



Ricerca di Sistema elettrico

## Studio ed analisi dei materiali a cambiamento di fase per l'accumulo del freddo e delle relative applicazioni

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

STUDIO ED ANALISI DEI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE PER L'ACCUMULO DEL FREDDO E DELLE  
RELATIVE APPLICAZIONI

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

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

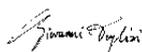
Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: EFFICIENZA ENERGETICA E RISPARMIO DI ENERGIA NEGLI USI FINALI ELETTRICI E INTERAZIONE CON ALTRI VETTORI ENERGETICI

PROGETTO: TECNOLOGIE PER COSTRUIRE GLI EDIFICI DEL FUTURO

OBBIETTIVO: B. RETI TERMICHE DISTRIBUITE

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA



## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 BACKGROUND.....	5
1.2 L'IMPORTANZA DEI SISTEMI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA.....	5
1.3 ACCUMULO DELL'ENERGIA TERMICA.....	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
3 MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE PER L'ACCUMULO DEL FREDDO.....	7
4 APPLICAZIONI RELATIVE ALL'ACCUMULO DEL FREDDO CON PCM.....	12
4.1 SISTEMI ATTIVI.....	13
4.1.1 <i>Sistemi di Free cooling</i> .....	13
4.1.2 <i>Sistemi di condizionamento/ventilazione dell'aria con PCM</i> .....	16
4.1.3 <i>Sistemi di raffrescamento ad assorbimento</i> .....	19
4.2 SISTEMI PASSIVI.....	20
5 ACCUMULO DEL FREDDO CON SISTEMI ACQUA/GHIACCIO.....	24
5.1 SISTEMI DI ACCUMULO DEL GHIACCIO.....	24
5.1.1 <i>Sistemi Ice Harvesting</i> .....	24
5.1.2 <i>Sistemi Ice Slurry</i> .....	25
5.1.3 <i>Sistemi external ice on coil</i> .....	26
5.1.4 <i>Sistemi internal ice on coil</i> .....	26
5.1.5 <i>Sistemi con Ghiaccio Incapsulato</i> .....	27
6 CONSIDERAZIONI FINALI.....	29
7 ATTIVITÀ SPERIMENTALE FUTURA.....	30
8 CONCLUSIONI.....	31
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	32
10 INDICE DELLE FIGURE.....	36

## Sommario

Il costante aumento della domanda energetica, a cui si sta assistendo negli ultimi anni, pone come obiettivo prioritario il contenimento dei consumi energetici e l'incremento delle efficienze di generazione. In un settore come quello edilizio, responsabile di circa il 40% dei consumi energetici globali e di circa il 30% delle emissioni di gas serra, risulta, quindi, indispensabile agire sui sistemi di conversione al fine di determinare una gestione ottimizzata dell'energia. In ambito edilizio il maggior contributo, in termini di consumi, è dato senz'altro dai sistemi di condizionamento dell'aria, il cui utilizzo, nell'ultimo decennio, ha interessato in modo molto spinto anche la stagione estiva. In tale contesto, l'utilizzo dei sistemi di accumulo dell'energia frigorifera, grazie alla possibilità di accumulare freddo nelle ore in cui la richiesta è più bassa e di utilizzarlo nelle ore in cui questa è massima, determinano un forte incremento dell'efficienza dei sistemi a cui sono abbinati, traducendosi in una riduzione dei costi e un abbattimento delle emissioni inquinanti.

I sistemi di accumulo dell'energia frigorifera a calore latente offrono un grande potenziale in termini di risparmio energetico, determinando, inoltre, un incremento della flessibilità operativa e una riduzione delle taglie dei sistemi di generazione. Tali sistemi di accumulo, grazie all'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase (PCM), consentono elevate capacità di accumulo in volumi relativamente ridotti.

Nei paragrafi che seguono sono riportati i risultati dell'attività di studio ed analisi dei materiali a cambiamento di fase utilizzati per l'accumulo del freddo e delle relative applicazioni. Nel dettaglio le attività svolte sono state le seguenti:

- studio dei PCM commerciali e non, più in uso per l'accumulo del freddo;
- studio delle principali applicazioni dei PCM nell'ambito dell'accumulo del freddo, sia in sistemi attivi che passivi;
- studio dei sistemi di accumulo con ghiaccio.

Dall'analisi svolta è emerso che i PCM più utilizzati in applicazioni di accumulo del freddo, sono quelli paraffinici, in virtù degli ampi range di temperatura offerti e delle elevate capacità di accumulo. Tuttavia, sono molto diffuse anche le applicazioni che vedono l'utilizzo di Sali idrati, acidi grassi e acqua. Inoltre, è emerso che la principale applicazione dei PCM per l'accumulo del freddo è relativa al peak shaving e peak leveling del carico elettrico relativo alla copertura della domanda energetica per il condizionamento estivo.

L'analisi condotta ha permesso di individuare i PCM più idonei ad applicazioni in ambito residenziale. L'attività svolta, infatti, è finalizzata alla realizzazione di un apparato sperimentale indirizzato al confronto delle performance di un sistema di accumulo con serbatoio a calore sensibile, con un sistema di accumulo con serbatoio a calore latente, entrambi abbinati ad una tipica utenza residenziale italiana. Nell'ultima fase delle attività, descritta nel paragrafo 6, è stata quindi effettuata un'analisi di mercato dei PCM oggi commercializzati, al fine di individuare i materiali più idonei ad applicazioni nel settore residenziale, in termini di costo e disponibilità sul mercato.

# 1 Introduzione

## 1.1 Background

Il settore edilizio è responsabile di circa il 40% dei consumi energetici mondiali e del 30% delle emissioni annuali di gas serra [1]. Per tale motivo, la riduzione dei consumi energetici in questo settore rappresenta un obiettivo prioritario per l'Unione Europea, la quale, con le direttive sulle performance energetiche degli edifici, di cui ultima EPBD 2010/31/CE, impone agli Stati Membri determinati requisiti di prestazione energetica degli edifici. Considerando che, la maggior parte dei consumi energetici degli edifici è dovuta ai sistemi di ventilazione, riscaldamento e raffrescamento dell'aria [2], risulta indispensabile agire su questi ultimi, al fine di avere un utilizzo più efficiente dell'energia e una sua conseguente più spinta conservazione.

La suddetta necessità di risparmio energetico, strettamente connessa all'incremento dell'efficienza energetica dei dispositivi in gioco, ha comportato lo sviluppo di varie tecnologie in grado di offrire una migliore gestione dei sistemi HVAC (Heat Ventilation Air conditioning and Cooling) [3]. Tra queste, una delle più efficienti è senza dubbio rappresentata dai sistemi di accumulo dell'energia termica (TES - thermal energy storage system) [4].

## 1.2 L'importanza dei sistemi di accumulo dell'energia

Le richieste energetiche e la disponibilità di alcune fonti di produzione dell'energia, sono, in genere, caratterizzate da una forte variabilità su base giornaliera, settimanale, e stagionale, risultando spesso non sincronizzate tra loro. La necessità di soddisfare domande fortemente variabili induceva, nel passato, all'utilizzo di sistemi di conversione sufficientemente grandi da coprire anche quelle richieste di picco molto elevate rispetto ai carichi di base, comportando costi di investimento elevati e sistemi parzialmente inefficienti, in quanto operanti a capacità ridotte rispetto a quelle nominali, per gran parte del tempo.

Oggi, tali costi sono in parte abbattuti grazie all'utilizzo di tecniche di *load-management*, in grado di livellare i picchi di potenza richiesta, e all'integrazione di sistemi di accumulo dell'energia (ES) che consentono l'utilizzo di sistemi di generazione più piccoli. L'integrazione degli ES consente, ai sistemi di generazione di operare a capacità prossime a quelle nominali, indipendentemente dalla richiesta energetica istantanea dell'utente, e che l'energia convertita in eccesso durante le ore di base della richiesta sia accumulata ed utilizzata successivamente nelle ore di picco.

L'utilizzo degli ES offre numerosi vantaggi, quali:

- riduzione dei costi energetici;
- riduzione dei consumi;
- aumento delle condizioni di comfort degli ambienti interni;
- aumento della flessibilità operativa;
- riduzione dei costi di investimento e di manutenzione;
- riduzione della taglia degli impianti;
- utilizzo più efficiente ed efficace degli impianti;
- conservazione delle fonti fossili, grazie ad un utilizzo finale dell'energia più efficiente;
- riduzione delle emissioni inquinanti.

Il potenziale offerto dagli ES è, quindi, notevole. Tuttavia, per massimizzarne i benefici, è necessaria una profonda conoscenza dei singoli sistemi di accumulo disponibili, delle caratteristiche tecniche di questi, e delle condizioni al contorno, in termini di richieste energetiche e disponibilità delle fonti di generazione.

### 1.3 Accumulo dell'energia termica

In generale, i sistemi di accumulo dell'energia termica (TES), se adeguatamente usati, possiedono un elevato potenziale in termini di risparmio energetico [5]. Questi, permettendo di sopperire al mancato sincronismo tra domanda e generazione termica, favoriscono l'aumento dell'efficienza dei sistemi a cui sono abbinati, l'abbattimento dei costi, e la riduzione delle emissioni inquinanti [6] [7]. Nel settore edilizio, il principale scopo dell'utilizzo dei TES, sia del caldo che del freddo, è quello di determinare uno "spostamento" e "abbassamento" del carico dell'utente (load shifting e load leveling). Il beneficio che ne deriva ha una duplice valenza: se la riduzione dei picchi di potenza richiesta, da un lato consente di ridurre il costo di esercizio complessivo degli impianti, dall'altro determina capacità di generazione ridotte e meno variabili nel tempo.

I sistemi di accumulo dell'energia termica più diffusi in ambito residenziale, si dividono in sistemi a calore sensibile, prettamente ad acqua, e in sistemi a calore latente, i quali, sfruttando il fenomeno del passaggio di fase di alcuni materiali, detti materiali a cambiamento di fase (PCM dall'acronimo inglese phase change materials), sono in grado di accumulare grandi quantità di energia termica con ridotti volumi di accumulo, in range di variazione della temperatura molto limitati [8][9] [10].

Il grosso potenziale offerto da questi materiali risiede essenzialmente nelle elevate capacità di accumulo da cui sono caratterizzati. Bisogna, infatti, sottolineare che ciascun sistema di accumulo del calore latente possiede sempre anche un'aliquota di stoccaggio del calore sensibile, cosa che determina capacità di accumulo nettamente superiori rispetto a quelle dei materiali tipicamente utilizzati. Basti pensare che la capacità di accumulo sensibile di materiali da costruzione come cemento o gesso varia approssimativamente tra 0.75 e 1 kJ/kg/K, mentre quello latente di alcuni materiali paraffinici, soggetti al passaggio di fase, è di circa 110 kJ/kg. Tale peculiarità dei PCM consente di accumulare una maggior quantità di calore, o meglio, a parità di calore accumulato, di utilizzare volumi di accumulo molto ridotti [11]. Inoltre, per effetto del passaggio di fase, i PCM mantengono nelle fasi di carica e scarica temperature pressoché costanti, consentendo, una volta effettuata un'oculata scelta dello specifico materiale, di mantenere la temperatura dell'aria interna o dei fluidi refrigeranti ai valori desiderati per un elevato numero di cicli.

L'utilizzo dei PCM in applicazioni per l'accumulo del caldo, e i vantaggi e i limiti del loro utilizzo in questo ambito, sono, da anni, molto discussi in letteratura ed ormai ben noti. Con la presente trattazione si vuole, invece, focalizzare l'attenzione sulle potenzialità offerte dai PCM nell'ambito dell'accumulo del freddo, al fine di evidenziarne le principali caratteristiche e limiti, nonché presentarne le principali applicazioni.

## 2 Descrizione delle attività svolte

A valle di questa breve introduzione dei vantaggi dei sistemi di accumulo e delle principali caratteristiche dei TES, si procederà, quindi, con la descrizione delle attività svolte nel primo anno, focalizzate sullo studio e sull'analisi dei materiali a cambiamento di fase per l'accumulo del freddo e delle principali applicazioni. Nel dettaglio, l'attività è stata organizzata in quattro fasi successive, di seguito brevemente descritte.

- *Prima fase:* studio e analisi dei materiali a cambiamento di fase per l'accumulo del freddo. In questa fase si è proceduto analizzando i PCM in uso e/o oggetto di studio, nell'ambito del accumulo del freddo, al fine di analizzarne e comprenderne le principali caratteristiche e potenzialità. L'analisi ha permesso di evidenziare i principali vantaggi derivanti dall'utilizzo dei suddetti materiali per la specifica applicazione, nonché i principali limiti, mostrando, inoltre, come questi siano in parte superabili grazie ad interventi mirati.
- *Seconda fase:* studio e analisi delle principali applicazioni dei PCM per l'accumulo del freddo nel settore edilizio. Nel secondo periodo ci si è focalizzati sullo studio delle principali applicazioni che vedono l'impiego di PCM per l'accumulo del freddo nel settore edilizio. L'attenzione è stata,

quindi, diretta sia sui sistemi attivi, con serbatoio e non, sia sui sistemi passivi, in modo da evidenziare come praticamente tali materiali siano in grado di apportare benefici in termini di risparmio energetico per il raffrescamento degli ambienti interni.

- *Terza fase:* studio dei sistemi di accumulo del freddo ad acqua/ghiaccio. In questa fase si è proceduto con lo studio dei sistemi di accumulo del freddo con ghiaccio. I sistemi con ghiaccio, seppur di non facile applicazione in un settore come quello residenziale, possono offrire un importante contributo all'abbattimento dei carichi di raffrescamento dell'edificio. In questo periodo si sono analizzati i vari metodi di accumulo con ghiaccio e studiate le principali applicazioni.
- *Quarta fase.* L'ultima fase si è focalizzata sull'individuazione di un caso studio rappresentativo del contesto residenziale italiano, ai fini di un'attività sperimentale. Per tale motivo, è stata effettuata un'analisi di mercato dei PCM oggi commercializzati, al fine di individuare i materiali più idonei ad applicazioni nel settore residenziale, in termini di costo e disponibilità sul mercato. Quest'ultima fase è brevemente descritta nell'ultimo capitolo, in cui è, inoltre, anticipata la futura attività sperimentale sulla quale si lavorerà nelle prossime annualità.

### 3 Materiali a cambiamento di fase per l'accumulo del freddo

Di seguito, è riportata una rassegna critica dello stato dell'arte dei materiali a cambiamento di fase utilizzati per l'accumulo del freddo. Lo scopo di tale studio è stato quello di analizzare e comprendere le principali caratteristiche e potenzialità offerte da questi materiali, e di fornire un supporto decisionale in merito alla scelta di uno o più materiali da utilizzare in specifiche applicazioni. In particolar modo, l'analisi è stata mirata all'identificazione di quei materiali le cui caratteristiche, in termini di capacità di accumulo e range di fusione, siano in grado di soddisfare le esigenze di accumulo del freddo nel settore residenziale. In questo settore, il materiale da selezionare deve avere una temperatura di passaggio di fase compresa nell'intervallo 5-8°C, in modo da poter essere caricato e scaricato dai tipici chiller commerciali utilizzati nel settore residenziale. Quando, invece, il PCM è integrato nell'involucro edilizio, la scelta del materiale deve essere coerente con i valori di temperatura degli ambienti interni, e quindi il PCM selezionato deve presentare valori della temperatura di passaggio di fase compresi nel range 20-28°C, al fine di garantire buone condizioni di comfort abitativo.

I sistemi con PCM si dividono in sistemi in cui il passaggio di fase avviene secondo quattro stati: solido-solido, solido-liquido, gas-solido e gas-liquido. Per una serie di limiti tecnici [12] [13], nel settore edilizio gli unici sistemi utilizzati sono quelli solido-liquido. I PCM presenti in commercio sono molteplici e con differenti range di fusione, tuttavia i più comunemente usati sono i PCM organici, inorganici ed eutettici. In Figura 1 ne è mostrata una tipica classificazione [14].

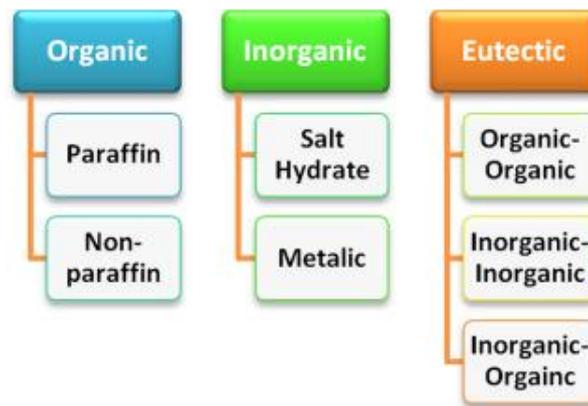


Figura 1. Classificazione dei PCM [14].

I PCM organici sono caratterizzati da elevate capacità di accumulo, temperature di passaggio di fase idonee alle applicazioni in ambito edilizio e ottime caratteristiche chimiche e fisiche. I principali limiti dei composti organici puri risiedono nei bassi valori della conducibilità termica, di solito inferiore ai  $0.2 \text{ W/m}^2/\text{K}$  [15], nell'elevata variazione di volume durante la solidificazione e nella possibilità che si verifichino infiltrazioni di liquido durante il passaggio di fase [16]. Essi presentano il vantaggio di non mostrare azioni corrosive nei confronti dei materiali contenitori e sono caratterizzati da una fusione congruente. I PCM organici si dividono in paraffinici e non paraffinici.

I PCM paraffinici hanno range di fusione molto elevati, tra  $-12^\circ\text{C}$  e  $71^\circ\text{C}$ , con capacità di accumulo comprese tra  $128 \text{ kJ/kg/K}$  e  $198 \text{ kJ/kg/K}$ . Tali materiali sono senza dubbio i più diffusi nel settore edilizio, non essendo corrosivi e non essendo soggetti al fenomeno del sottoraffreddamento (fenomeno secondo il quale il PCM inizia a solidificare a temperature più basse rispetto alla sua temperatura di fusione/solidificazione). Inoltre le paraffine non sono tossiche e risultano economiche. Tuttavia, possono essere infiammabili e non compatibili con contenitori di plastica, utili per il contenimento del materiale. Il maggiore limite di tali materiali risiede, comunque, nei bassi valori della conducibilità termica, che limita la vera diffusione delle paraffine se utilizzate pure [17] [18].

I composti non paraffinici sono diversi e caratterizzati da proprietà anche molto variabili tra loro. Sono, per questo, tra i più utilizzati nell'ambito dell'accumulo termico con serbatoio [19]. Tra questi vi sono alcoli, eteri, glicoli e acidi grassi. Tra i PCM non paraffinici, i più diffusi, per le applicazioni di accumulo del freddo, sono gli acidi grassi, in virtù delle ottime caratteristiche, quali elevate capacità di accumulo, basso sottoraffreddamento e nessuna segregazione di fase a diverse temperature; inoltre, possono essere utilizzati in diversi climi e condizioni [20]. Essi sono caratterizzati da buone proprietà di fusione e congelamento, tuttavia, rispetto alle paraffine presentano costi molto elevati e possono essere corrosivi.

I PCM inorganici hanno elevate capacità di accumulo per unità di massa con costi relativamente ridotti, non sono soggetti al fenomeno del sottoraffreddamento, alla perdita di stabilità, non sono corrosivi e non si decompongono [21]. Tuttavia, di solito, si presentano infiammabili. Questa categoria include soluzioni saline, metalli e sali idrati che sono i più diffusi e studiati nell'ambito dell'accumulo termico con serbatoio. Essi sono, infatti, caratterizzati da elevate densità di accumulo ( $\sim 350 \text{ MJ/m}^3$ ), elevata conducibilità termica ( $0.5 \text{ W/m/K}$  [22]) e basso costo rispetto agli altri PCM [23].

Infine, vi sono i PCM eutettici, i quali sono caratterizzati dalla combinazione di due o più PCM, miscelati al fine di ridurre la temperatura di fusione. La fusione e la solidificazione delle miscele eutettiche avvengono generalmente senza segregazione. Tali PCM sono spesso scelti in virtù della loro grande disponibilità sul mercato e il basso costo.

Orò et al. [19] riportano due interessanti elenchi relativi ai PCM utilizzati nell'ambito dell'accumulo del freddo. Il primo, mostrato in Figura 2a, 2b, 2c, è relativo ai materiali non commerciali studiati in letteratura per potenziali applicazioni, ed alle loro proprietà (temperatura di fusione, calore latente di fusione, conducibilità termica e densità). Il secondo, mostrato in Figura 3 riporta, invece, un elenco di PCM per l'accumulo del freddo oggi commercializzati con le loro principali proprietà.

Composition	Type	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
24.8 wt.% HCl	Eutectic water-salt solution	-86	-73.77 (kJ/mol)	-	-
24 wt.% LiCl	Eutectic water-salt solution	-67	-36.26 (kJ/mol)	-	-
30.5 wt.% CaCl <sub>2</sub>	Eutectic water-salt solution	-49.5	-76.81 (kJ/mol)	-	-
21.01 wt.% MgCl <sub>2</sub>	Eutectic water-salt solution	-33.5	-36.30 (kJ/mol)	-	-
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (30.5 wt.%) + H <sub>2</sub> O	Eutectic water-salt solution	-30.6	131	-	1283 (l) 1251 (s)
27.9wt% Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Eutectic water-salt solution	-23	-26.10 (kJ/mol)	-	-
NaCl (22.4 wt.%) + H <sub>2</sub> O	Eutectic water-salt solution	-21.2	222	-	1165 (l) 1108 (s)
23.3 wt.% NaCl	Eutectic water-salt solution	-21.2	233 (5.0) (kJ/mol)	-	-
0.8 wt.% NaCl	Eutectic water-salt solution	-	235	-	-
4.3 wt.% NaCl	Eutectic water-salt solution	-	231	-	-
8.4 wt.% NaCl	Eutectic water-salt solution	-	233	-	-
26.3 wt.% NaCl	Eutectic water-salt solution	-	234	-	-
19.7 wt.% KCl	Eutectic water-salt solution	-10.6	18.43 (kJ/mol)	-	-
Diethylene glycol	Eutectic	-10	247	-	1200 (l)
6 wt.% KCl + H <sub>2</sub> O	Inorganic	-10	-	-	-
Dodecane	Organic	-9.6	216	2.21 (l)	-
22.1 wt.% BaCl <sub>2</sub>	Eutectic water-salt solution	-7.7	-10.2 (kJ/mol)	-	-
Triethylene glycol	Organic	-7	247	-	1200 (l)
16.5 wt.% KHCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	Inorganic	-6	-	-	-
18.63 wt.% MgSO <sub>4</sub>	Eutectic water-salt solution	-4.8	-84.96 (kJ/mol)	-	-
Tetradecane + octadecane	Eutectic Organic	-4.02	227.52	-	-
20.5 wt.% NaCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	Inorganic	-3	-	-	-
6.49 wt.% K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Eutectic water-salt solution	-1.55	26.88 (kJ/mol)	-	-
4.03 wt.% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Eutectic water-salt solution	-1.2	-1.07 (kJ/mol)	-	-
H <sub>2</sub> O		0	333	0.6 (l)	998 (l)
		0	333	2.2 (s)	917 (s)
		0	333	0.612	998 (l)

Figura 2a. PCM non commerciali per l'accumulo del freddo [19].

Composition	Type	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
				0.61	
		0	334	0.612	917 (s)
		0	334	0.61	
		0	295	0.486	996 (s)
H <sub>2</sub> O + polyacrylamide	Compound	0	295	0.486	1047 (l)
91.67% tetradecane + 8.33% hexadecane	Eutectic organic	1.7	156.2	-	-
Tetradecane + docosane	Eutectic organic	1.5-5.6	234.33	-	-
Tetradecane + heneicosane	Eutectic organic	3.54-5.56	200.28	-	-
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Salt hydrates	4	109	-	-
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (31 wt.%)	Inorganic eutectic compounds	4	234	-	-
NaCl (13 wt.%)					
KCl (16 wt.%)					
H <sub>2</sub> O (40 wt.%)					
KF 4H <sub>2</sub> O	Paraffin	4.5	165	-	-
Tetrahydrofurano (THF)	Eutectic organic	5	280	-	970 (s)
Microencapsulated 94% tetradecane + 6% tetradecanol	Organic	5.1	202.1	-	-
Microencapsulated 100% tetradecane	Organic	5.2	215	-	-
Microencapsulated 96% tetradecane + 4% tetradecanol	Organic	5.2	206.4	-	-
Bulk 100% tetradecane	Organic	5.5	215	-	-
Bulk 96% tetradecane + 4% tetradecanol	Organic	5.5	206.4	-	-
Bulk 94% tetradecane + 6% tetradecanol	Organic	5.5	202.1	-	-
Paraffin C <sub>14</sub>	Organic	5.5	228	-	-
		4	153	-	-
		4.5	165	-	-
No. of carbon atoms: 14	Paraffin	5.5	228	-	-
n-Tetradecane	Organic	6	230	-	-
		5.8-5.9	258-227	0.210 (s)	-
Pentadecane + heneicosane	Eutectic organic	6.23-7.21	128.25	-	-
Formic acid	Fatty acid	7.8	247	-	-
LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	Inorganic (hydrated salt)	8	253	-	1720 (s)
		8	155	-	1530 (l) 1720 (s)
	Inorganic compounds	8	255	-	-
Polyglycol E400	Organic	8	99.6	0.187 (l)	1125 (l)
		8	100	0.19	1228 (s)
Paraffin C <sub>15</sub> -C <sub>16</sub>	Organic	8	153	-	-
KF 4H <sub>2</sub> O	Paraffin	8	153	-	-
LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	Inorganic	8.1	253	-	-
Pentadecane + octadecane	Eutectic organic	8.5-9.0	271.93	-	-
Pentadecane + docosane	Eutectic organic	7.6-8.99	214.83	-	-
n-Pentadecane	Organic	10	-	-	770 (l)
		9.9	193.9	-	-
No. of carbon atoms: 15	Paraffin	10	205	-	-
ZnCl <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	Inorganic (hydrated salt)	10	-	-	-
Paraffin C <sub>15</sub>	Organic	10	205	-	-
ZnClO <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	Inorganic	10	-	-	-
Tetrabutyl ammoniumbromide (type A-type B)	Organic	10-12	193-199	-	-
Isopropyl palmitate	Organic	11	95-100	-	-
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Inorganic (hydrated salt)	13	-	-	-
		14	109	-	-
90% Capric acid + 10% lauric acid	Organic	13.3	142.2	-	-
38.5% Triethylolethane + 31.5% H <sub>2</sub> O + 30% urea	Organic eutectic	13.4	160	-	-
Isopropyl stearate	Organic	14-18	140-142	-	-
38.5% Trimethylolethane + 31.5% H <sub>2</sub> O + 30% urea	Organic mixture	14.4	160	0.66	1170 (l)
55% CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + 55%CaBr <sub>2</sub> ·6 H <sub>2</sub> O	Inorganic eutectic	14.7	140	-	-
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (45 wt.%) + CaBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (55 wt.%)	Eutectics	14.7	140	-	-
NaOH·3/2H <sub>2</sub> O	Inorganic	15	-	-	-
NaOH·(3/2) H <sub>2</sub> O	Inorganic (hydrated salt)	15	-	-	-
		15.4	-	-	-
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Inorganic	15-25	125.9	-	1738 (l)
NaOH 3l/2H <sub>2</sub> O	Inorganic compounds	16	200	-	-
Propyl palmitate	Organic	16-19	186	-	-
		10	186	-	-
Caprylic acid	Fatty acid	16	148.5	0.149	901 (l)

Figura 1b. PCM non commerciali per l'accumulo del freddo [19].

Composition	Type	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Paraffin C <sub>16</sub>	Organic	16.7	237.1	-	-
Acetic acid	Fatty acid	16.7	184	-	-
45% Capric acid + 55% lauric acid	Organic	17-21	143	-	-
		21	143	-	-
48% Butyl palmitate + 48% butyl stearate + 3% other	Organic mixture	17	140	-	-
45-52% LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O + 48-55% Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Inorganic mixture	17.2	220	-	-
Glycerin	Organic	17.9	198.7	0.143	-
Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	Inorganic	18	-	-	-
Capric acid + lauric acid	Fatty acid mixture	18	120	0.143	-
n-Hexadecane	Organic	18	210	-	760 (l)
		18.1	238	0.21	-
			236	-	-
			211.5	-	-
Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	Inorganic (hydrated salt)	18	-	-	-
65% mol capric acid + 35% mol lauric acid	Fatty acid mixture	18-19.5	140.8	0.143	-
		18	143-148	-	-
KF·4H <sub>2</sub> O	Inorganic (hydrated salt)	18.5	231	-	1447 (l)
n-Heptadecane	Organic	19	240	-	760 (l)
			-	0.21	-
		20.8-21.7	171-172	-	-
61.5% Mol capric acid + 38.5% mol lauric acid	Fatty acid mixture	19.1	132	-	-
Butyl stearate	Organic	19	140	-	760 (l)
		18-23	123-200	0.21	-
Paraffin C <sub>16</sub> -C <sub>18</sub>	Organic	20-22	152	-	-

Figura 1c. PCM non commerciali per l'accumulo del freddo [19].

Name	Type	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Source
-	Salt solution	-50	325	TEAP
SN 33	Salt solution	-33	245	Cristopia
TH 31	Salt hydrate	-31	131	TEAP
MPCM (-30)	Paraffin	-30	140-150	Microtek Laboratories, Inc.
SN 29	Salt solution	-29	233	Cristopia
SN 26	Salt solution	-26	168	Cristopia
-	Salt hydrate	-23	230	TEAP
TH 21	Salt hydrate	-21	222	TEAP
SN 21	Salt solution	-21	240	Cristopia
STL 21	Salt solution	-21	240	Mitsubishi Chemical
ClimSel C-18	Salt solution	-18	306	Climator
SN 18	Salt solution	-18	268	Cristopia
TH 16	Salt solution	-16	289	TEAP
STL 16	Salt solution	-16	-	Mitsubishi Chemical
AN 15	Salt solution	-15	311	Cristopia
AN 12	Salt solution	-12	306	Cristopia
STLN 10	Salt solution	-11	271	Mitsubishi Chemical
AN 10	Salt solution	-11	310	Cristopia
TH 10	Salt solution	-10	283	TEAP
MPCM (-10)	Paraffin	-9.5	150-160	Microtek Laboratories, Inc.
STL 6	Salt solution	-6	284	Mitsubishi Chemical
AN 06	Salt solution	-6	284	Cristopia
RT-4	Paraffin	-4	179	Rubitherm GmbH
TH 4	Salt solution	-4	386	TEAP
SLT 3	Salt solution	-3	328	Mitsubishi Chemical
AN 03	Salt solution	-3	328	Cristopia
-	Salt solution	0	335	TEAP
RT 3	Paraffin	4	198	Rubitherm GmbH
RT 4	Paraffin	4	182	Rubitherm GmbH
-	Salt solution	4	105	TEAP
RT 5	Paraffin	5	198	Rubitherm GmbH
RT 6	Paraffin	6	175	Rubitherm GmbH
MPCM (6)	Paraffin	6	157-167	Microtek Laboratories, Inc.
-	Salt solution	7	300	TEAP
ClimSel C 7	Salt solution	7	130	
		7	158.3	Climator
RT 5	Paraffin	9	205	Rubitherm GmbH
RT 20	Paraffin	8	140	Rubitherm GmbH
-	Salt solution	10	170	TEAP
-	Salt solution	15	175	TEAP
-	Salt solution	18	175	TEAP

Figura 3. PCM commerciali per l'accumulo del freddo [19].

Dallo studio sopra riportato, risulta evidente che i PCM più utilizzati in applicazioni relative all'accumulo del freddo sono le paraffine, i sali idrati e l'acqua. Tuttavia, le applicazioni possibili sono molteplici e le loro performance termiche possono variare fortemente in base alla scelta del materiale. La scelta di un PCM piuttosto che di un altro è, infatti, fortemente dipendente dalla specifica applicazione in esame, e dalla temperatura di esercizio degli impianti (per i sistemi attivi) e dalla temperatura media dell'aria e le condizioni climatiche (per i sistemi passivi). Al fine di comprendere il reale beneficio connesso all'utilizzo dei PCM, risulta, quindi, indispensabile effettuare uno studio critico e puntuale delle possibili applicazioni che vedono l'utilizzo dei PCM per l'accumulo del freddo. Per tale motivo, di seguito sono riportate e descritte le applicazioni più rappresentative relative all'accumulo del freddo realizzato con tali materiali.

## 4 Applicazioni relative all'accumulo del freddo con PCM

Le applicazioni che vedono l'utilizzo dei PCM al servizio della richiesta termica per il raffrescamento, nel settore edilizio, sono molteplici. Essi sono usati integrati in elementi costruttivi dell'edificio (muri, soffitti e pavimenti), installati in sistemi HVAC, o in sistemi di solar cooling. Nel primo caso, in cui il PCM è integrato al fine di incrementare la massa termica dell'edificio, si parla di sistemi passivi, in quanto il raffrescamento è ottenuto solo grazie alla ventilazione naturale ottenuta con l'ingresso di aria esterna. Qualora questo non

fosse possibile per limiti di natura acustica, di inquinamento, o richieste frigorifere troppo elevate, si procede con l'utilizzo di sistemi attivi, ovvero caratterizzati dalla presenza di ventilazione meccanica.

I sistemi attivi risultano di solito di più semplice realizzazione e applicazione rispetto ai sistemi passivi. Quest'ultimi, infatti, nonostante consentano di ridurre i consumi energetici degli edifici in cui sono utilizzati, spesso necessitano, per la loro realizzazione, di interventi invasivi sull'involucro edilizio, e per questo non facilmente praticabili su edifici già esistenti. Lo scopo della presente trattazione è quello di fornire un quadro completo delle potenzialità di risparmio energetico offerto dall'accumulo del freddo con PCM nell'ambito del parco edilizio esistente. Per tale motivo sono trattati, in modo dettagliato, i sistemi attivi con PCM più utilizzati, e per completezza, successivamente, sono descritti i sistemi passivi più rappresentativi.

## 4.1 Sistemi Attivi

In generale, i sistemi di raffrescamento attivi con PCM possono essere suddivisi in tre categorie:

- sistemi di free-cooling;
- sistemi di condizionamento dell'aria con PCM integrati;
- sistemi di raffrescamento ad adsorbimento e assorbimento.

### 4.1.1 Sistemi di Free cooling

Il free-cooling è ottenuto con l'immissione in ambiente di aria esterna, quando questa si trova in condizioni energetiche migliori rispetto all'aria ambiente, ovvero quando l'entalpia dell'aria esterna è inferiore all'entalpia dell'aria ambiente. Di solito ciò accade durante le ore notturne: favorendo l'ingresso dell'aria notturna più fresca, grazie all'ausilio di ventilatori meccanici, è possibile raffrescare l'ambiente interno nelle ore più calde del giorno.

Molti autori hanno valutato l'effetto dell'utilizzo dei PCM in applicazioni di free-cooling, osservando come queste configurazioni possano determinare una riduzione dei carichi di ventilazione e raffrescamento [24] [25] [26].

In Figura 4 è mostrato il sistema di ventilazione notturna con accumulo a PCM a letto fisso proposto da Yanbing et al. [27] al fine di innalzare l'efficienza energetica dell'edificio. Secondo tale scherma, durante la notte, l'aria esterna entra nella cavità in cui sono alloggiati i moduli di PCM, caricandoli. Nelle ore diurne, il freddo accumulato nel PCM viene rilasciato all'aria calda che, proveniente dalla stanza, circola nella cavità. Al fine di analizzare il comportamento termico di tale sistema, gli autori hanno realizzato un modello matematico ed un apparato sperimentale alloggiando 20 pacchetti di PCM (2.4 m × 3 m × 0.12 m), disposti su tre strati, nel soffitto di una camera di 10 m<sup>2</sup>. In totale, il sistema si compone di 2000 capsule contenenti un acido grasso (190 kJ/kg, temperatura di fusione tra 22 °C e 26 °C) sviluppato dagli autori stessi, per un totale di 150 kg di PCM. Gli autori hanno osservato una riduzione della temperatura dell'aria interna e un aumento delle condizioni di comfort.

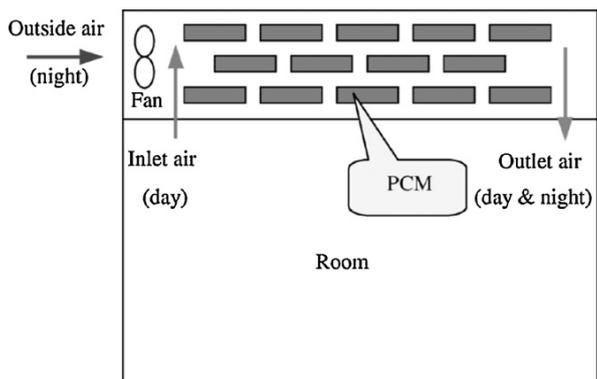


Figura 4. Schema del sistema proposto da Yanbing et al. [27].

Zalba et al. [28] hanno realizzato un sistema di free-cooling (Figura 5a) composto da scambiatori di calore a piastra con 3 kg di PMC (RT25, Rubitherm GmbH, con capacità di accumulo di 28 kWh/m<sup>3</sup>) incapsulato (Figura 5b), al fine di valutare le prestazioni del materiale. Gli stessi autori, al fine di incrementare il basso coefficiente di scambio termico del materiale, in [38] hanno proposto un sistema con scambiatore di calore a piastra con matrice di grafite incapsulata. Confrontando i due sistemi, essi hanno osservato come a parità di spessore delle piastre, il tempo di risposta del sistema con grafite sia più breve del 50%.

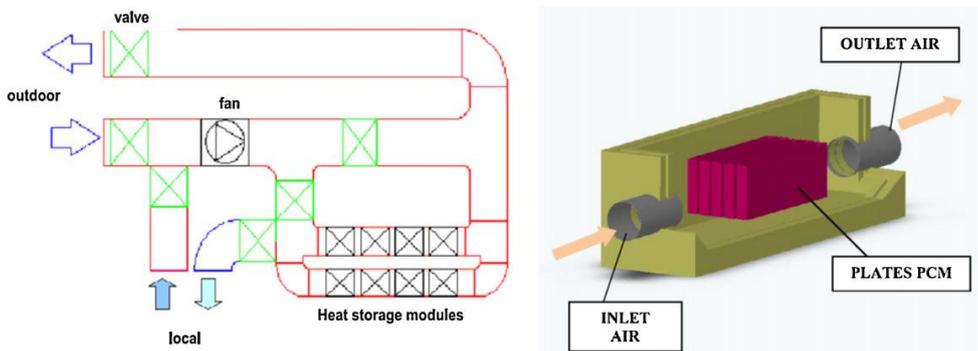


Figura 5. (a) Schema del sistema proposto da Zalba et al., e (b) schema del TES [28].

Takeda et al. [29] hanno sviluppato un sistema di ventilazione basato sullo scambio termico diretto tra PCM e aria. Il materiale, usato in granuli, è composto per il 65% da materiali ceramici e 35% idrocarburi paraffinici, con calore latente di 38 kJ/kg, per un peso totale di 4.59 kg di materiale. Il PCM a letto fisso è installato verticalmente in un condotto d'aria, posto sotto al pavimento, in cui si carica o scarica per effetto del passaggio di aria in determinate condizioni (Figura 6). Gli autori hanno condotto l'analisi variando periodicamente la temperatura dell'aria in ingresso tra 21.5 °C e 28 °C, e misurando la temperatura della stessa in uscita, mostrando come quest'ultima resti sempre compresa nel range di temperatura a cui avviene il passaggio di fase. A valle di ciò, mediante simulazione, gli autori hanno valutato il potenziale di tale sistema in termini di riduzione del carico di ventilazione estivo per otto città giapponesi, mostrando come la massima riduzione (62.8%) si verifichi nella città di Kyoto.

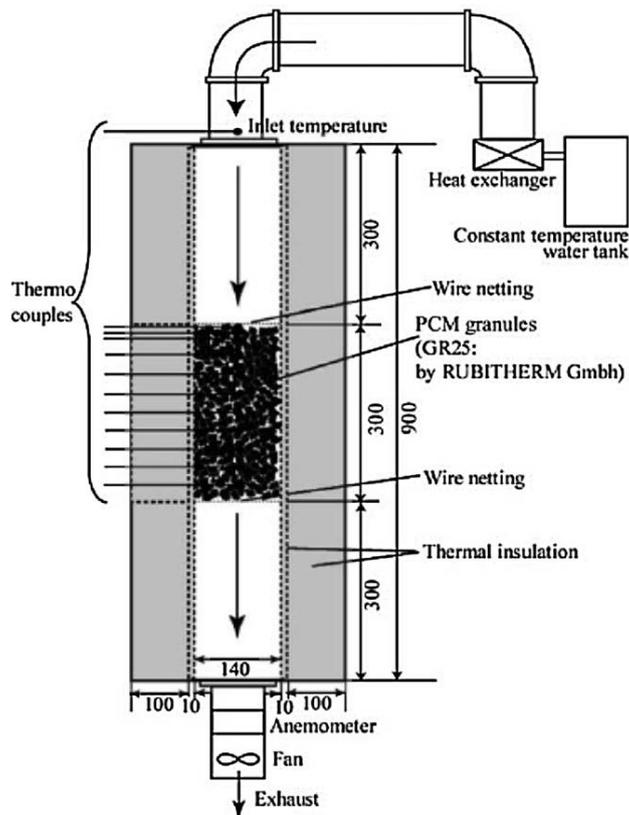


Figura 6. Schema dell'apparato sperimentale proposto da Takeda et al. [29].

Waqas and Kumar [30] hanno valutato le performance termiche di un'unità di accumulo a circuito aperto (Figura 7), composta da 13 kg di PCM (SP29, Rubitherm GmbH) incapsulato in container di acciaio galvanizzato di dimensioni  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ , e installata in un ambiente controllato, caratterizzato da condizioni ambientali tipiche dei climi caldi e secchi. Gli autori hanno valutato l'effetto della variazione della portata d'aria e della sua temperatura sulla capacità di accumulo del PCM, mostrando come una riduzione della temperatura da  $22^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$ , comporti una riduzione del tempo necessario a completare la fase di carica del PCM del 33%. L'aumento della portata d'aria da  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , invece, riduce il tempo di carica del 16%. Inoltre studi sperimentali hanno mostrato come la fase di carica si completi più velocemente considerando più bassi valori della temperatura dell'aria e portate più elevate.

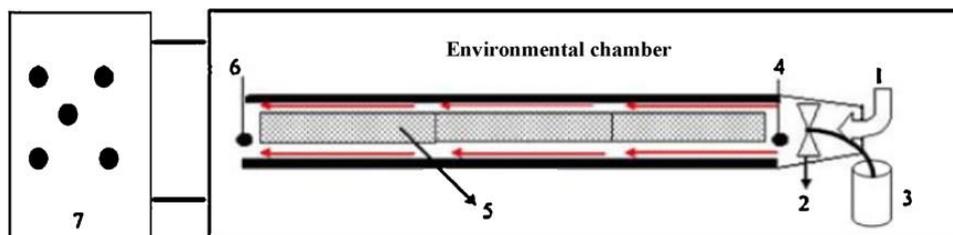


Figura 7. Schema dell'unità a PCM utilizzata da Waqas and Kumar [30].

Arkar et al. [31] hanno valutato, con il software TRNSYS, l'efficienza del free-cooling in due edifici a basso consumo energetico, uno pesante e l'altro leggero. Il sistema proposto prevede l'integrazione all'interno di un sistema di ventilazione meccanica, di due unità di accumulo con PCM (RT20, Rubitherm GmbH) incapsulato a sfere, utilizzato per raffreddare l'aria di alimentazione, e l'aria interna di ricircolo. I risultati mostrano che la massa totale di PCM utilizzato per unità di superficie nelle due unità è pari a  $6.75 \text{ kg/m}^2$  nell'edificio pesante, e a  $13.5 \text{ kg/m}^2$  nell'edificio leggero. Inoltre, il free-cooling conduce ad una riduzione della taglia del sistema di ventilazione meccanica e a valori di temperatura più vicini a quelli di comfort.

Stritih and Butala [32][33] hanno realizzato un modello numerico validato sperimentalmente, considerando un box metallico al cui interno sono alloggiati 3.6 kg di paraffina (RT 20, Rubitherm GmbH) con punto di fusione 22°C e capacità di accumulo 172 kJ/kg. L'analisi, condotta con diverse velocità e temperature di ingresso dell'aria all'interno della cavità, ha permesso di valutare la temperatura di uscita dell'aria e i flussi termici, in funzione del tempo. Gli autori hanno notato che quando l'aria in ingresso ha un temperatura di 26°C ed entra ad una velocità di 1m/s, l'accumulo è in grado di scaricarsi in più di 2.5h, raffreddando l'aria interna fino ad una temperatura inferiore ai 24°C.

Raj and Velraj [34] hanno realizzato un'analisi CFD in regime stazionario e transitorio, considerando un sistema composto da uno scambiatore di calore a fascio tubiero, utilizzato in applicazioni di free-cooling in cui vi è una bassa variabilità della temperatura dell'aria ambiente. All'interno dei tubi circola aria, all'esterno vi è posto il PCM. Mediante l'analisi stazionaria, gli autori hanno valutato la caduta di pressione tra i moduli, la variazione del flusso e della temperatura, al fine di selezionare i giusti parametri geometrici e di flusso. Con l'analisi transitoria, hanno, invece, valutato le caratteristiche di solidificazione del PCM e verificato l'adeguatezza delle caratteristiche geometriche prima selezionate.

Hed and Bellander [35] hanno sviluppato un modello matematico di scambiatore di calore aria-PCM, basato sul metodo delle differenze finite, e validato con misure dirette su un prototipo. Essi hanno valutato che per una velocità dell'aria di 4 m/s, il coefficiente di scambio termico aria-PCM varia in un range compreso tra 16 e 30 W/(m<sup>2</sup> K), in funzione della ruvidezza della superficie di scambio. Gli autori hanno osservato che quando questa è elevata, il coefficiente di scambio aumenta, ma allo stesso tempo occorre maggior apporto energetico ai ventilatori.

Mozhevelov et al. [36] hanno osservato l'effetto del free-cooling a PCM in un clima desertico. Le simulazioni, effettuate considerando un sistema di tipo passivo, mostrano come con un'opportuna scelta del materiale e delle caratteristiche di design, consentano al raffrescamento notturno di caricare il PCM in un ciclo carica-scarica di 24h.

#### 4.1.2 Sistemi di condizionamento/ventilazione dell'aria con PCM

I sistemi di condizionamento dell'aria spesso operano in condizioni molto variabili a causa della forte variabilità delle condizioni climatiche e delle attività umane. Ciò si traduce in richieste elettriche molto variabili e caratterizzate da picchi di potenza alternanti. Grazie all'ausilio dei CTES a PCM è possibile ridurre i carichi e spostarli nelle ore notturne quando le tariffe elettriche sono più basse. Inoltre, come già detto, questo consente di ridurre le taglie degli impianti determinando minori costi a carico dell'utente. Sono molti gli autori che hanno valutato l'effetto peak-shaving grazie all'ausilio dei CTES a PCM.

In Figura 8 è mostrato il sistema di ventilazione proposto da Turnpenney et al. [37]. Il sistema, al servizio di un edificio a basso consumo energetico, si compone di un'unità di accumulo al cui interno sono alloggiati tubi cilindrici contenenti il PCM. Mediante lo sviluppo di un modello matematico, gli autori hanno valutato che per avere un accumulo della durata di 8h, è necessario accumulare 270 Wh di energia frigorifera. Cioché, considerando un apporto termico esterno di 30 W/m<sup>2</sup> di superficie riscaldata (15 m<sup>2</sup>), essi hanno valutato che, per ottenere la stessa durata dell'accumulo (8h), è necessario accumulare 3600 Wh di energia frigorifera. Tale accumulo è ottenuto con 13 unità di PCM. I risultati dell'analisi mostrano che, affinché le fasi di carica e scarica del PCM avvengano in tempi ragionevoli, è necessaria una differenza di temperatura tra aria e PCM di almeno 15°C. Considerando, invece, differenze di temperatura e portate d'aria ragionevoli (5°C e 0.18m<sup>3</sup>/s), la potenza scambiata scende al di sotto di 40 W, determinando un grosso incremento dei tempi di scarica del PCM.

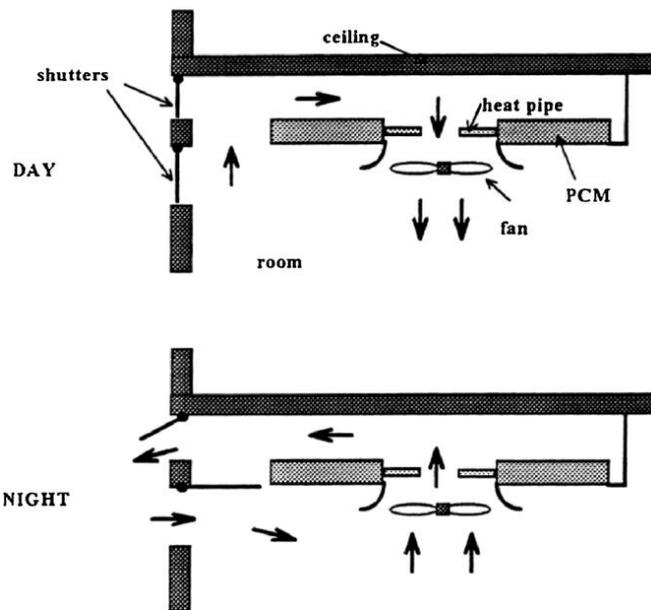


Figura 8. Schema del sistema proposto da Turnpenny et al. [37].

Wang and Niu [38] hanno proposto un modello matematico al fine di studiare un sistema di condizionamento dell'aria caratterizzato dalla combinazione di un soffitto raffreddato, e un serbatoio di accumulo contenente fango e PCM microincapsulato (Figura 9). Il modello matematico, applicato ad un edificio uso ufficio, nelle condizioni climatiche di Hong Kong, prevede, come PCM, l'utilizzo di un esadecano (C16H34), con punto di fusione di 18 °C e calore latente pari a 224 kJ/kg. Durante le ore di funzionamento dell'impianto, la miscela fango/PCM giunge all'interno di pannelli installati nel soffitto, e dopo aver concluso il passaggio di fase, e ceduto l'energia frigorifera accumulata, torna nel serbatoio per miscelarsi con la restante parte di fango. I risultati delle simulazioni mostrano che per una facciata di 18.4 m<sup>2</sup>, esposta a sud, è sufficiente un serbatoio di 0.53m<sup>3</sup>, per garantire le condizioni di comfort richieste. Inoltre, il sistema determina una riduzione del carico elettrico di circa il 33% rispetto ad un soffitto raffreddato con acqua. Gli autori, infine, hanno osservato che i consumi energetici annuali ottenuti con tale sistema sono pari a 1148 kWh, nel caso senza accumulo a 1157 kWh, e nel caso con accumulo ad acqua/ghiaccio a 1980 kWh.

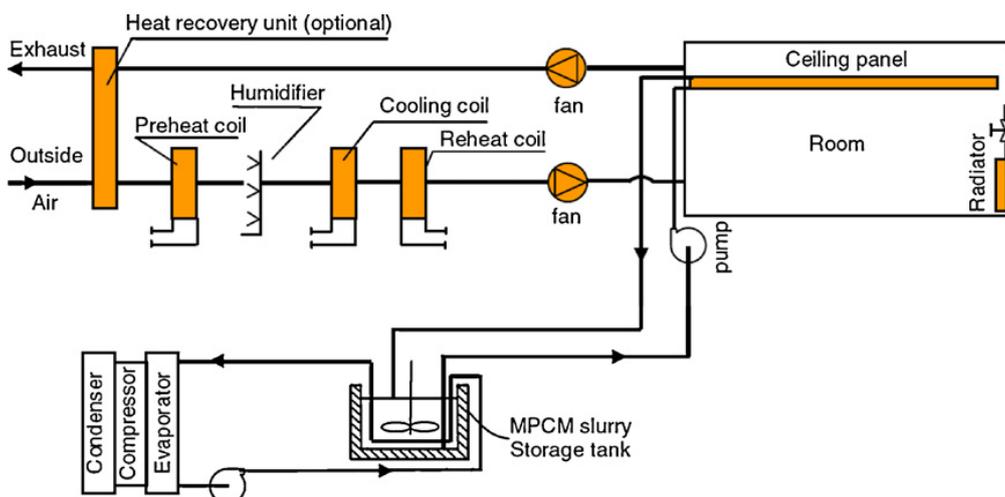


Figura 9. Schema del sistema proposto da Wang and Niu [38].

Kondo and Ibamoto [39] hanno analizzato, ai fini del peak shaving, un sistema di condizionamento dell'aria con PCM micro incapsulato, contenuto all'interno di pannelli di lana di roccia alloggiati nel soffitto di una camera di 16 m<sup>2</sup> di un edificio giapponese ad uso ufficio (Figura 10). Durante le ore notturne (dalle 4 alle 8), l'aria fredda, generata dall'unità di trattamento dell'aria (AHU), viene lasciata fluire all'interno della

cavità realizzata nel soffitto, raffreddando i pannelli contenenti PCM. Il freddo così accumulato, viene rilasciato durante le ore di picco (dalle 13 alle 18). Gli autori hanno osservato che, grazie all'utilizzo di tale sistema, è possibile ottenere un abbassamento del carico di circa il 15%, rispetto al caso senza PCM, con uno spostamento del carico dalle ore di picco a quelle notturne del 25.1%, e un abbattimento dei costi operazionali del 91.6%.

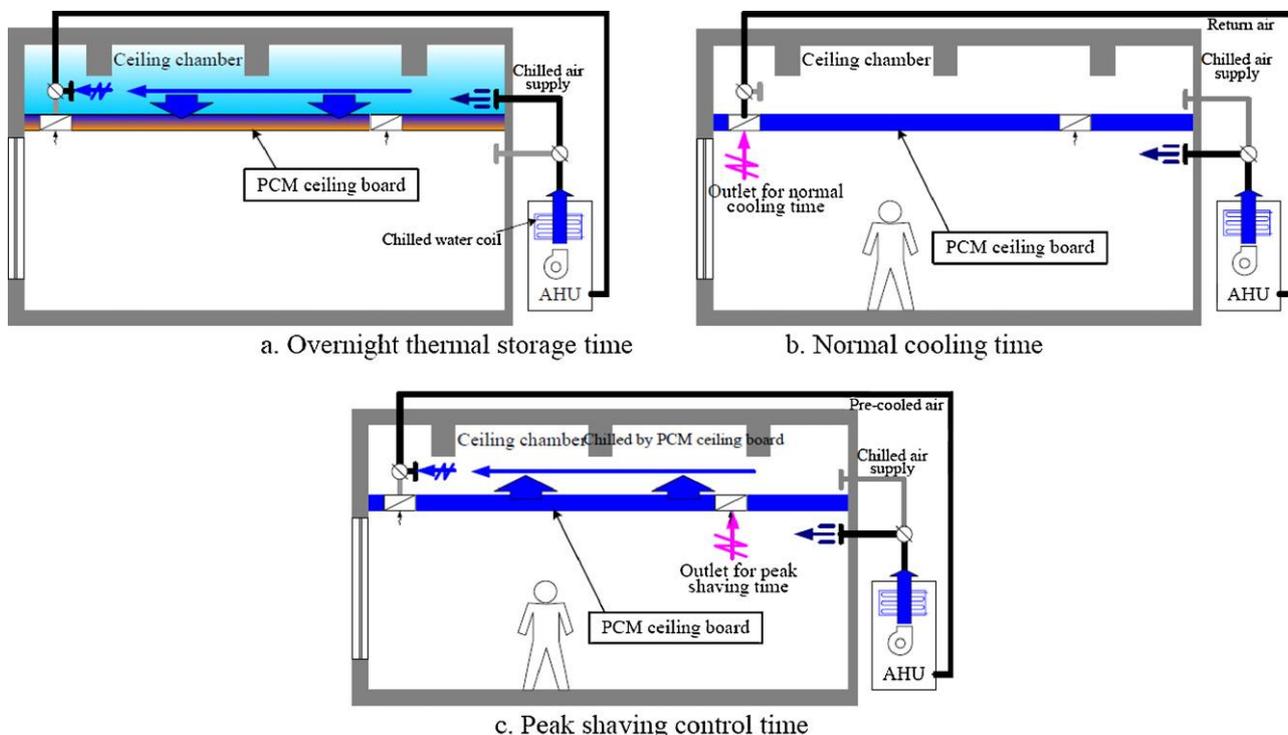
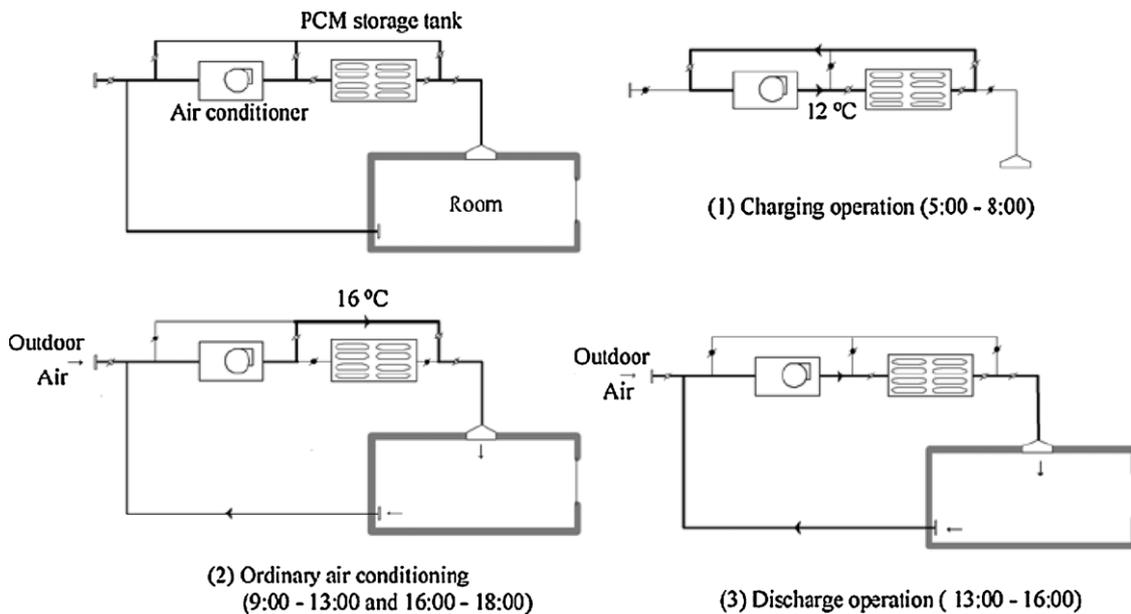


Figura 10. Schema del sistema proposto da Kondo and Ibamoto [39].

Yamaha and Misaki [40] hanno analizzato un sistema di condizionamento dell'aria con serbatoio a PCM ai fini del peak shaving, utilizzando un mix di cere paraffiniche in diverse quantità, con un calore latente totale di 90 kJ/kg. Secondo il loro approccio, durante il periodo di carica (dalle 5 alle 8), l'aria, in uscita dal condizionatore, passa nel serbatoio di accumulo, raffredda il PCM, e ritorna al condizionatore, come mostrato in Figura 11. Dalle 9 alle 13, e dalle 16 alle 18, ovvero in quelle ore in cui non vi è caricamento o scaricamento del PCM, il sistema di condizionamento alimenta direttamente l'utenza. Durante lo scaricamento (dalle 13 alle 16), l'aria proveniente dal condizionatore, passa attraverso l'unità di accumulo per essere ulteriormente raffreddata, e viene ceduta all'utenza. Effettuando, quindi, un controllo sulle fasi di carica e scarica del PCM, gli autori hanno osservato che, per un edificio ad uso ufficio, tipico della città di Nagoya, 400 kg di PCM, usati per raffrescare una stanza di 73.8 m<sup>2</sup>, sono sufficienti a mantenere costante la temperatura interna, senza ulteriori apporti frigoriferi esterni.



**Figura 11. Schema del sistema proposto da Yamaha and Misaki [40].**

Zhou et al. [41] hanno valutato gli effetti dell'utilizzo di un PCM a forma stabilizzata e di differenti strategie di controllo, su consumi energetici, richieste di picco e costi elettrici di un sistema di condizionamento dell'aria in due condizioni climatiche estive differenti (subtropicale e continentale). Il sistema proposto prevede l'utilizzo di un tipico sistema di condizionamento dell'aria a volume variabile, integrato con PCM. Quest'ultimo, composto da una paraffina sfusa e polietilene ad alta densità, con temperatura di fusione di 18°C e calore latente di 160 kJ/kg, è alloggiato in piastre posizionate sulla superficie interna dei muri perimetrali dell'edificio oggetto di studio. L'analisi, condotta considerando tre strategie di controllo differenti, e due diverse politiche di prezzo dell'energia elettrica, hanno mostrato una riduzione del costo elettrico dell'edificio e della richiesta di picco, rispettivamente, dell'11% e del 20%.

#### 4.1.3 Sistemi di raffrescamento ad assorbimento

I sistemi di solar cooling rappresentano una valida alternativa ai convenzionali sistemi di condizionamento dell'aria, per questo negli anni hanno attirato una crescente attenzione. Grazie all'abbinamento tra pannelli solari termici ed una macchina frigorifera, il solar cooling sfrutta il fatto che le ore della giornata (estiva) in cui c'è la maggiore richiesta di freddo per il condizionamento degli edifici, coincidono con la massima disponibilità di radiazione solare. Data la natura intermittente di questa fonte, un ruolo fondamentale è, quindi, assunto dall'accumulo termico. Tuttavia, in letteratura non sono molti gli autori che hanno valutato il potenziale dell'accumulo a PCM abbinato a sistemi di solar cooling. Qui di seguito sono riportate due applicazioni significative.

Agyenim et al. [42] hanno utilizzato un PCM (eritriolo con punto di fusione 117.7 °C) al fine di innalzare il COP di un sistema ad adsorbimento LiBr/H<sub>2</sub>O, utilizzato in ambito residenziale.

Helm et al. [43] hanno progettato e testato un sistema di raffrescamento ad assorbimento con accumulo a calore latente a bassa temperatura (Figura 12). Il PCM utilizzato è un cloruro di calcio esaidrato (CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) con range di fusione 27–29 °C. Confrontando tale sistema con uno dotato di accumulo ad acqua, gli autori hanno valutato che per la particolare applicazione in esame, l'accumulo a PCM possiede una capacità di accumulo 10 volte maggiore rispetto all'accumulo ad acqua. Inoltre, essi hanno valutato che, grazie all'integrazione dell'accumulo a PCM all'interno del sistema, la richiesta risulta spostata nelle ore fuori picco, determinando solo un piccolo aumento dei consumi elettrici del sistema.

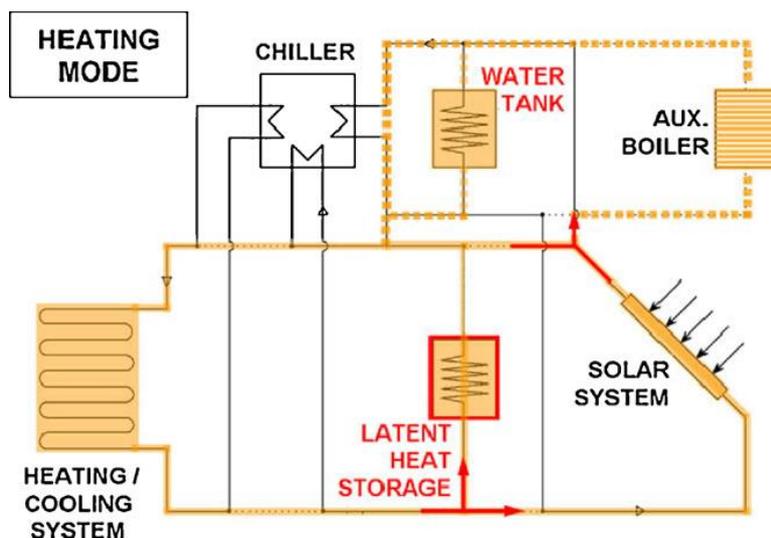


Figura 12. Schema del sistema proposto da Helm et al. [43].

## 4.2 Sistemi Passivi

In ambito edilizio, gli accumuli a PCM possono essere integrati all'interno degli elementi costruttivi degli edifici, al fine di incrementarne la massa termica. Grazie alla capacità offerta dai PCM di accumulare il calore durante le ore più calde della giornata, è possibile proteggere gli ambienti interni dal surriscaldamento diurno, tipico delle giornate estive. Per tale motivo, sono molti gli autori che negli ultimi 10 anni hanno valutato l'effetto dell'integrazione di questi materiali sulle condizioni di comfort interno agli ambienti, e sulle prestazioni energetiche ed economiche degli edifici. Le applicazioni in quest'ambito sono molteplici. Qui di seguito si proverà a darne una panoramica generale, mostrando le tipiche applicazioni.

Koschenez and Lehmann [44] hanno realizzato un pannello per soffitto con PCM incorporato, da installare in edifici leggeri in fase di ammodernamento, utilizzando una paraffina ad elevata capacità termica. I risultati delle analisi sperimentali mostrano che uno strato di 5cm composto da PCM micro incapsulato (25% in peso) e gesso, è sufficiente a garantire le condizioni di comfort interno in un edificio uso ufficio.

Voelker et al. [45] si sono concentrati sul problema del surriscaldamento degli ambienti interni. Al fine di valutare l'effetto ottenuto con l'utilizzo di PCM, essi hanno realizzato un intonaco composto da paraffina micro incapsulata in sferette di 5 mm e range di fusione 25-28°C, gesso, e minerali inerti. Gli autori hanno osservato una riduzione della massima temperatura interna di 4K, tuttavia a discapito delle proprietà del PCM, il quale, dopo alcuni giorni consecutivi di caldo in cui non si verifica la fase di scarica notturna, subisce un abbassamento della propria capacità di accumulo.

Shilei et al. [46] hanno valutato sperimentalmente la riduzione del carico di raffrescamento di un edificio con pareti perimetrali impregnate di PCM. Il materiale utilizzato è un mix di un acido caprico e un acido laurico, caratterizzati, rispettivamente da una temperatura di fusione-congelamento di 20.4°C e 19.1 °C, e capacità di accumulo di 150.3 J/g e 144.2 J/g.

Kuznik et al. [47] hanno studiato sperimentalmente il comportamento energetico di un edificio leggero, posizionando PCM nella partizione interna delle pareti perimetrali. La fase sperimentale, condotta all'interno di una camera controllata, con valori della temperatura e del flusso radiativo ottenuti mediante simulazione dinamica, è stata effettuata confrontando il sistema con PCM integrato, con un sistema privo di PCM (Figura 13). I risultati hanno mostrato, nel caso con parete a PCM, una riduzione maggiore dell'effetto di surriscaldamento dell'ambiente interno e un abbassamento della temperatura della superficie interna della parete, con conseguente aumento delle condizioni di comfort.

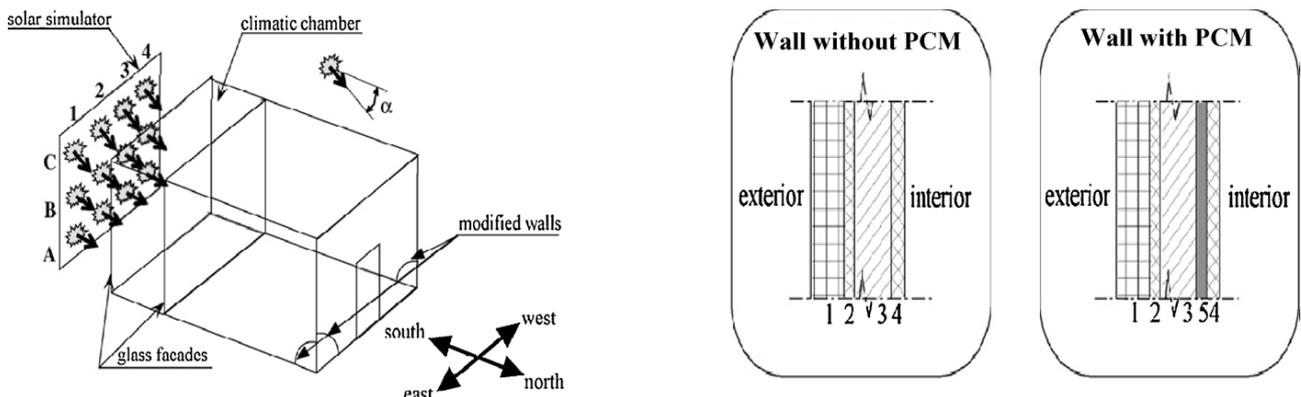


Figura 13. Schema del sistema proposto da Kuznik et al. [47].

Castell et al. [48] hanno valutato l'effetto, sul raffrescamento passivo, di un sistema composto da PCM integrato all'interno di mattoni. L'analisi sperimentale ha mostrato un abbassamento della temperatura di picco di circa 1 °C, e condizioni interne più stabili, grazie alla capacità offerta dal PCM di ridurre l'effetto della fluttuazione della temperatura esterna. Tuttavia, come già osservato in lavori precedenti, tale sistema è soggetto ad un problema di stabilità delle proprietà del PCM durante la fase di solidificazione. Tali proprietà possono essere preservate solo mediante un'opportuna strategia di raffrescamento del materiale. Per tale motivo, gli autori hanno condotto ulteriori analisi sperimentali, abbinando il sistema descritto ad una pompa di calore in grado di controllare la temperatura dell'ambiente interno. I risultati mostrano un abbassamento dei consumi energetici del 15% nel caso di mattoni con PCM, rispetto al caso privo di PCM.

Ceron et al. [49] hanno realizzato e studiato un sistema di riscaldamento e raffrescamento passivo a pavimento, utilizzando piastrelle con PCM incorporato (Figura 14). Nella configurazione estiva, tale sistema permette di controllare la temperatura interna agendo come accumulatore di calore.



Figura 14. Schema del sistema proposto da Ceron et al. [49].

Ansuini et al. [50] hanno realizzato e testato un sistema di raffrescamento a pavimento con PCM, per controllare il comfort termico degli ambienti interni nella stagione estiva, senza compromettere il funzionamento invernale. Il prototipo realizzato, mostrato in Figura 15, è stato testato in condizioni dinamiche in una camera di 16 m<sup>2</sup>. I risultati dell'analisi mostrano che l'integrazione di PCM all'interno dei tubi radianti consente di ridurre l'utilizzo di acqua del 25%, e di controllare la temperatura interna senza l'ausilio di sistemi di condizionamento aggiuntivi.



Figura 15. Prototipo realizzato da Ansuini et al. [50].

Stetiu and Feustel [51] hanno effettuato uno studio numerico mediante il tool RADCOOL, mostrando come l'uso di PCM all'interno di pareti perimetrali, abbinato ad una ventilazione meccanica notturna riesca a ridurre il carico di raffrescamento del 28% quando la temperatura dell'aria esterna scende al di sotto dei 18°C.

Halford and Boehm [52] hanno sviluppato un modello monodimensionale, attraverso il quale, hanno dimostrato come l'integrazione di un sale, incapsulato all'interno del soffitto e di una parete isolata, possa determinare una riduzione del picco del carico di raffrescamento dell'11-25%, e del 19-57%, rispettivamente.

Zhu et al. [53], mediante un modello, validato sperimentalmente, hanno provato che l'aggiunta di 10% di PMC K18 al calcestruzzo usato per edificare pareti di tipo sandwich, comporta una riduzione del picco del carico e della richiesta annuale di raffrescamento del 19% e del 13%, rispettivamente.

Ascione et al. [54] hanno valutato la riduzione del carico di raffrescamento, variando la temperatura, lo spessore e la posizione dello strato di PCM impregnato nell'intonaco delle pareti esterne dell'edificio.

Lv et al. [55] hanno dimostrato come l'aggiunta di PCM nelle pareti perimetrali, comporti una riduzione dei costi operativi dei sistemi HVAC e determini un livellamento del carico.

Alawadhi and Alqallaf [56] hanno simulato numericamente un soffitto caratterizzato dalla presenza di fori contenenti PCM, al fine di valutarne gli effetti sul carico di condizionamento estivo. Il sistema considerato (Figura 16) prevede una lastra di calcestruzzo con fori tronco-conici verticali riempiti con PCM. Il sistema così composto fa sì che il calore, in ingresso dalla parte alta del tetto, venga accumulato nello strato contenente PCM prima di raggiungere l'ambiente interno. L'efficacia del sistema è stata valutata misurando il flusso termico sulla superficie interna del sistema stesso quando questo è privo di PCM. Gli autori hanno inoltre effettuato uno studio parametrico al fine di valutare l'efficacia della forma geometrica dei fori e del tipo di PCM utilizzato. Le migliori performance sono raggiunte dall'n-eicosano, e la forma conica consente elevate prestazioni termiche. In generale il sistema così composto permette una riduzione del flusso termico misurato sulla superficie interna del soffitto del 39%.

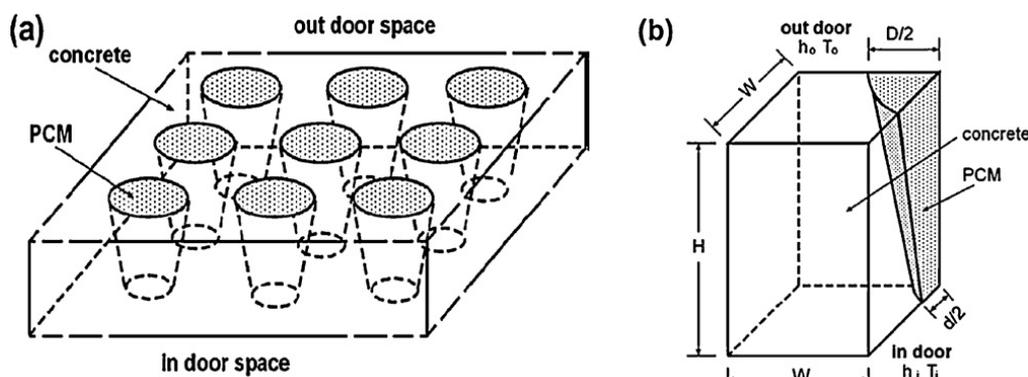


Figura 16. Schema del sistema proposto da Alawadhi and Alqallaf [56].

Pasupathy and Velraj [57] hanno valutato l'effetto di un soffitto a doppio strato di PCM (Figura 17). I risultati mostrano che il soffitto con PCM riesce a raggiungere la temperatura di fusione del materiale (32 °C) solo quando lo strato di questo è di almeno 6 cm. Come conseguenza di ciò, al fine di mantenere la temperatura dell'ambiente interno al valore desiderato, 27 °C; gli autori hanno proposto l'utilizzo di due strati di PCM con differente temperatura di fusione. Essi affermano che la temperatura del PCM, posto nello strato più alto, dovrebbe essere di almeno 6-7 °C più alta della temperatura media dell'ambiente interno nelle prime ore del mattino, al fine di far avvenire la completa solidificazione del PCM per cicli ripetuti.

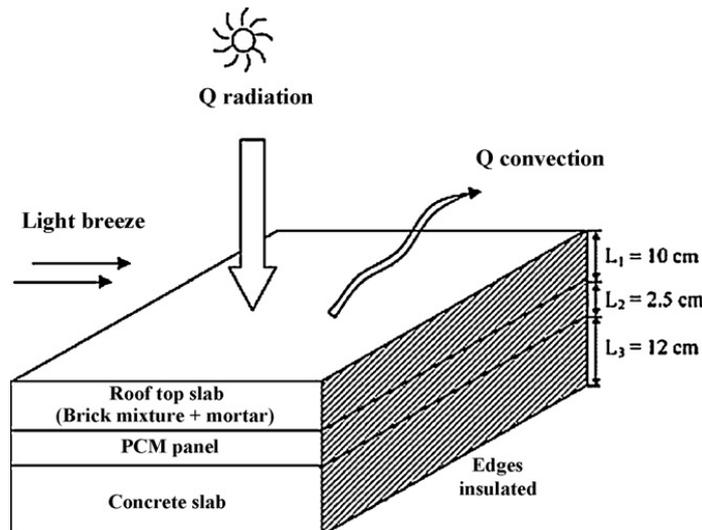


Figura 17. Schema del sistema proposto da Pasupathy and Velraj [57].

L'effetto del doppio strato di PCM all'interno del soffitto è stato analizzato anche da Jin and Zhang [58]. I due strati di PCM, con differente temperatura di fusione, sono posti tra lo strato superficiale e quello in calcestruzzo (Figura 18), e sono utilizzati per accumulare calore o freddo nei periodi fuori picco per rilasciarlo in quelli di picco. I risultati dell'analisi, condotta grazie ad un modello numerico, mostrano che le temperature di fusione del PCM per il riscaldamento ed il raffreddamento sono 38 °C e 18 °C, rispettivamente, e che queste cambiano a seconda della posizione dello strato.

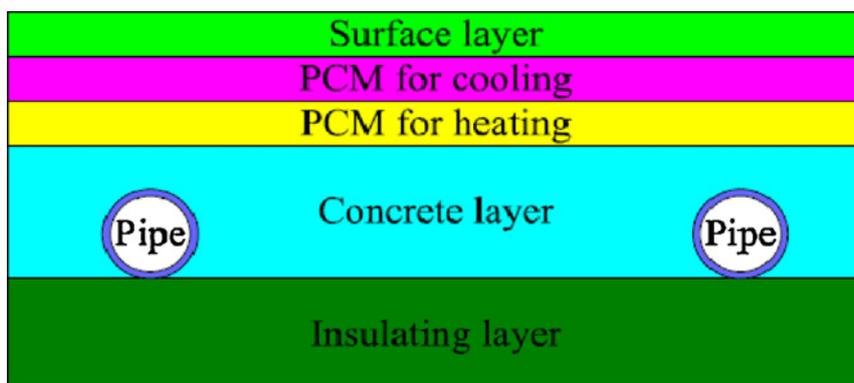


Figura 18. Schema del sistema proposto da Jin and Zhang [58].

Alla luce di quanto visto è chiaro che questi materiali necessitano ancora di studi approfonditi, in virtù di alcune problematiche ad essi annessi. Una di queste è senza dubbio legata alla bassa conducibilità termica. Può accadere, infatti, che il materiale non solidifichi nei tempi desiderati, è che ci sia disponibilità di energia frigorifera quando oramai la richiesta non è più presente. Un'altra problematica è legata alla quantità di materiale da dover utilizzare. Al fine di ottenere gli scopi di accumulo prefissati, a volte sono necessari quantitativi di materiale tali da rendere le applicazioni impraticabili. Infine, il loro costo può, in molti casi, essere davvero elevato. Tuttavia è stato mostrato come i PCM rappresentino un'opzione molto valida ai fini

dell'accumulo del freddo e dell'energia termica in generale, offrendo capacità di accumulo elevate e consentendo una riduzione degli ingombri. Inoltre il loro utilizzo nei sistemi passivi, consente di incrementare l'inerzia termica degli edifici, favorendo un abbassamento del carico di raffrescamento e condizioni di comfort migliori.

## 5 Accumulo del freddo con sistemi acqua/ghiaccio

I sistemi di accumulo del freddo ad acqua, tipicamente usati per i sistemi di condizionamento dell'aria, sono essenzialmente due: ad accumulo di acqua refrigerata e ad accumulo di ghiaccio. In generale, questi sistemi non determinano un elevato incremento del costo d'investimento rispetto ai sistemi privi di accumulo, e possono essere facilmente incorporati in sistemi preesistenti. Ciò vale prevalentemente per i sistemi con ghiaccio, che rispetto agli altri, determinano costi di investimento più bassi, e sono di più semplice integrazione. Di seguito sono trattati nel dettaglio i sistemi di accumulo del freddo con ghiaccio, in quanto anch'essi facenti parte dei sistemi di accumulo con PCM. Infatti in quest'ambito, l'acqua è effettivamente un materiale a cambiamento di fase, che per effetto della transizione di fase è in grado di accumulare e rilasciare energia frigorifera.

### 5.1 Sistemi di accumulo del ghiaccio

Tra tutte le tecnologie di accumulo del freddo, quella del ghiaccio è sicuramente tra le più promettenti, in virtù del basso costo del materiale di accumulo, dell'elevato calore latente di fusione (334 kJ/kg), e dei ridotti volumi occupati. Tuttavia, essendo l'energia frigorifera accumulata mediante la formazione di ghiaccio, le temperature fornite dai sistemi di produzione del freddo devono essere comprese tra i -6 °C e i -3 °C, temperature che si trovano considerevolmente al di sotto di quelle fornite dai sistemi di produzione convenzionali. Uno dei principali problemi di questi sistemi consiste nel profilo di formazione del ghiaccio durante la fase di carica. L'elevata resistenza termica offerta dalla formazione dello strato di ghiaccio, può influenzare molto le performance del sistema. Al fine di migliorarne la resistenza termica, Zhang e Faghri [59] hanno apposto delle alette nella parte interna dei tubi in cui scorre il fluido refrigerante, osservando un incremento della conducibilità termica del fluido del 15%. In un altro lavoro [60], essi hanno valutato l'effetto dell'utilizzo di tubi radiali alettati esternamente, osservando come l'aumento dell'altezza delle alette avesse un effetto positivo sulla resistenza termica del sistema. Lacroix e Benmadda [61] hanno osservato, invece, l'effetto dovuto all'aumento del numero di alette.

I sistemi di accumulo del ghiaccio sono solitamente suddivisi in base ai meccanismi di carica e scarica, e alle differenti configurazioni del materiale di accumulo. Tipicamente, queste consistono in grandi serbatoi di acqua, di acqua salata, o piccole capsule contenenti acqua o altri materiali con temperature di fusione sufficientemente basse [62]. In generale, tali sistemi sono suddivisi in: i) sistemi di raccolta del ghiaccio (*ice harvesting*); ii) sistemi *ice slurry*; iii) sistemi con formazione di ghiaccio sulla superficie esterna o interna della serpentina (*external e internal ice-on-coil*); iv) sistemi incapsulati. Inoltre, possono essere classificati in sistemi dinamici o statici. Nei sistemi statici, il ghiaccio che si forma resta localizzato sulla superficie di raffreddamento, nei dinamici, invece, avviene uno spostamento da questa [63].

Di seguito sono riportate le cinque categorie di sistemi di accumulo del ghiaccio.

#### 5.1.1 Sistemi Ice Harvesting

I sistemi *ice harvester* sono sistemi dinamici in cui viene separata la produzione di ghiaccio dal suo immagazzinamento. In questi sistemi, composti da un serbatoio di accumulo, coibentato e aperto superiormente in cui vi è una soluzione acquosa con 25-30% di glicole etilenico, la produzione di ghiaccio avviene facendo circolare l'acqua a 0°C su una piastra o su degli evaporatori cilindrici disposti in verticale sopra il serbatoio d'accumulo (Figura 19).

Tipicamente, il ghiaccio prodotto occupa un volume pari al 60 % del volume del serbatoio, e ha uno spessore che varia dagli 8 ai 10 mm, in funzione della durata del ciclo di congelamento. Una volta,

formatosi, il ghiaccio è raccolto mediante un gas caldo che va a staccare le lastre dagli evaporatori permettendogli di cadere nel serbatoio sottostante [64].

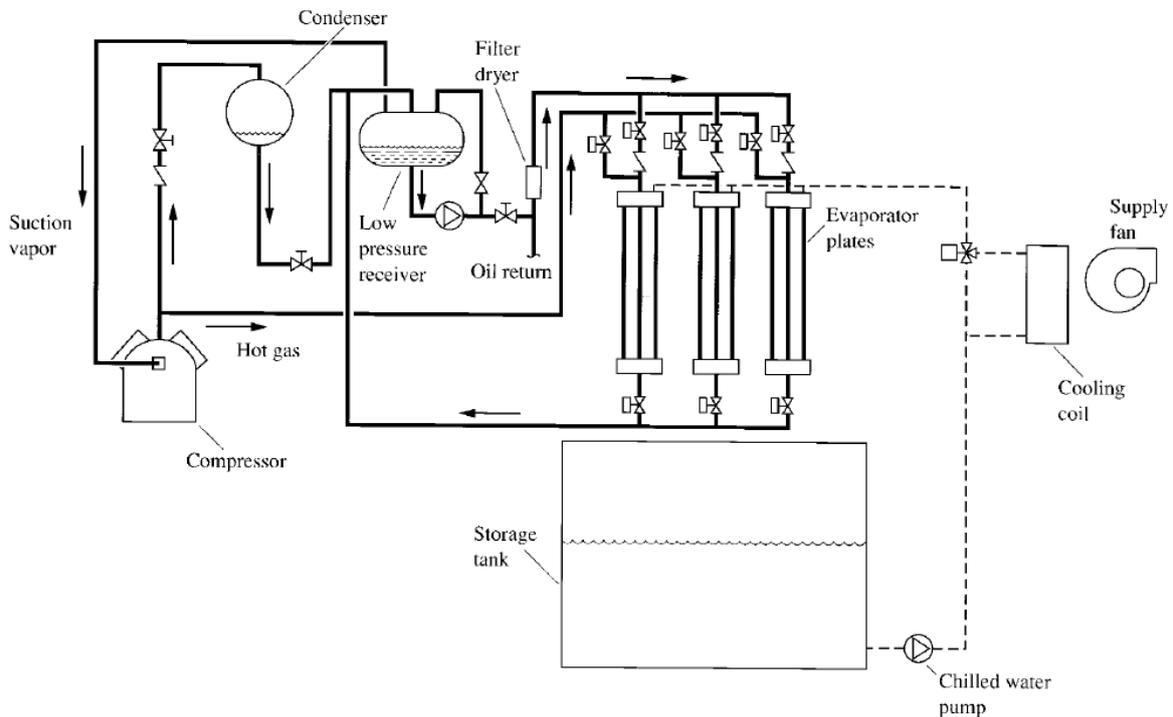


Figura 19. Tipico schema di un sistema ice harvester [64].

### 5.1.2 Sistemi Ice Slurry

Questo tipo di sistemi, proprio come i sistemi Ice Harvesters, sono progettati per separare la produzione di ghiaccio dal suo successivo accumulo (Figura 20) [65]. Rispetto ai precedenti sono però caratterizzati da una maggiore efficienza e da un controllo più semplice. La miscela, infatti, composta da acqua e un soluto come glicole, cloruro di sodio o carbonato di calcio, circola direttamente nelle tubature, permettendo il trasporto di una maggiore quantità di energia, e una fase di scarica più veloce. L'abbassamento della temperatura fa sì che negli istanti iniziali della carica si formino dei cristalli di ghiaccio in sospensione; a seguito dell'aumento di tali cristalli la concentrazione di soluto nella rimanente acqua diminuisce impedendone il completo congelamento.

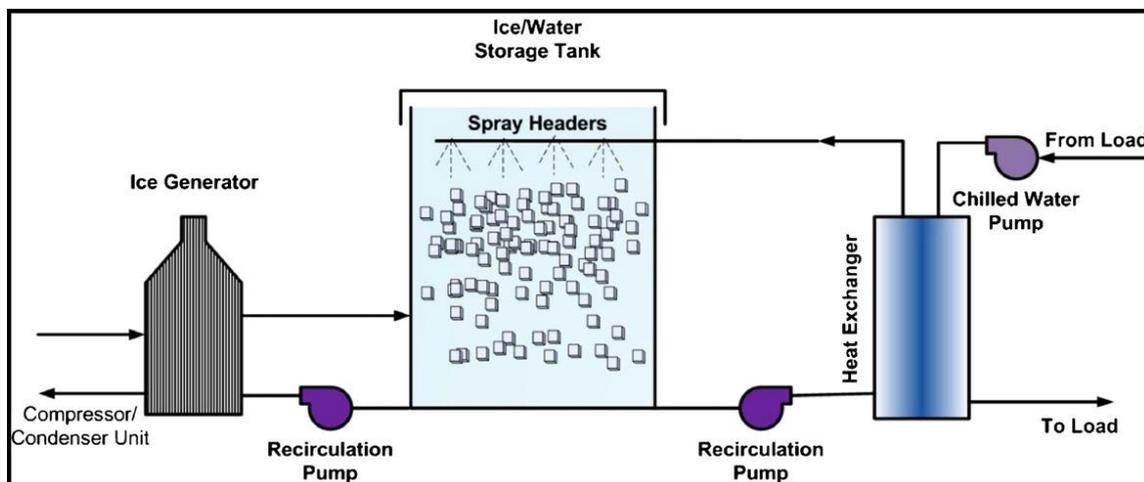


Figura 20. Schema di un sistema Ice Slurry [65].

5.1.3 Sistemi external ice on coil

In un sistema di questo tipo, la formazione di ghiaccio avviene sulla superficie esterna di bobine o tubi, immersi in serbatoi di accumulo ad acqua, al cui interno scorre il fluido refrigerante. Per effetto della fusione del ghiaccio, l'acqua interna al serbatoio si raffredda fino a temperature comprese tra 1 e 3 °C, raffreddando il fluido refrigerante posto all'interno dei tubi ai fini del suo utilizzo nei sistemi di condizionamento. La Figura 21 mostra un esempio di sistema external ice on coil. Dalla figura si può osservare come il sistema di formazione del ghiaccio, chiamato ice builder, sia composto da uno o più serbatoi di accumulo, ben isolati, contenenti diverse serpentine di acciaio di 25-31 mm, il fluido refrigerante, ed immerse nell'acqua [64]. In questo tipo di sistemi, vi è una netta distinzione tra fase di carica e fase di scarica. Infatti, durante la fase di carica, il fluido refrigerante, circolante all'interno dei tubi, favorisce la formazione delle lastre di ghiaccio, di spessore variabile, sulla superficie esterna dei tubi stessi (lo spessore del ghiaccio è di solito compreso tra 25 e 64 mm e dipende dal tipo di applicazione e dalle temperature in gioco [64]). Durante la fase di scarica, invece, non è il fluido interno ai tubi a determinare la fusione, bensì l'acqua calda di ritorno dal circuito e in ingresso al serbatoio, per diretto contatto con il ghiaccio [66]. Quindi la fase di scarica inizia nella regione esterna della lastra di ghiaccio fino ad interessarne l'interno; da ciò deriva la dizione di sistemi external ice on coil. La Figura 22 mostra chiaramente le fasi di carica e scarica del ghiaccio in un sistema di questo tipo [67].

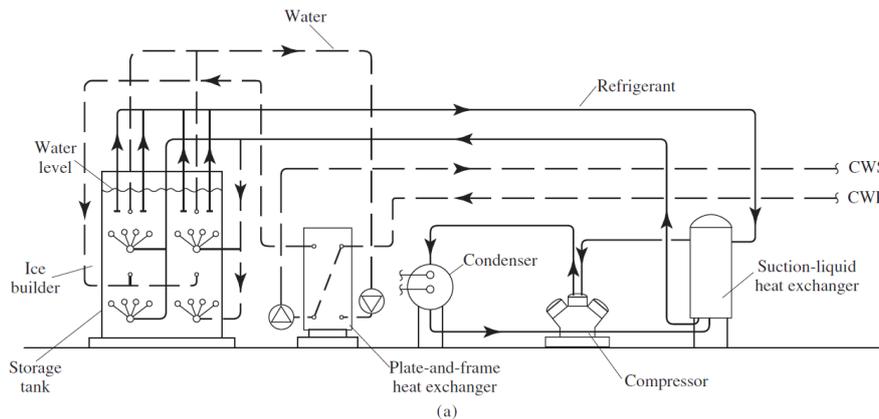


Figura 21. Esempio di sistema di accumulo con ghiaccio del tipo external ice on coil [64].

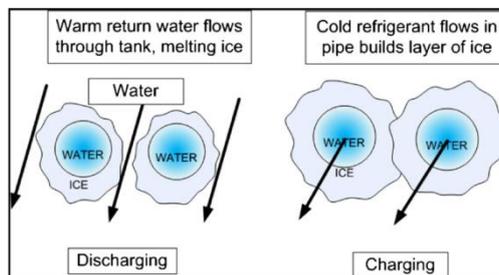
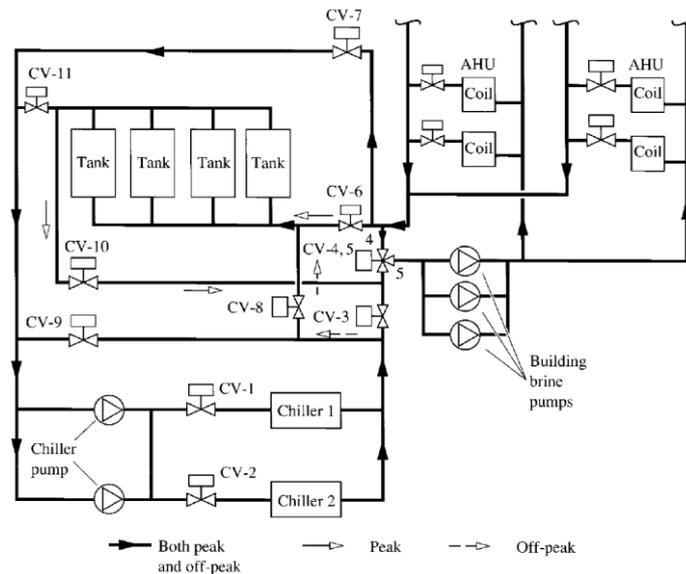


Figura 22. Fasi di scarica e carica del ghiaccio in un sistema external ice on coil [67].

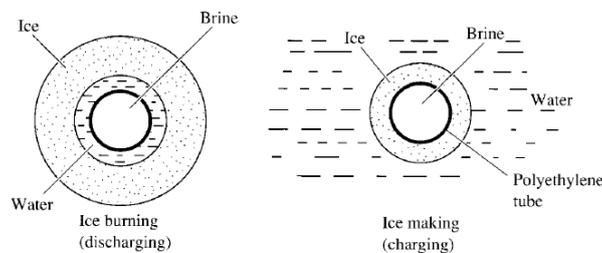
Questo tipo di sistema è tra i più antichi sistemi di accumulo con ghiaccio. Può essere costoso e complesso. Il volume occupato dal ghiaccio è pari circa ad un mezzo del volume totale del serbatoio [64], per tale motivo il sistema di formazione del ghiaccio (ice builder) deve essere sufficientemente grande da produrre la quantità di ghiaccio necessaria all'applicazione, determinando ovvi problemi di ingombro.

5.1.4 Sistemi internal ice on coil

Questi sistemi sono per alcuni versi molto simili ai precedenti. Essi prevedono infatti una serie di serbatoi di accumulo contenuti acqua, al cui interno sono posti dei tubi in cui circola una soluzione di acqua e glicole. La fase di carica avviene, come per i sistemi external ice on coil, per effetto del passaggio del fluido all'interno dei tubi, che determina la formazione di ghiaccio sulla superficie esterna dei tubi stessi. La fase di scarica, invece, avviene diversamente. Mentre nei sistemi visti precedentemente, era l'acqua in ingresso al serbatoio a determinare lo scioglimento del ghiaccio dall'esterno, in questi sistemi è il fluido interno ai tubi a determinare la fase di scarica, la quale, quindi, inizia nella regione interna della lastra di ghiaccio, a diretto contatto con il tubo, e man mano prosegue verso l'esterno; da qui segue la dizione di internal ice on coil [64]. La Figura 23 mostra un esempio di sistema di accumulo con ghiaccio del tipo internal ice on coil, mentre la Figura 24 illustra i processi di carica e scarica del materiale.



**Figura 23. Esempio di sistema internal ice on coil [64].**



**Figura 24. Fasi di scarica e carica del ghiaccio in un sistema internal ice on coil [64].**

### 5.1.5 Sistemi con Ghiaccio Incapsulato

Nei sistemi con ghiaccio incapsulato, l'acqua deionizzata e agenti nucleanti vengono incapsulati all'interno di contenitori plastici, di diversa forma e dimensione, a loro volta immersi all'interno di una soluzione refrigerante secondaria di glicole etilenico, contenuta in serbatoi, di solito di acciaio [64]. La fusione ed il congelamento del materiale avvengono all'interno delle capsule, di solito sferiche, favorendo scambi termici più veloci, e garantendo una buona stabilità nei successivi processi di carica e scarica del materiale stesso. Le capsule più utilizzate sono di forma sferica con diametri compresi tra 0.75 e 100 mm [64] [68], oppure di forma rettangolare con volumi compresi tra 0.017 e 0.0042 m<sup>3</sup> [68]. In Figura 25 sono mostrati alcuni esempi di incapsulamento di ghiaccio. Il materiale tipicamente usato per la loro realizzazione è polietilene ad alta densità, in grado di resistere all'aumento di pressione interno dovuto all'espansione dell'acqua in fase di congelamento. Durante la fase di carica, per effetto dell'abbassamento di temperatura del fluido all'interno del serbatoio, tipicamente tra i -6 e i -3 °C, l'acqua contenuta nelle capsule congela. Durante la fase di scarica, invece, il ghiaccio all'interno di queste fonde per effetto

dell'innalzamento della temperatura dovuto all'ingresso nel serbatoio del fluido caldo di ritorno dall'utenza. In Figura 26 sono mostrate chiaramente le fasi di carica e scarica del ghiaccio in sistemi di questo tipo.



Figura 25. Esempi di sistemi con ghiaccio incapsulato (a) Cryogel [69], (b) Crystopia [70], and (c) Ice-Bon [70].

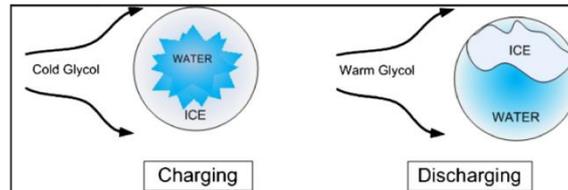


Figura 26. Fasi di carica e scarica in un sistema con ghiaccio incapsulato [71].

## 6 Considerazioni finali

Alla luce di quanto visto, risulta evidente come la scelta del materiale sia fondamentale per la resa della specifica applicazione. Come già accennato nel corso della trattazione, la scelta non ottimale del materiale di accumulo può annullare del tutto i benefici connessi all'utilizzo dell'accumulo termico. Al momento della selezione del PCM da utilizzare, risulta, quindi, indispensabile tener conto di alcuni importanti fattori intrinseci al materiale, quali range di fusione, capacità di accumulo, stabilità del materiale, e di fattori connessi alla specifica applicazione, in termini di ingombri e prestazioni, o a considerazioni di carattere economico. Soprattutto, la scelta non può prescindere dal considerare le principali limitazioni e criticità di questi materiali. Come già visto nel capitolo 5, l'acqua presenta buone caratteristiche di accumulo, tuttavia la formazione di ghiaccio, necessita il raggiungimento di temperature comprese tra i  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  e i  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperature che si trovano considerevolmente al di sotto di quelle fornite dai sistemi di produzione convenzionali. Risulta evidente, invece, dal capitolo 3, come gli altri PCM, soprattutto le paraffine e i sali idrati, presentino una maggiore congruenza con le tipiche applicazioni nel settore residenziale. Di contro ai diversi vantaggi connessi all'utilizzo dell'accumulo del freddo con PCM, ampiamente descritti nel corso della trattazione, bisogna, però, tener ben presente i limiti di tali materiali, che di fatto, in alcuni casi, ne limitano l'effettivo utilizzo. Tali problematiche riguardano essenzialmente il sottoraffreddamento, la possibile separazione di fase, ed infine la bassa conducibilità termica, la quale spesso determina uno scambio termico poco efficace. Il sottoraffreddamento, un fenomeno secondo il quale il PCM inizia a solidificare a temperature più basse rispetto a quella di fusione, è spesso risolto mediante l'aggiunta al materiale di agenti nucleanti. La separazione di fase, dovuta, invece, dalla presenza simultanea di PCM liquido e solido, può essere ridotta grazie all'utilizzo di agenti addensanti. Tra le criticità sopradescritte, quella che può maggiormente penalizzare le applicazioni con PCM è, senza dubbio, l'aspetto relativo allo scambio termico. Le tecniche di incremento dello scambio termico e della conducibilità termica dei PCM sono svariate, e consistono essenzialmente nell'utilizzo di alette metalliche, di unità multiple di PCM, di particelle ad elevata conducibilità termica, incapsulamento del materiale, e aggiunta di mezzi porosi. Grazie all'utilizzo di queste tecniche, i benefici connessi all'accumulo del freddo con PCM risultano non solo aumentati, in termini di passaggi di fase, e quindi fasi di carica e scarica del materiale più veloci, ma risultano costanti per un maggior numero di cicli.

L'utilizzo di tali materiali, quindi, risulta essere molto promettente in un settore come quello residenziale, in cui certamente sono richieste prestazioni energetiche elevate e una riduzione dei costi, ma di fondamentale importanza risulta essere anche la riduzione degli ingombri dei sistemi. L'abbinamento di un accumulo del freddo a PCM ad un sistema di condizionamento tipicamente utilizzato nel settore residenziale italiano, ovvero composto da chiller elettrici, può determinare una riduzione dei carichi di raffrescamento notevole, con conseguente riduzione dei costi, consentendo anche la riduzione delle taglie dei chiller impiegati. Determinando un peak shaving e un peak leveling della domanda, è infatti, possibile utilizzare chiller di potenza inferiore, determinando un risparmio in bolletta, dipendente dalla riduzione della quota potenza a carico dell'utente, e favorendo costi di acquisto delle apparecchiature più bassi. Molto promettente è anche l'abbinamento di questo tipo di accumulo agli impianti di micro-cogenerazione utilizzati in ambito residenziale. L'accumulo termico in generale, sia sensibile che latente, favorisce un funzionamento più stabile dei suddetti impianti; l'utilizzo del PCM, e quindi dell'accumulo latente, contribuisce in modo significativo, anche, alla riduzione degli ingombri del serbatoio, cosa che, in un contesto come quello residenziale, in cui risulta indispensabile non sottrarre spazio agli ambienti, rappresenta certamente un importante valore aggiunto. Alla luce di queste considerazioni si procederà, nelle prossime annualità alla realizzazione di un apparato prototipale, al fine di condurre l'analisi sperimentale descritta nel capitolo successivo e verificare la bontà delle soluzioni tecniche e tecnologiche adottate.

## 7 Attività sperimentale futura

Lo studio condotto sull'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase per applicazioni relative all'accumulo dell'energia frigorifera, mostrato nei capitoli precedenti, è stato finalizzato all'individuazione ed all'analisi di uno o più materiali le cui caratteristiche siano in grado di soddisfare le esigenze di accumulo termico per applicazioni nell'ambito residenziale. L'attività sperimentale avviata nell'ambito del progetto Ricerca di Sistema PAR-D1 2015-12016, dal laboratorio DTE-FSN-FOSG dell'ENEA, è, infatti, finalizzata allo studio del cosiddetto "peak-shaving" del carico elettrico associato al condizionamento ambientale estivo mediante sistemi di accumulo del freddo, sia di tipo sensibile che latente. L'attività prevederà la realizzazione di due sistemi di accumulo del freddo, uno ad acqua, l'altro con PCM, in scala da laboratorio, al fine di effettuare una validazione sperimentale dei modelli analitici utilizzati per la simulazione numerica di tali sistemi, e di implementare strategie operazionali innovative mirate all'ottimizzazione dei benefici, energetici ed economici, dovuti al peak shaving, per il particolare caso studio individuato.

L'applicazione in oggetto, sarà relativa ad un'utenza residenziale dotata di un chiller elettrico a compressione di vapore ad alta efficienza per la copertura del carico di raffrescamento. L'attività sarà articolata in due fasi, una relativa alla valutazione delle performance dell'impianto quando abbinato ad un accumulo sensibile ad acqua, l'altra finalizzata alla valutazione delle medesime performance nel caso di utilizzo di un accumulo latente con PCM. Il materiale PCM che sarà utilizzato dovrà rispondere alle esigenze di accumulo e raffrescamento dell'utenza specifica, e quindi dovrà presentare una temperatura di fusione nel range 5-15°C, decisa in virtù delle temperature dei fluidi in uscita dal tipo di chiller considerato, e garantire elevate capacità di accumulo. Alla luce di quanto emerso dallo stato dell'arte sopra affrontato, ed in seguito ad un'analisi di mercato mirata all'individuazione dei PCM commercialmente più idonei, in termini di costi e disponibilità, si è deciso di focalizzare l'attenzione sui PCM paraffinici e sui Sali idrati. Questi, in virtù delle elevate capacità di accumulo e degli ampi range di temperatura offerti, ben si prestano ad applicazioni con accumulo latente con serbatoio nel settore residenziale, dove si ha certamente la necessità di determinare un abbassamento del carico di raffrescamento e quindi del relativo costo elettrico, ma risulta di fondamentale importanza anche la riduzione degli ingombri dei serbatoi.

## 8 Conclusioni

Nel presente documento sono riportati i risultati relativi alle attività svolte nella prima annualità dell'accordo. Nel dettaglio, in questo periodo, è stato affrontato uno studio approfondito ed un'analisi dei materiali a cambiamento di fase utilizzati per l'accumulo del freddo, e delle principali applicazioni nel settore residenziale. Per lo scopo, è stata realizzata un'approfondita ricerca bibliografica che ha consentito di individuare i lavori più rappresentativi in cui l'accumulo a calore latente è realizzato mediante il passaggio di fase solido-liquido, che rappresenta il metodo più utilizzato nell'ambito dell'accumulo del freddo in questo settore.

Il documento presenta i risultati relativi allo studio dei singoli materiali PCM utilizzati in applicazioni relative all'accumulo del freddo, delle principali applicazioni oggi presenti in letteratura, e dei sistemi di accumulo con acqua/ghiaccio. Nel dettaglio, è riportata la classificazione dei PCM in materiali organici, inorganici ed eutettici e relativamente a ciascuna categoria ne sono state analizzate le principali caratteristiche e peculiarità. In merito alle principali applicazioni, sono mostrate quelle oggi più rappresentative sia nell'ambito dei sistemi attivi, che in quello dei sistemi passivi. In particolar modo, sono stati analizzati i sistemi attivi di free-cooling, condizionamento e ventilazione dell'aria e sistemi di raffrescamento ad adsorbimento e assorbimento, e i sistemi passivi che vedono l'utilizzo dei PCM integrati negli elementi dell'involucro edilizio, come in muri perimetrali, pavimenti o soffitti. Infine, sono stati descritti i vari tipi di accumulo del freddo con ghiaccio (Ice Harvesting, Ice Slurry, external ice on coil, internal ice on coil, Ghiaccio Incapsulato) analizzandone le principali caratteristiche.

Dall'analisi dei diversi materiali e applicazioni è emerso che i PCM più utilizzati sono quelli paraffinici, in virtù degli ampi range di temperatura offerti e delle elevate capacità di accumulo. Tuttavia, sono molto diffuse anche le applicazioni che vedono l'utilizzo di Sali idrati, acidi grassi e acqua. Le soluzioni acqua/ghiaccio risultano essere tra le più promettenti in virtù del basso costo del materiale di accumulo e dell'elevato calore latente di fusione; tuttavia la formazione di ghiaccio necessita di temperature troppo basse, spesso non raggiungibili con i sistemi tradizionali di condizionamento dell'aria, cosa che di fatto ne limita il reale utilizzo. In generale, la principale applicazione dell'utilizzo dei PCM per l'accumulo del freddo, è relativa al peak shaving e peak leveling della domanda energetica per il condizionamento estivo. L'utilizzo di questi materiali, nell'ambito dell'accumulo a calore latente, consente, non solo di ridurre i picchi di potenza richiesta e, quindi, il costo di esercizio complessivo degli impianti a cui sono abbinati, ma rispetto ai sistemi a calore sensibile permette di accumulare grandi quantità di energia termica con ridotti volumi di accumulo, in range di variazione della temperatura molto limitati.

A valle di questo studio dei PCM commerciali e non, maggiormente utilizzati nell'ambito dell'accumulo del freddo, e delle relative applicazioni, si procederà nelle prossime annualità con la progettazione, realizzazione e sperimentazione di un apparato prototipale. Questo consentirà di confrontare in modo diretto e mirato le performance energetiche di un sistema di accumulo con serbatoio a calore sensibile, con un sistema di accumulo con serbatoio a calore latente, entrambi abbinati ad un'utenza residenziale italiana, nonché di validare le soluzioni tecnologiche e sistemiche adottate.

## 9 Riferimenti bibliografici

- [1] Buildings and climate change. A summary for decision-makers, UNEP's sustainable buildings & climate initiative (SBCI); 2009.987-92-807-3064-7.
- [2] Lombard L, Ortiz J, Pout Christine P. A review on buildings energy consumption information. *Energy Build* 2008; 40:394–8.
- [3] Diaconu BM. Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: influence of occupancy pattern and ventilation. *Energy Build* 2011;43:101–7.
- [4] Jeon J, Seo J, Jeong S, Kim S. PCM application methods for residential building using radiant floor heating systems. Seoul, Republic of Korea: Building Environment & Materials Lab, School of Architecture Soongsil University; 2010.
- [5] Arce P, Medrano M, Gil A, Oro´ E, Cabeza LF: Overview of thermal energystorage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe. *Appl. Energy* 2011, 88:2764-2774.
- [6] Heier J, Bales C, Martin V: Combining thermal energy storage with buildings—a review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2015, 42:1305-1325.
- [7] Dincer I, Rosen MA: *Thermal Energy Storage, Systems and Application*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons; 2002.
- [8] Farid M M, Khudhair A, Razack S, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Convers Manag* 2004;45:1597–615.
- [9] Zalba B, Marin J, Cabeza L, Mehling H. Free cooling of buildings with phase change materials. *Int J Refrig* 2004; 27:839–49.
- [10] Hamdan M A, Elwerr F A. Thermal energy storage using a phase change material. *Sol Energy* 1996; 56:183–9.
- [11] Michal Pomianowski, Per Heiselberg, Yinping Zhang. Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy and Buildings*, Volume 67, December 2013, Pages 56–69.
- [12] X. Sun, Q. Zhang, M.A. Medina, K.O. Lee. Experimental observations on the heat transfer enhancement caused by natural convection during melting of solid–liquid phase change materials (PCMs). *Appl Energy*, 162 (2016), pp. 1453–1461.
- [13] T. Qian, J. Li, X. Min, Y. Deng, W. Guan, L. Ning. Diatomite: a promising natural candidate as carrier material for low, middle and high temperature phase change material. *Energy Convers Manag*, 98 (2015), pp. 34–45.
- [14] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Appl Energy*, 92 (2012), pp. 593–605.
- [15] X. Fang, L.-W. Fan, Q. Ding, X.-L. Yao, Y.-Y. Wu, J.-F. Hou, et al. Thermal energy storage performance of paraffin-based composite phase change materials filled with hexagonal boron nitride nanosheets. *Energy Convers Manag*, 80 (2014), pp. 103–109.
- [16] M. Mehrali, S. Tahan Latibari, M. Mehrali, T.M.I. Mahlia, E. Sadeghinezhad, H.S.C. Metselaar. Preparation of nitrogen-doped graphene/palmitic acid shape stabilized composite phase change material with remarkable thermal properties for thermal energy stora.
- [17] M. Lachheb, M. Karkri, F. Albouchi, F. Mzali, S. Ben Nasrallah. Thermophysical properties estimation of paraffin/graphite composite phase change material using an inverse method. *Energy Convers Manag*, 82 (2014), pp. 229–237.
- [18] S. Kamali. Review of free cooling system using phase change material for building. *Energy Build*, 80 (2014), pp. 131–136.
- [19] E. Oró, A. de Gracia, A. Castell, M.M. Farid, L.F. Cabeza, Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications, *Applied Energy* 99 (2012) 513–33.

- [20] A. Sari. Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid–liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties. *Energy Convers Manag*, 45 (2004), pp. 2033–2042.
- [21] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen. Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review.
- [22] M. Iten, S. Liu. A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems. *Energy Convers Manag*, 77 (2014), pp. 608–627.
- [23] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, L. Luo. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 18 (2013), pp. 327–349.
- [24] Potter RA, Weitzel DP, King DJ. Study of operational experience with thermal storage systems. *ASHRAE Trans* 1995;101:549–57.
- [25] Takeda S, Nagano K, Mochida T, Shimakura K. Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material. *Sol Energy* 2004;77(3):329–38.
- [26] Medved S, Arkar C. Correlation between the local climate and the free cooling potential of latent heat storage. *Energy Build* 2008;40(4):429–37.
- [27] K. Yanbing, J. Yi, Z. Yinping, Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system, *Energy and Buildings* 35 (4) (2003) 417–425.
- [28] B. Zalba, J.M. Mariin, L.F. Cabeza, et al., Free-cooling of buildings with phase change materials, *International Journal of Refrigeration* 27 (8) (2004) 839–849.
- [29] S. Takeda, K. Nagano, T. Mochida, et al., Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material, *Solar Energy* 77 (3) (2004) 329–338.
- [30] A. Waqas, S. Kumar, Thermal performance of latent heat storage for free cooling of buildings in a dry and hot climate: an experimental study, *Energy and Buildings* 43 (10) (2011) 2621–2630.
- [31] C. Arkar, B. Vidrih, S. Medved, Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building, *International Journal of Refrigeration* 30 (1) (2007) 134–143.
- [32] V. Butala, U. Stritih, Experimental investigation of PCM cold storage, *Energy and Buildings* 41 (3) (2009) 354–359.
- [33] U. Stritih, V. Butala, Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage, *International Journal of Refrigeration* 33 (8) (2010) 1676–1683.
- [34] V.A.A. Raj, R. Velraj, Heat transfer and pressure drop studies on a PCM-heat exchanger module for free cooling applications, *International Journal of Thermal Sciences* 50 (8) (2011) 1573–1582.
- [35] R. Hed Bellander, Mathematical modelling of PCM air heat exchanger, *Energy and Buildings* 38 (2) (2006) 82–89.
- [36] Mozhevelov S, Ziskind G, Letan R. Temperature moderation in a real-size room by PCM-based units. *J Sol Energy Eng: Trans ASME* 2006;128(2):178–88.
- [37] J.R. Turnpenny, D.W. Etheridge, D.A. Reay, Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings: part I: testing and theoretical modelling, *Applied Thermal Engineering* 20 (11) (2000) 1019–1037.
- [38] X. Wang, J. Niu, Performance of cooled-ceiling operating with MPCM slurry, *Energy Conversion and Management* 50 (3) (2009) 583–591.
- [39] T. Kondo, T. Ibamoto, Research on thermal storage using rock wool phase change material ceiling board, *ASHRAE Transactions* (2006) 526–531.
- [40] M. Yamaha, S. Misaki, The evaluation of peak shaving by a thermal storage system using phase-change materials in air distribution systems, *HVAC&R Research* 12 (Suppl. 3) (2006) 861–869.
- [41] G. Zhou, Y. Yang, H. Xu, Energy performance of a hybrid space-cooling system in an office building

- using SSPCM thermal storage and night ventilation, *Solar Energy* 85 (3) (2011) 477–485.
- [42] F. Agyenim, M. Rhodes, I. Knight, The use of phase change material (PCM) to improve the coefficient of performance of a chiller for meeting domestic cooling in Wales, in: *Proceedings 2nd PALENC Conf. and 28th AIVC Conference, Crete Island, Greece, 2007.*
- [43] M. Helm, C. Keil, S. Hiebler, et al., Solar heating and cooling system with absorption chiller and low temperature latent heat storage: energetic performance and operational experience, *International Journal of Refrigeration* 32 (4) (2009) 596–606.
- [44] M. Koschenz, B. Lehmann, Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings, *Energy and Buildings* 36 (6) (2004) 567–578.
- [45] C. Voelker, O. Kornadt, M. Ostry, Temperature reduction due to the application of phase change materials, *Energy and Buildings* 40 (5) (2008) 937–944.
- [46] L. Shilei, F. Guohui, Z. Neng, et al., Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards, *Energy and Buildings* 39 (10) (2007) 1088–1091.
- [47] F. Kuznik, J. Virgone, J.-J. Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation, *Energy and Buildings* 40 (2) (2008) 148–156.
- [48] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, et al., Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings* 42 (4) (2010) 534–540.
- [49] I. Ceron, J. Neila, M. Khayet, Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use, *Energy and Buildings* 43 (8) (2011) 1869–1874.
- [50] R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti, et al., Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control, *Energy and Buildings* 43 (11) (2011) 3019–3026.
- [51] Stetiu C, Feustel HE. Phase-change wallboard and mechanical night ventilation in commercial buildings. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California; 1998.
- [52] Halford CK, Boehm RF. Modeling of phase change material peak load shifting. *Energy Build* 2007;39(3):298–305.
- [53] Zhu N, Wang SW, Ma ZJ, Sun YJ. Energy performance and optimal control of air-conditioned buildings with envelopes enhanced by phase change materials. *Energy Convers Manage* 2011;52(10):3197–205.
- [54] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, F. de' Rossi, G. P. Vanoli. Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, Vol 113 (2014), pp 990-1007.
- [55] Lv SL, Feng GH, Zhu N, Li DY. Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards. *Energy Build* 2007;39(10):1088–91.
- [56] E.M. Alawadhi, H.J. Alqallaf, Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: numerical study, *Energy Conversion and Management* 52 (8–9) (2011) 2958–2964.
- [57] A. Pasupathy, R. Velraj, Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, *Energy and Buildings* 40 (3) (2008) 193–203.
- [58] X. Jin, X. Zhang, Thermal analysis of a double layer phase change material floor, *Applied Thermal Engineering* 31 (10) (2011) 1576–1581.
- [59] Zhang Y, Faghri A. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally finned tube. *J Heat Mass Transfer* 1996;39:3165–73.
- [60] Zhang Y, Faghri A. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using an external radial finned tube. *J Enhanced Heat Transfer* 1996;3:119–27.
- [61] Lacroix M, Benmadda M. Numerical simulation of natural convection dominated melting and solidification from a finned vertical wall. *J Numerical Heat Transfer A* 1997;31:71–86.
- [62] Roth K, Zogg R, Brodrick J. Cool thermal energy storage. *ASHRAE J* 2006;48:94–6.
- [63] Ho CD, Tu JW. Evaluation of a recirculation scheme for ice storage melting with air as the working fluid.

J Heat Transfer Eng 2008;29:295–305.

- [64] Wang, S.K. Handbook of air conditioning and refrigeration, 2nd ed.; McGraw-Hill, 2001.
- [65] Y.H. Yau, Behzad Rismanchi. A review on cool thermal storage technologies and operating strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 787– 797.
- [66] Shi W, Wang B, Li X. A measurement method of ice layer thickness based on resistance-capacitance circuit for closed loop external melt ice storage tank. J Appl Therm Eng 2005;25:1697–707.
- [67] Thermal storage. In: ASHRAE handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta: HVAC Applications; 2007 [chapter 34].
- [68] Dorgan CE, Elleson JS. Design guide for cool thermal storage. Atlanta, GA: ASHRAE, Inc.; 1994.
- [69] <[www.cryogel.com](http://www.cryogel.com)>.
- [70] Cool storage technology guide. Palo Alto, CA: EPRI; 2000 (TR-111874).
- [71] Y.H. Yau, Behzad Rismanchi. A review on cool thermal storage technologies and operating strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 787– 797.

## 10 Indice delle figure

Figura 1. Classificazione dei PCM [14].	8
Figura 2a. PCM non commerciali per l'accumulo del freddo [19].	9
Figura 3. PCM commerciali per l'accumulo del freddo [19].	12
Figura 4. Schema del sistema proposto da Yanbing et al. [27].	14
Figura 5. (a) Schema del sistema proposto da Zalba et al., e (b) schema del TES [28].	14
Figura 6. Schema dell'apparato sperimentale proposto da Takeda et al. [29].	15
Figura 7. Schema dell'unità a PCM utilizzata da Waqas and Kumar [30].	15
Figura 8. Schema del sistema proposto da Turnpenny et al. [37].	17
Figura 9. Schema del sistema proposto da Wang and Niu [38].	17
Figura 10. Schema del sistema proposto da Kondo and Ibamoto [39].	18
Figura 11. Schema del sistema proposto da Yamaha and Misaki [40].	19
Figura 12. Schema del sistema proposto da Helm et al. [43].	20
Figura 13. Schema del sistema proposto da Kuznik et al. [47].	21
Figura 14. Schema del sistema proposto da Ceron et al. [49].	21
Figura 15. Prototipo realizzato da Ansuini et al. [50].	22
Figura 16. Schema del sistema proposto da Alawadhi and Alqallaf [56].	22
Figura 17. Schema del sistema proposto da Pasupathy and Velraj [57].	23
Figura 18. Schema del sistema proposto da Jin and Zhang [58].	23
Figura 19. Tipico schema di un sistema ice harvester [64].	25
Figura 20. Schema di un sistema Ice Slurry [65].	26
Figura 21. Esempio di sistema di accumulo con ghiaccio del tipo external ice on coil [64].	26
Figura 22. Fasi di scarica e carica del ghiaccio in un sistema external ice on coil [67].	26
Figura 23. Esempio di sistema internal ice on coil [64].	27
Figura 24. Fasi di scarica e carica del ghiaccio in un sistema internal ice on coil [64].	27
Figura 25. Esempi di sistemi con ghiaccio incapsulato (a) Cryogel [69], (b) Crystopia [70], and (c) Ice-Bon [70].	28
Figura 26. Fasi di carica e scarica in un sistema con ghiaccio incapsulato [71].	28