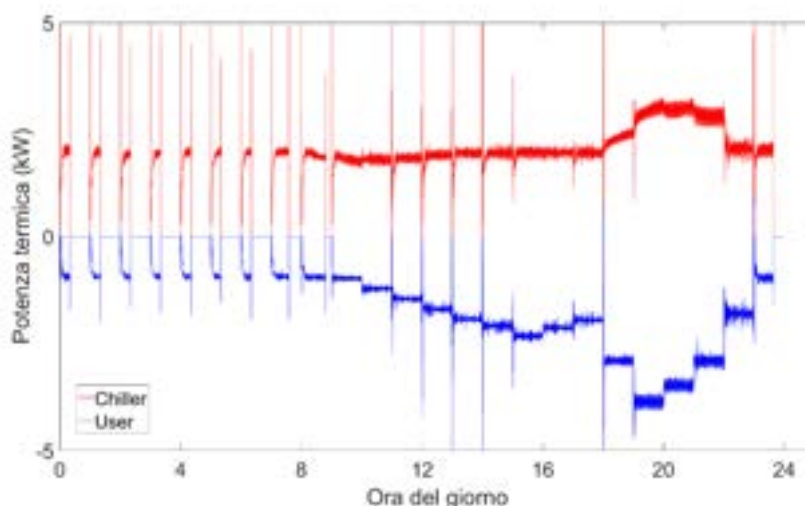


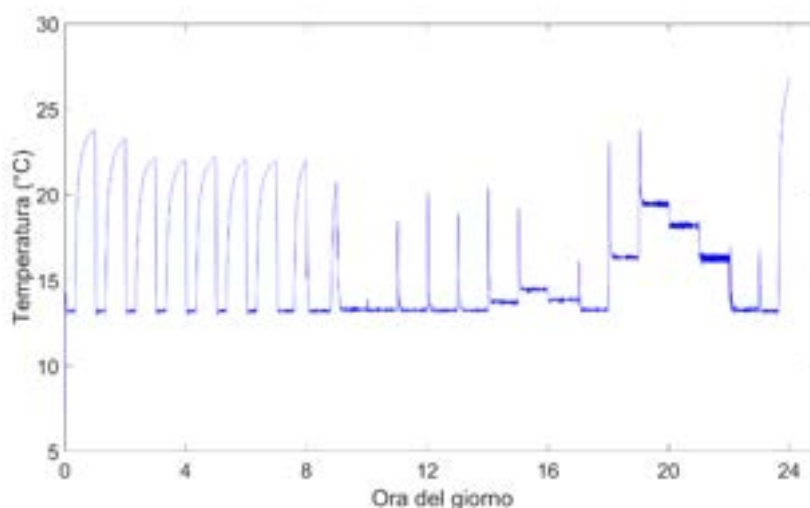
Figura 1. Layout semplificato dell'impianto prova accumulo freddo.

Con riferimento allo schema di Figura 1, la temperatura di set-point all'uscita del chiller è fissata a 7°C ed è controllata dal controller del chiller, la portata nel ramo chiller e quella nel ramo user controllate ai valori di set-point mediante, rispettivamente, la pompa di bypass, in parallelo al chiller, e la valvola modulante VM1 presente nel circuito, la temperatura al nodo A controllata ai valori relativi al carico termico con la valvola VM5, la temperatura al nodo B controllata a 13,1°C mediante la valvola VM2, e quella al nodo C controllata a 13,1°C mediante la valvola VM3.

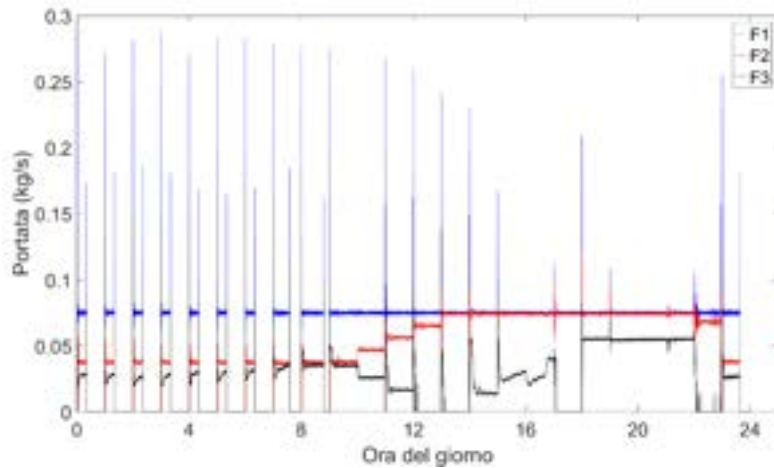
La Figura 2, la Figura 3 e la Figura 4 mostrano, rispettivamente, la potenza termica refrigerante generata dal chiller e la potenza termica scambiata dallo scambiatore di calore che simula il carico (user), la temperatura dell'acqua all'uscita dello user, e le portate massiche dell'acqua nei rami del chiller, dello user e del serbatoio, durante la giornata. Con riferimento alla Figura 2, si può notare che, per effetto della presenza del sistema di accumulo del freddo, nelle prime ore della giornata la potenza generata dal chiller è maggiore rispetto a quella scambiata dallo user che corrisponde ai carichi termici, mentre è inferiore nelle ore di picco. Si nota inoltre che, come prescritto dalla strategia di funzionamento con parzializzazione del flusso, il funzionamento del chiller non è continuo nelle prime ore del giorno. Ciò è evidente anche se si considerano la Figura 3 e la Figura 4. Infatti, nei periodi in cui il chiller è spento, le portate nei rami del circuito sono tutte nulle, e la temperatura all'uscita dello user tende ad aumentare fino a raggiungere la temperatura ambiente.



**Figura 2. Andamento temporale della potenza termica refrigerante generata dal chiller e potenza termica scambiata dallo scambiatore di calore che simula il carico (user).**



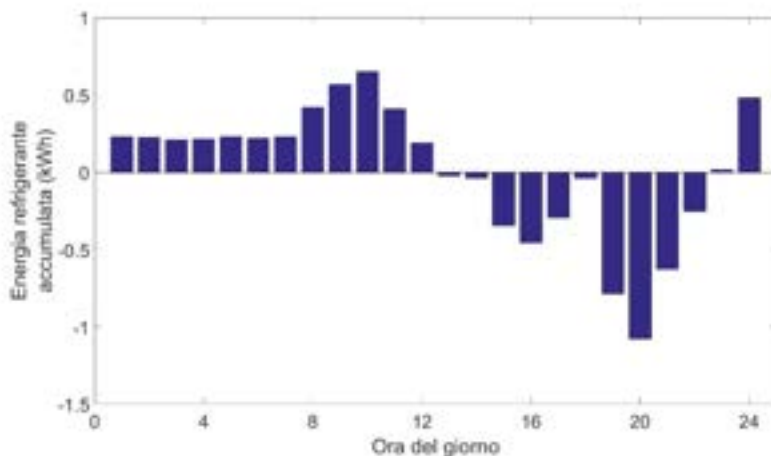
**Figura 3. Temperatura dell'acqua all'uscita dello user durante la giornata.**



**Figura 4. Portate massiche dell'acqua nel ramo chiller (F1), nel ramo user (F2), e nel serbatoio (F3) durante la giornata.**

In Figura 2 si può inoltre notare che, quando è acceso, il chiller lavora a potenza costante, pari a circa 2  $\text{kW}_t$ , per 20 delle 24 ore della giornata standard simulata, vale a dire dall'ora 1 all'ora 18 e nelle ore 23 e 24, o, in maniera equivalente, dall'ora 23 all'ora 18 del giorno successivo. Invece, dall'ora 19 all'ora 22 il chiller lavora a potenze più alte, con un picco di circa 3  $\text{kW}_t$  nell'ora 21.

La Figura 5 mostra le medie orarie dell'energia termica refrigerante accumulata nel serbatoio di accumulo del freddo, valutata attraverso un bilancio entalpico considerando l'ingresso e l'uscita del serbatoio, mentre la Figura 6 mostra le medie orarie della potenza refrigerante generata dal chiller. La somma dell'energia termica refrigerante accumulata nel serbatoio nelle ore di caricamento è di 4,31  $\text{kWh}_t$ , valore ben più basso rispetto ai 6,31  $\text{kWh}_t$  risultanti dal pre-design. La Figura 5 mostra che, nonostante sia stato utilizzato un serbatoio da 400 litri, quindi più grande rispetto a quello utilizzato per il dimensionamento del sistema di accumulo, anche in questo caso i risultati sperimentali non permettono di ottenere i risultati teorici ottenuti nella fase di dimensionamento del sistema di accumulo, ovvero quelli riportati nel paragrafo 2.3.1 del report relativo al PAR 2017. Infatti, con riferimento alla Figura 6, considerando che il funzionamento del chiller è continuo dall'ora 10 all'ora 23, il valore medio massimo che si ottiene all'ora 21, pari a 3  $\text{kW}_t$  può essere assunto come valore di picco giornaliero della potenza refrigerante generata dal chiller. A tale valore corrisponde una potenza elettrica assorbita dal chiller di 1,12  $\text{kW}_e$ , ottenuta considerando che il COP relativo all'ora 21 è pari a 2,67, più alta rispetto a quel 0,96  $\text{kW}_e$  calcolato nella fase di dimensionamento dei componenti dell'impianto, e più bassa del 30% rispetto alla potenza di picco del chiller nel caso senza accumulo del freddo, ovvero 1,6  $\text{kW}_e$ , calcolata considerando le perdite termiche pari al 5% dell'energia refrigerante generata.



**Figura 5. Medie orarie dell'energia termica refrigerante accumulata dal serbatoio.**

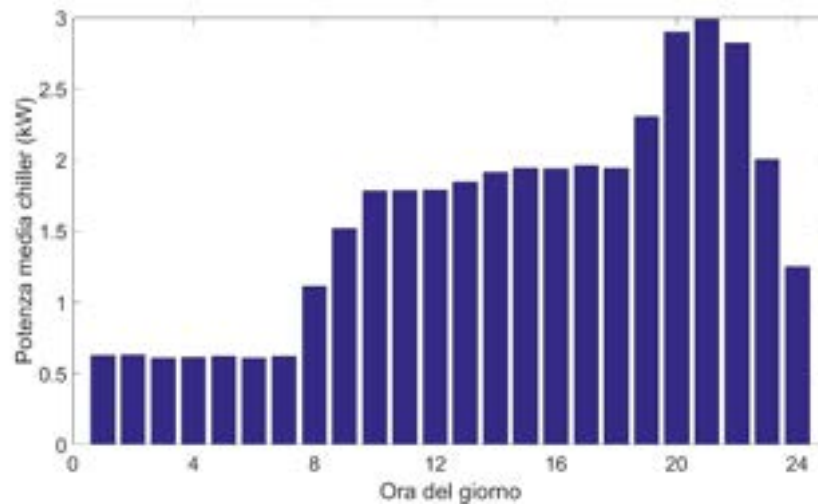


Figura 6. Medie orarie della potenza termica refrigerante generata dal chiller.

Come sarà dimostrato più avanti, questi risultati sono dovuti al fatto che la transizione di fase del PCM contenuto nelle bottiglie risulta incompleta a fine caricamento per effetto del basso tasso di scambio termico tra acqua e bottiglie di PCM nel serbatoio, quindi al fatto che il sistema non riesce ad utilizzare tutto potenziale di accumulo del PCM.

Infine, la Figura 7 mostra l'andamento della temperatura media dell'acqua nel serbatoio durante la giornata. Come si può notare, la temperatura media ad inizio giornata coincide con quella media a fine giornata, il che rappresenta una condizione necessaria affinché si verifichi la periodicità dei risultati giorno dopo giorno. La differenza tra la temperatura media massima e quella minima nel serbatoio è pari a circa 7 °C, che corrispondono ad una capacità del serbatoio di accumulo di 3,45 kWh<sub>t</sub> nel caso in cui nel serbatoio sia presente soltanto acqua come materiale di accumulo di energia refrigerante.

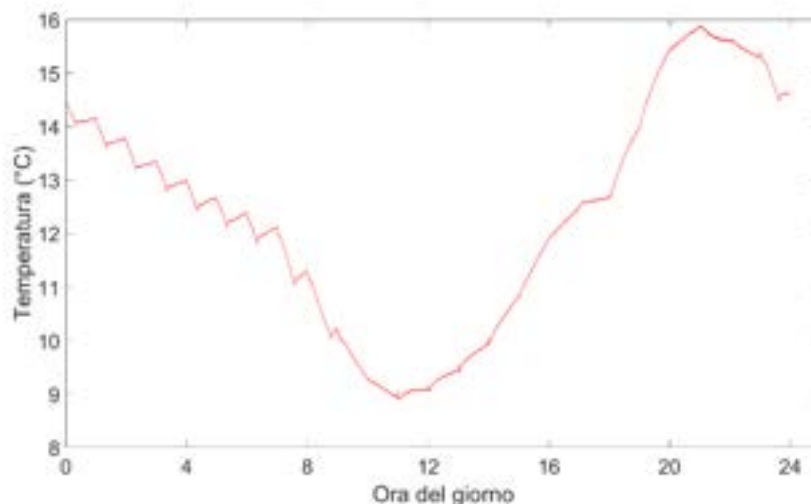


Figura 7. Temperatura media dell'acqua nel serbatoio di accumulo del freddo durante la giornata.

## 1.2. Funzionamento senza parzializzazione del flusso

Secondo questa strategia di funzionamento, il chiller lavora in maniera continua durante tutta la giornata, e tutta la portata del fluido termovettore in uscita dal chiller a 0,075 kg/s e temperatura nominale di 7 °C è inviata allo scambiatore che simula l'utenza, e successivamente al serbatoio di accumulo del freddo. La Figura 8 mostra le medie orarie dell'energia termica refrigerante accumulata nel serbatoio di accumulo, mentre

Figura 9 mostra le medie orarie della potenza refrigerante generata dal chiller. Dal confronto tra la Figura 8 e la Figura 5 si nota che nel caso con parzializzazione del flusso si ha un caricamento più lungo e uniforme, mentre senza parzializzazione del flusso si ha un caricamento più corto e concentrato soprattutto nelle prime ore della fase di caricamento, e uno scaricamento più lungo. In questo caso il totale dell'energia refrigerante accumulata durante il caricamento è di 5,33 kWh<sub>t</sub>, valore questo più alto rispetto al caso con parzializzazione del 24% circa. Relativamente alla Figura 9, a differenza del caso con parzializzazione, le medie riportate sono molto prossime ai valori istantanei della potenza termica del chiller registrati durante tutta la giornata, e questo si spiega considerando che, senza parzializzazione del flusso, il chiller funziona in maniera continua, senza interruzioni. Confrontando la Figura 6 e la Figura 9, si può notare inoltre che nel caso senza parzializzazione la potenza di picco, pari a 3.2 kW<sub>t</sub>, corrispondenti a una potenza elettrica assorbita di 1.2 kW<sub>e</sub>, è più alta rispetto al caso con parzializzazione, il che implica una maggior efficacia della strategia operativa con parzializzazione del flusso nell'effettuare il peak-shaving del carico relativamente al presente caso, nonostante nel caso con parzializzazione la capacità del serbatoio di accumulo effettivamente impiegata sia notevolmente più bassa.

La Figura 10 mostra l'andamento della temperatura media dell'acqua nel serbatoio durante la giornata. Come si può notare, anche in questo caso la temperatura media ad inizio giornata coincide con quella media a fine giornata, il che rappresenta una condizione necessaria affinché si verifichi la periodicità dei risultati giorno dopo giorno. Tuttavia, l'andamento della temperatura media è differente rispetto al caso con parzializzazione per effetto della diversa strategia di funzionamento. In particolare, con riferimento alla Figura 7 e alla Figura 10, nel caso senza parzializzazione del flusso, la differenza tra il massimo ed il minimo della temperatura media dell'acqua nel serbatoio è 0,7°C più alta rispetto al caso con parzializzazione, in accordo con il fatto che vi è un maggiore accumulo di energia refrigerante nel caso senza parzializzazione.

Infine, la Figura 11 mostra l'andamento temporale nei 3 giorni di simulazione della frazione liquida media del PCM nelle bottiglie da un litro, relativo al caso senza parzializzazione, ottenuto tramite una simulazione numerica realizzata mediante il codice di calcolo sviluppato dal gruppo di lavoro del Dipartimento "DII" dell'Università di Napoli Federico II nell'ambito del presente progetto. Tale figura indica chiaramente che in questo caso, a regime, utilizzando bottiglie da un litro parzialmente riempite di PCM e con il sistema di accumulo nell'attuale configurazione, si riesce a sfruttare soltanto un terzo del calore latente associato a tutto il materiale a cambiamento di fase presente nelle 120 bottiglie inserite nel serbatoio.

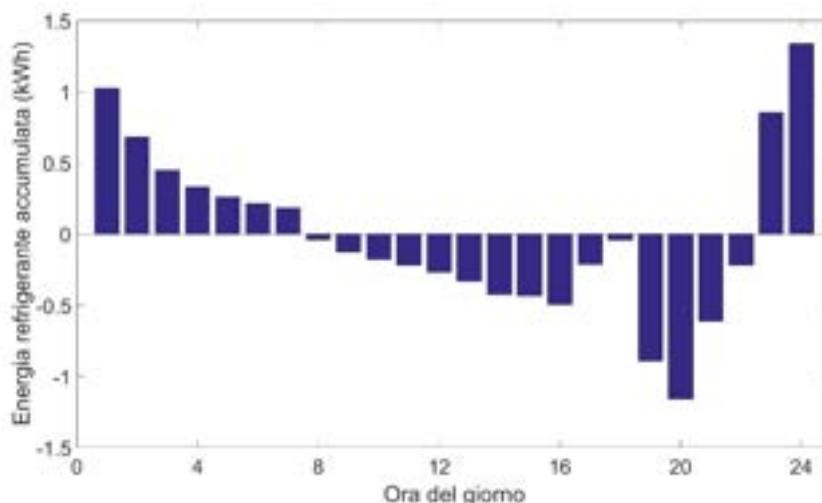


Figura 8. Medie orarie dell'energia termica refrigerante accumulata dal serbatoio.

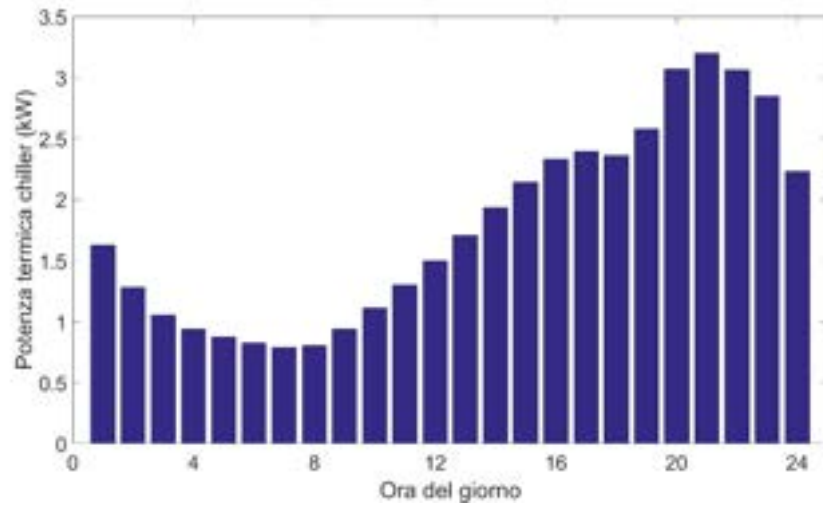


Figura 9. Medie orarie della potenza termica refrigerante generata dal chiller.

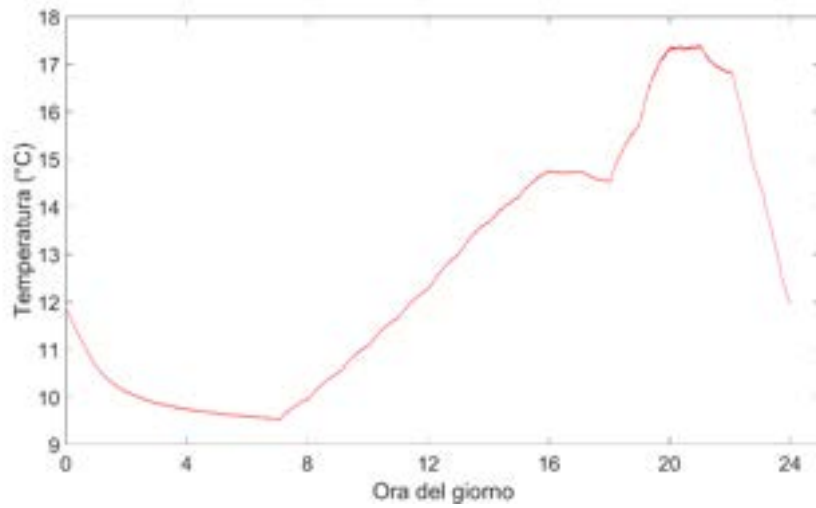


Figura 10. Temperatura media dell'acqua nel serbatoio di accumulo del freddo durante la giornata.

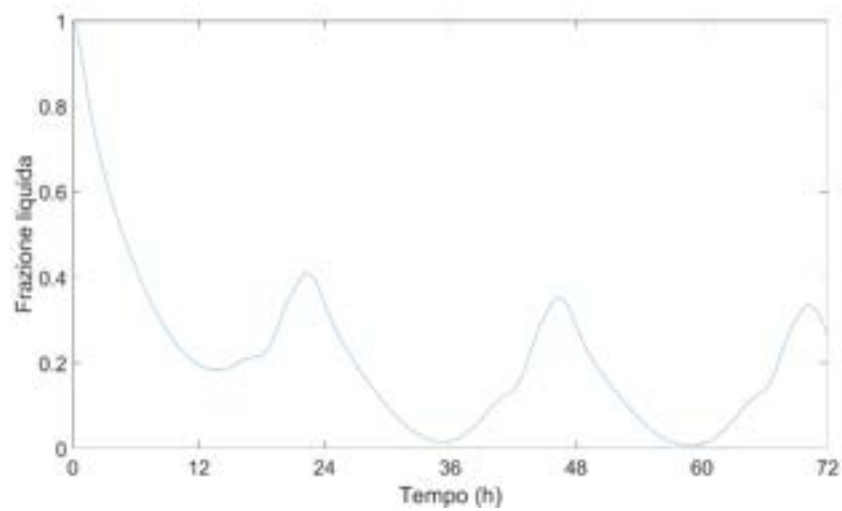


Figura 11. Andamento temporale della frazione liquida del PCM.

## 2. Risultati sperimentali relativi al serbatoio di PCM con mantello in plexiglass

La Figura 12 mostra una foto del serbatoio con mantello in plexiglass a cui è stato applicato uno strato di isolante termico, costituito da un elastomero espanso a celle chiuse, sia sulla superficie esterna del mantello in plexiglass che sulle superfici esterne di entrambi i plenum, al fine di minimizzare le perdite termiche verso l'ambiente interno del laboratorio indoor dove sono state condotte le prove sperimentali. Al fine di abbassare il più possibile le perdite termiche del sistema di accumulo, le prove sperimentali condotte nel periodo di estensione del progetto, e realizzate a inizio dicembre, sono state effettuate lasciando le finestre del laboratorio aperte per abbassare il più possibile la temperatura ambiente all'interno del laboratorio. In tal modo, si è riusciti ad ottenere una temperatura ambiente nel laboratorio attorno ai 20°C per tutta la durata delle prove, ben più bassa rispetto ai 38-40°C misurati nel laboratorio durante le prove condotte nel periodo estivo e descritte nel report precedente, dovuti al calore dissipato dal chiller all'interno del laboratorio. Inoltre, le prove effettuate a inizio dicembre, di cui si riportano i risultati nei paragrafi successivi, sono state effettuate con una quantità di PCM maggiore rispetto a quella risultante dal pre-design. Infatti, per queste prove sono stati utilizzati 187 litri di PCM, corrispondenti ad una capacità di accumulo sotto forma di calore latente di 8,12 kWh<sub>t</sub>, e ad un'altezza del pelo libero di PCM nel serbatoio di 1,10 m, mentre il dimensionamento teorico, descritto nel report relativo al PAR 2017, prevedeva l'impiego di 145 litri di PCM, corrispondenti a 6,13 kWh<sub>t</sub> di calore latente e ad un'altezza del pelo libero di 0,83 m.



Figura 12. Serbatoio con mantello in plexiglass isolato termicamente.

### 2.1. Funzionamento con parzializzazione del flusso

La Figura 13 mostra le medie orarie dell'energia termica refrigerante accumulata nel serbatoio di PCM, mentre la Figura 14 mostra le medie orarie della potenza refrigerante generata dal chiller, nel caso con parzializzazione del flusso. La Figura 14 indica che in questo caso, nonostante il potenziale di accumulo di energia refrigerante sia più alto rispetto a quello relativo al dimensionamento effettuato nella fase di pre-

design, il peak-shaving è ben più basso sia rispetto ai calcoli del pre-design che rispetto all'effetto ottenuto con il serbatoio di accumulo con acqua e PCM macro-incapsulato. Ciò è legato a una relativamente bassa potenza termica scambiata tra il fluido termovettore all'interno dei tubi del fascio tubiero ed il PCM nel serbatoio, sovrastimata nella fase di pre-design. La potenza elettrica di picco del chiller in questo caso risulta essere circa 1,3 kW<sub>e</sub>, più bassa del 19% rispetto alla potenza di picco del chiller nel caso senza accumulo del freddo.

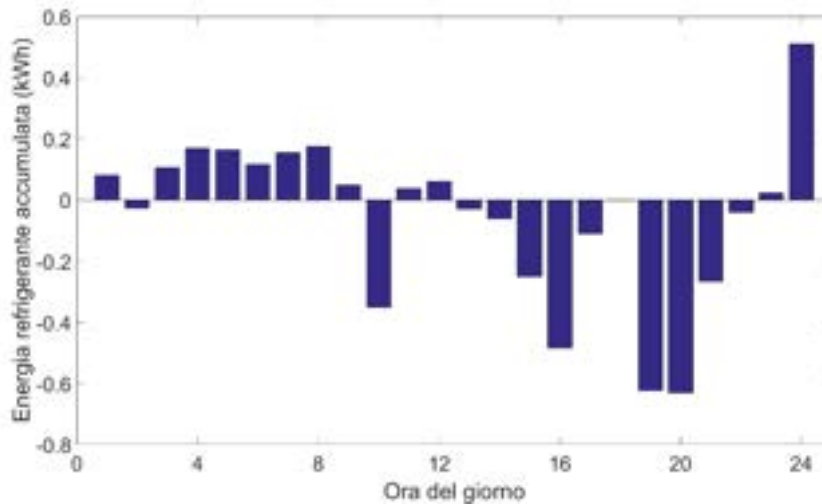


Figura 13. Medie orarie dell'energia termica refrigerante accumulata dal serbatoio.

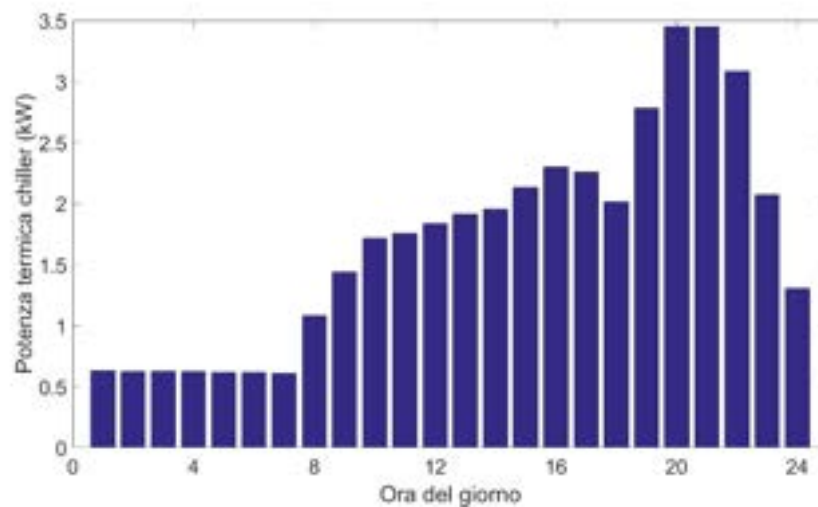


Figura 14. Medie orarie della potenza termica refrigerante generata dal chiller.

## 2.2. Funzionamento senza parzializzazione del flusso

La Figura 15 e la Figura 16 mostrano, rispettivamente, le medie orarie dell'energia termica refrigerante accumulata nel serbatoio di PCM, e le medie orarie della potenza refrigerante generata dal chiller, nel caso senza parzializzazione del flusso. Si può notare, in questo caso, che l'energia refrigerante accumulata è maggiore rispetto al caso con parzializzazione, poiché durante il caricamento tutta la portata di fluido termovettore è indirizzata nel sistema di accumulo, con una conseguente maggiore efficienza di scambio termico rispetto al caso con parzializzazione. Tuttavia, la bassa efficienza dello scambio termico durante lo scaricamento comporta, anche in questo caso, un relativamente basso peak-shaving, paragonabile a quello ottenuto con la parzializzazione del flusso.

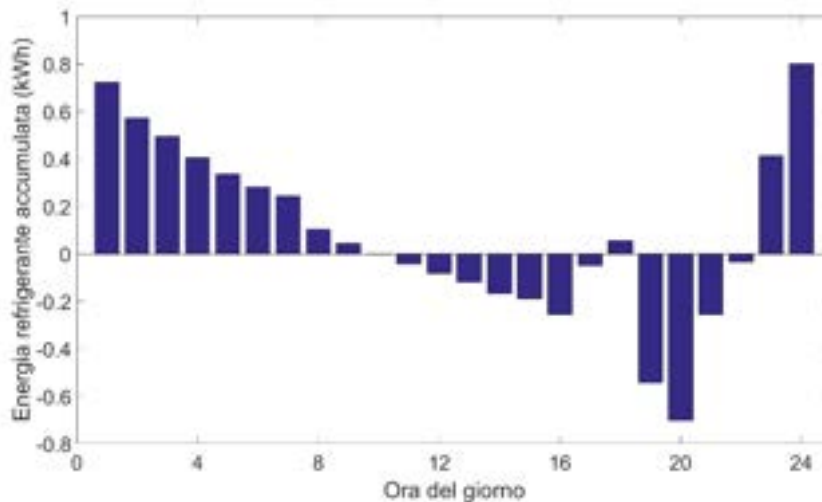


Figura 15. Medie orarie dell'energia termica refrigerante accumulata dal serbatoio.

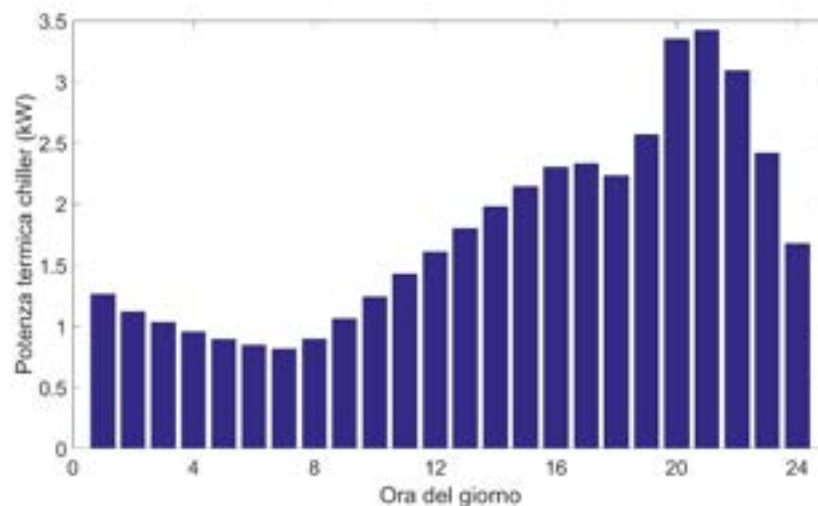


Figura 16. Medie orarie della potenza termica refrigerante generata dal chiller.

### 3. Stime economiche

Per quanto riguarda gli aspetti economici, i costi d'investimento relativi al chiller, alla circuiteria, ai componenti elettrici, a quelli per l'automazione, ed ai sistemi di accumulo del freddo sono stati valutati sulla base dei prezzi relativi al mercato italiano, fatta eccezione per il materiale a cambiamento di fase, per il quale in Italia al momento non ci sono né produttori né venditori. Relativamente al prezzo di mercato del chiller idronico a compressione di vapore con potenza refrigerante modulabile tramite inverter, questo chiaramente dipende dalle dimensioni del chiller. La dimensione minima presente sul mercato, in termini di potenza elettrica nominale del chiller, è pari a 2 kW<sub>e</sub>, a un costo medio che può essere assunto pari a 2.500 €, inclusi installazione e collaudo. In tutti i casi analizzati, la potenza elettrica assorbita dal chiller è risultata essere inferiore rispetto alla dimensione minima presente sul mercato. Pertanto in ognuno dei casi analizzati il costo del chiller è stato estrapolato in base al costo del chiller da 2 kW<sub>e</sub>. Inoltre, nella valutazione dei costi, nel caso senza accumulo la potenza nominale del chiller è stata sovradimensionata del 20% rispetto al valore calcolato, al fine di far fronte ai picchi di potenza refrigerante che si possono verificare in giornate particolarmente calde in cui le temperature ambientali sono più alte rispetto alle medie utilizzate per la stima dei carichi di refrigerazione dell'utenza considerata. Anche in ognuno dei casi con accumulo del freddo la potenza nominale del chiller è stata sovradimensionata del 20% rispetto al valore calcolato. Ciò al fine di

poter far fronte a lunghi periodi in cui le temperature ambientali sono più alte rispetto ai valori medi considerati.

Relativamente ai serbatoi di accumulo utilizzati, il serbatoio cilindrico da 400 litri isolato termicamente impiegato nel caso di accumulo del freddo con acqua e PCM macro-incapsulato non è destinato ad immagazzinare acqua potabile, per cui il suo costo è molto più basso rispetto ai classici boiler con scambiatori tipicamente abbinati a pannelli solari termici. Il suo costo medio può essere assunto pari a 500 €, con un costo d'installazione pari a 100 €. Nel caso di accumulo con soltanto PCM, ovvero nel caso con il serbatoio di accumulo con mantello in plexiglass, trattandosi di un serbatoio realizzato *ad-hoc* e non di tipo commerciale, non è stato possibile individuare un valore medio di mercato.

Infine, per quanto riguarda il costo del materiale a cambiamento di fase, attualmente il costo è di 8 €/kg, mentre il costo del contenitore da 1 litro può essere assunto pari a 0,5 €.

La Tabella 1 mostra i costi d'investimento relativi ai vari casi analizzati. Si può notare che, per quanto riguarda il sistema di accumulo avente soltanto PCM come materiale di accumulo, pur non avendo addizionato il costo del serbatoio di accumulo, il costo d'investimento totale è il più alto tra i casi considerati, e ciò è dovuto sia all'elevato costo del materiale a cambiamento di fase, sia al relativamente basso peak-shaving che non permette un sostanziale sottodimensionamento del chiller nel caso in esame.

Relativamente ai casi con l'accumulo del freddo costituito dal serbatoio con acqua e PCM macro-incapsulato, il caso migliore dal punto di vista economico è quello senza la parzializzazione del flusso all'accumulo, nonostante il caso migliore in termini di peak-shaving sia quello con flusso parzializzato. Ciò si spiega considerando che entrambi i casi presentano la stessa ipotetica taglia commerciale del chiller, e che nel caso con parzializzazione, nonostante attualmente siano presenti sul mercato controller abbastanza abordabili dal punto di vista economico, come ad esempio quelli utilizzati in ambito della domotica, il costo della circuiteria e dell'automazione è notevolmente più alto.

**Tabella 1. Costi d'investimento dei casi analizzati**

	Potenza elettrica di picco assorbita dal chiller (kW)	Potenza nominale chiller (kW)	Costo chiller (€)	Costo serbatoio di accumulo + installazione (€)	Costo PCM e contenitori (€)	Costo circuiteria, componenti elettrici e automazione (€)	Costo totale (€)
Caso senza accumulo	1,92	2,0	2.500	0	0	300	2.800
Accumulo con acqua+PCM e flusso parzializzato	1,34	1,5	1.875	600	844	600	3.919
Accumulo con acqua+PCM e flusso non parzializzato	1,44	1,5	1.875	600	844	300	3.619
Accumulo con PCM e flusso non parzializzato	1,56	2,0	2.500	?	1.287	300	4.087

Prendiamo ora in considerazione soltanto il caso migliore dal punto di vista economico tra quelli con accumulo del freddo, ovvero il caso con acqua e PCM macro-incapsulato senza parzializzazione del flusso all'accumulo, per confrontarlo con il caso senza accumulo. Per quanto riguarda il consumo giornaliero di energia elettrica per il raffrescamento ambientale, questo è praticamente lo stesso nei due casi con e senza accumulo, e ciò si spiega considerando che, nel caso con accumulo, l'aliquota di energia elettrica necessaria per far fronte alle perdite termiche relative al serbatoio di accumulo è compensata dal maggiore consumo di elettricità durante le ore notturne, a un EER più elevato. Inoltre, nel caso senza accumulo, sarebbe necessario disporre di una potenza elettrica di picco disponibile superiore a 3 kW al fine di evitare probabili distacchi temporanei della corrente durante le ore di punta. Ciò comporterebbe un costo fisso annuale, relativo alla quota potenza, di circa 150 €, che viene evitato nel caso con accumulo. Quindi, per l'utenza considerata, l'installazione di un chiller idronico a compressione di vapore, integrato con il sistema di accumulo del freddo con acqua e PCM macro-incapsulato senza parzializzazione del flusso all'accumulo, comporterebbe un costo di investimento più alto rispetto al caso senza accumulo di 819 €. Ciononostante, a causa del costo fisso annuale evitato di 150 €, nel caso con accumulo il maggiore investimento iniziale ritornerebbe in circa sei anni, applicando un tasso di interesse del 5%. Si precisa che nel calcolo del periodo di ritorno dell'investimento non sono stati considerati i costi relativi alla manutenzione, ipotizzando che le differenze tra i casi con e senza accumulo siano trascurabili.

Il periodo di ritorno di sei anni testé calcolato non è molto alto se si considera che la vita media di tale tipologia di impianti è di 20 anni. Inoltre, c'è da considerare che, come riportato nel capitolo dei risultati, il serbatoio di accumulo del freddo con acqua e PCM macro-incapsulato analizzato sperimentalmente non consente lo sfruttamento di tutto il potenziale di accumulo del materiale a cambiamento di fase, ma soltanto di un terzo di esso. L'impiego dell'intero potenziale del PCM, ottenibile tramite contenitori con un maggiore rapporto superficie/volume, e/o tramite additivi per il miglioramento delle caratteristiche di scambio termico all'interno del PCM, soluzione quest'ultima attualmente molto studiata dalla letteratura specializzata, potrebbe rendere molto conveniente dal punto di vista economico l'impiego di tale tipologia di sistemi di accumulo del freddo in ambito residenziale nel breve/medio periodo.

## 4. Conclusioni

In questo report sono stati analizzati i risultati ottenuti dall'ENEA nel corso del periodo di estensione del progetto RdS PAR 2015-2017 (progetto d.1 obiettivo b), riguardanti l'utilizzo di materiale a cambiamento di fase (PCM) come materiale di accumulo per sistemi di accumulo del freddo innovativi per applicazioni residenziali. In questo periodo sono stati effettuati altri test sperimentali, nei quali sono state impiegate diverse quantità di PCM, ad integrazione e completamento dei test effettuati nel corso della terza annualità del progetto. In particolare, sono state effettuate diverse prove sperimentali utilizzando un serbatoio d'acqua da 400 litri con 120 bottiglie da 1 litro parzialmente riempite con PCM, ed il serbatoio col mantello in plexiglass isolato termicamente, descritto nel report relativo al PAR 2017. Tutti i casi simulati sperimentalmente fanno riferimento all'applicazione dei sistemi di accumulo del freddo ad un'utenza residenziale italiana rappresentata da una casa monofamiliare.

I risultati ottenuti con il serbatoio contenente acqua e PCM macro-incapsulato come materiali di accumulo hanno evidenziato l'effetto di "peak-shaving" dovuto alla presenza dell'accumulo del freddo, tuttavia tale effetto risulta sottodimensionato rispetto alle stime realizzate in fase di dimensionamento del serbatoio poiché le prove sperimentali effettuate non hanno permesso di sfruttare appieno il potenziale di accumulo del PCM, ma soltanto un terzo di esso.

I risultati ottenuti con il serbatoio di PCM con mantello in plexiglass hanno evidenziato che il peak-shaving è ben più basso sia rispetto ai calcoli del pre-design che rispetto all'effetto ottenuto con il serbatoio di accumulo con acqua e PCM macro-incapsulato. Ciò è legato a una relativamente bassa potenza termica

scambiata tra il fluido termovettore all'interno dei tubi del fascio tubiero ed il PCM nel serbatoio, sovrastimata nella fase di pre-design.

Infine, per quanto riguarda le stime economiche, i risultati ottenuti hanno indicato che l'impiego in ambito residenziale del serbatoio di accumulo del freddo con acqua e PCM macro-incapsulato potrebbe rappresentare una soluzione conveniente dal punto di vista economico nel breve/medio periodo.