Accumuli stagionali nel residenziale

Gli accumuli in acqua rappresentano la soluzione più economica ed efficace se associati a sistemi in grado di aumentare la loro capacità termica

*M. Surra**

L'obiettivo NZEB (Nearly Zero Energy Building) per gli edifici residenziali, in particolare per quelli unifamiliari, in cui il rapporto tra superficie disponibile per la installazione di sistemi di FER (fonti energetiche rinnovabili) e la superficie utile da climatizzare è elevato, costituisce ormai un traguardo agevolmente conseguibile.

Infatti, da un lato la riduzione del fabbisogno energetico, legato all'aumentato isolamento dell'involucro edilizio, dall'altro il moderato incremento dell'efficienza delle FER, l'affermazione di nuove tecnologie (pompe di calore) e specialmente i ridotti costi di implementazione, hanno consentito di ottenere un bilancio energetico totalmente sostenibile su base annua.

Quindi la produzione energetica mediante FER può superare il fabbisogno annuo, ma raramente si presenta "in fase" con esso.

Infatti, se consideriamo due tra le fonti rinnovabili più facilmente impiegabili nell'ambito dell'edilizia residenziale, e cioè il solare fotovoltaico per l'energia elettrica e il solare termico per l'acqua calda, è evidente che la produzione energetica nel periodo estivo, sia per numero di ore di insolazione che per inclinazione dell'eclittica, è decisamente superiore ai fabbisogni, mentre quella invernale è generalmente insufficiente.

Quindi il riscaldamento invernale richiede necessariamente dei sistemi di accumulo. Escludendo l'idrogeno, soluzione al momento non ancora effi-

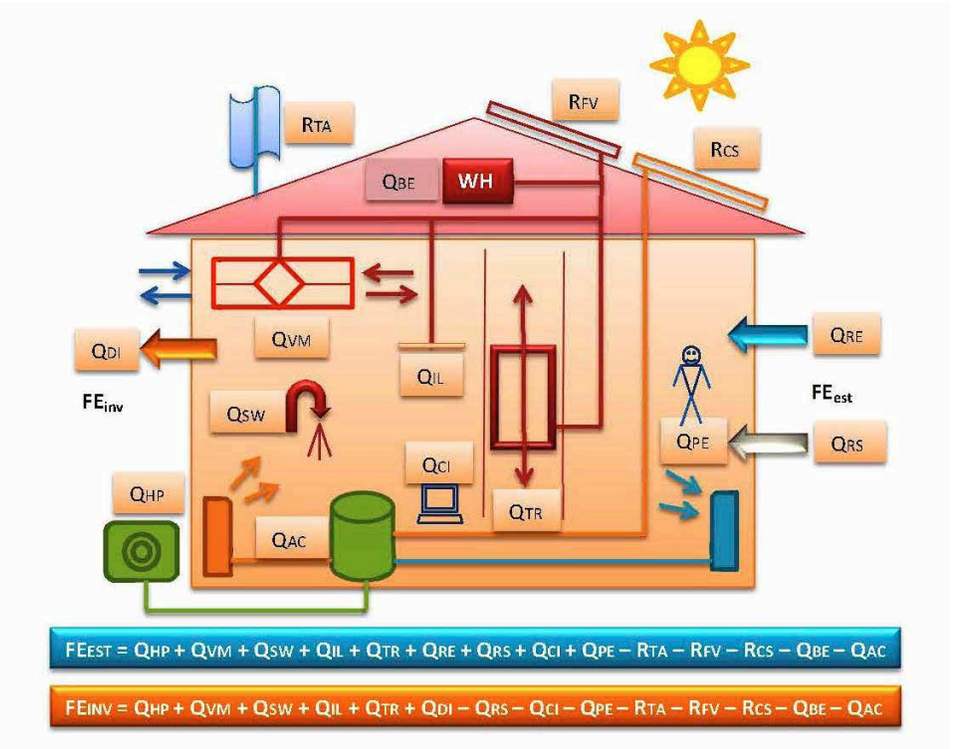

FIGURA 1 Bilancio energetico di un edificio
LEGENDA
FE_{est} = fabbisogno energetico estivo
FE_{inv} = fabbisogno energetico invernale
Q_{HP} = energia elettrica pompa di calore
Q_{VM} = energia elettrica ventilazione
Q_{SW} = energia termica acqua sanitaria
Q_{IL} = energia elettrica illuminazione
Q_{TR} = energia elettrica trasporti interni
Q_{RE} = energia termica rientrate estive
Q_{DI} = energia termica dispersioni invernali
Q_{RS} = energia termica rientrate solari
Q_{CI} = energia termica carichi interni
Q_{PE} = energia termica persone presenti
R_{TA} = recupero energia elettrica turbina
R_{FV} = recupero energia elettrica fotovoltaica
R_{CS} = recupero energia termica collettori
Q_{BE} = accumulo energia batterie elettriche
Q_{AC} = accumulo energia termica in acqua

cacemente praticabile per ragioni di sicurezza e di efficienza, in ambito residenziale sono adottabili sistemi di accumulo di tipo termico in acqua o di tipo elettrochimico.

L'attuale incentivazione dell'efficientamento energetico nel settore edilizio favorisce l'installazione di sistemi di autoproduzione dell'energia elettrica mediante pannelli fotovoltaici la cui potenza di picco va commisurata alle utenze da servire che, oltre ad ascensori e impianti di illuminazione (le cui potenze assorbite stanno drasticamente scendendo in ragione dell'elevata efficienza dei corpi illuminanti a LED e dei nuovi motori sincroni brushless in corrente continua) sono costituite dagli elettrodomestici, dalle piastre di cottura a induzione e specialmente dai sistemi di riscaldamento in pompa di calore.

Infatti, non ha senso installare delle elevate potenze di picco (anche per le colonnine di ricarica delle auto elettriche [A]) e conseguentemente grandi sistemi di accumulo di tipo elettrochimico, per poi cedere al Gestore gran parte dell'energia prodotta.

Allo stato attuale, anche se la ricerca nel settore è molto promettente, le batterie al litio presentano elevati costi di produzione, per la scarsità delle materie prime, e di smaltimento (le più ecologiche batterie a base di ioni di sodio sono ancora poco efficienti).

Vedremo quindi nel presente articolo come gli accumuli in acqua rappresentino la soluzione più economica ed efficace se associati a sistemi in grado di aumentare la loro capacità termica.

Schema flusso energetico

In ingresso al nostro sistema fabbricato-impianto avremo delle fonti energetiche non rinnovabili (combustibili fossili, tipicamente gas metano e energia elettrica di rete in corrente alternata) e delle FER (acqua calda proveniente da collettori solari termici e energia elettrica in corrente continua proveniente da pannelli fotovoltaici). Si veda Figura 1.

Avremo quindi un accumulo in parte di tipo elettrochimico e in parte di tipo termico, in acqua.

Accumuli in acqua

Nell'attuale impostazione impiantistica per i sistemi di riscaldamento invernale, in cui il vettore termico è costituito dall'acqua calda, si utilizzano sistemi di produzione, da fonte rinnovabile o meno, a diverse temperature, che possono essere costituiti da caldaie a combustibile di origine fossile (di tipo liquido o gassoso), di tipo tradizionale ad alta temperatura o a condensazione, da caldaie a biomassa, da pompe di calore, da collettori solari termici.

La compresenza di diversi sistemi di produzione a differenti temperature e la contemporanea necessità di alimentare sistemi di emissione operanti anch'essi a diverse temperature (radiatori, ventilconvettori, unità termoventilanti, sistemi radianti a pavimento o soffitto, ecc.), giustifica l'adozione di serbatoi di accumulo di acqua tecnica, definiti inerziali in quanto in grado di incrementare la capacità termica del sistema di riscaldamento nel suo complesso.

Tali accumuli sono in genere alimentati in modo stratificato, favorendo cioè il gradiente termico verticale che si viene a creare per effetto della diversa densità dell'acqua alle varie temperature al fine di rendere più efficace l'utilizzo, andando a prelevare l'acqua per le utenze nella zona verticale di maggior convenienza.

L'immissione avviene sulla base del criterio della potenza termica, cioè dell'energia erogabile nell'unità di tempo. Per tale ragione, pur potendo entrambi produrre acqua a elevata temperatura, l'immissione di una caldaia

TIPOLOGIE DEI SISTEMI DI ACCUMULO IN ACQUA

Sistemi di accumulo termico sensibile (SHTES)

Nei sistemi di accumulo termico sensibile, l'energia viene stoccata attraverso la variazione di temperatura di un materiale liquido o solido. Questo processo non prevede alcun cambiamento di fase nell'intervallo di temperature di esercizio, infatti ciò che varia è solo la temperatura del mezzo di accumulo. In un sistema SHTES la quantità di calore accumulabile dipende dalla massa *m* del mezzo, dal suo calore specifico e dalla variazione di temperatura ammissibile.

L'energia associata a un accumulo sensibile, che provoca un innalzamento della temperatura del materiale è data da:

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_f} m \cdot c_p \cdot dt = m \cdot c_p \left(t_f - t_i\right) \quad (1)$$

dove

Q_s = quantità di calore immagazzinata [J] o [kWh/(3,6 · 10⁶)];

m = massa del mezzo di accumulo di calore [kg];

c_p = calore specifico [J/(kg K)];

t_i = temperatura iniziale [°C];

t_f = temperatura finale [°C].

Il materiale più comune utilizzato in un sistema di accumulo di calore sensibile è l'acqua. Un TES (Thermal Energy Storage) a calore sensibile è costituito dalla sostanza di accumulo (acqua), da un serbatoio, da uno scambiatore contenente un fluido termovettore diverso da quello utilizzato per l'accumulo e da dispositivi di ingresso e uscita. L'efficienza dell'accumulo può essere migliorata garantendo una stratificazione termica dell'acqua nel serbatoio e un efficace isolamento termico. Un esempio di un serbatoio di accumulo di acqua calda stratificato è mostrato in figura 2.

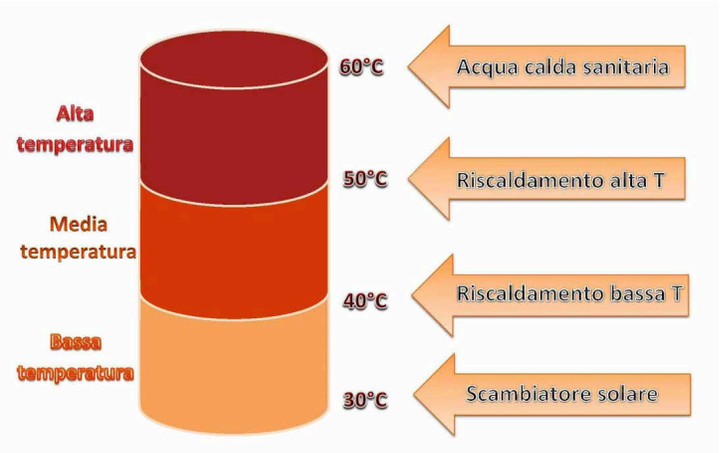

FIGURA 2 Esempio di serbatoio di accumulo stratificato

Sistemi di accumulo termico latente (LHTES)

Nei sistemi LHTES il mezzo di accumulo cambia di fase nell'intervallo delle temperature di esercizio. Il mezzo rilascia o assorbe energia con un cambiamento di stato (quasi del tutto isotermico). Il calore immagazzinato è legato al calore latente del materiale. Rispetto ai sistemi SHTES, la densità di accumulo di energia è maggiore e quindi è possibile ridurre il volume del serbatoio.

L'energia accumulabile sotto forma di calore latente Q_L [J] del sistema LHS con un supporto di *PCM* (materiale a cambiamento di fase) è funzione della massa *m* e del salto entalpico λ che è necessario fornire per far avvenire il cambiamento di fase, ed è data da:

$$Q_L = m \cdot \lambda$$

dove:

Q_L = energia termica accumulata [J] o [kWh/(3,6 · 10⁶)];

λ = calore latente di fusione [J/kg];

m = massa del mezzo [kg].

Tuttavia, nella pratica, è difficile operare isotermicamente alla temperatura di cambiamento di fase; il sistema opera in un intervallo di temperature (t_i, t_f) che include la temperatura di fusione t_m. In questo caso, oltre al calore latente, si deve considerare anche il contributo del calore sensibile accumulato in parte dal solido e in parte dal liquido. In definitiva l'energia termica totalmente accumulata Q_{tot} [J] dal sistema TES risulta:

$$Q_{tot} = \int_{t_i}^{t_m} m \cdot c_p \cdot dt + m \cdot f \cdot \lambda + \int_{tm}^{t_f} m \cdot c_p \cdot dt$$

$$Q_{tot} = m\left[c_{ps}\left(t_m - t_i\right) + f \cdot \lambda + c_{pl}\left(t_f - t_m\right)\right] \quad (2)$$

dove

t_m = temperatura di fusione [°C];

m = massa del mezzo *PCM* [kg];

c_{ps} = calore specifico medio della fase solida compreso tra t_i e t_m [J/(kg K)];

c_{pl} = calore specifico medio della fase liquida tra t_m e t_f [J/(kg K)];

f = frazione di fusione;

λ = calore latente di fusione [J/kg];

Ogni sistema di accumulo di energia termica latente possiede almeno i seguenti tre componenti:

1. una sostanza adatta con il punto di fusione nell'intervallo di temperatura desiderato;
2. un'adeguata superficie di scambio termico;
3. un serbatoio adatto compatibile con il mezzo a cambiamento di fase.

I principali vantaggi del sistema LHTES rispetto al SHTES dell'acqua sono:

- la possibilità di ridurre il volume del serbatoio per una data quantità di energia immagazzinata, cosa che può essere eseguita solo se l'accumulo viene fatto funzionare in un intervallo di temperatura molto ristretto, vicino alla temperatura di transizione di fase;
- minor numero di cicli di accensione/spegnimento delle resistenze ausiliarie (per impianti con accumulo lato caldo) e chiller (per impianti con accumulo lato freddo).

In passato l'accumulo latente era ottenuto quasi esclusivamente tramite ghiaccio. Recentemente la ricerca ha individuato sostanze che operano il cambiamento di fase nelle condizioni e alle temperature più diverse, consentendo di realizzare accumuli per applicazioni che vanno dalla climatizzazione degli edifici a quelle di potenza.

avverrà nella parte alta dell'accumulo, mentre quella di un sistema solare termico avverrà nella parte bassa. In questo modo un sistema "lento" di riscaldamento agirà su tutto l'accumulo, mentre i picchi di potenza potranno essere gestiti scaldando rapidamente solo la parte alta del serbatoio.

Accumulo stagionale

L'impianto solare termico può immagazzinare energia termica solo sensibile, o sensibile e latente, nei serbatoi di stoccaggio, per estendere l'efficacia del sistema anche alle ore notturne e ridurre la dipendenza dai combustibili fossili. L'accumulo di energia termica può anche essere implementato come parte di un sistema a pompa di calore, supportato da energia elettrica da solare fotovoltaico e accumulata in batterie elettrochimiche, per consentire il funzionamento durante la notte e nei giorni nuvolosi.

Ipotizziamo di realizzare un accumulo termico in acqua di dimensioni tali da garantire l'autonomia energetica per un periodo più lungo in assenza di alimentazione, in altri termini di utilizzare un accumulo di tipo stagionale. E' interessante valutare le dimensioni che dovrebbe avere tale accumulo in funzione della durata per la quale esso viene calcolato.

Accumulo sensibile in acqua

Consideriamo un edificio in classe energetica A4 (condizione agevolmente conseguibile, sia in termini di nuova costruzione che di retrofit), ubicato in Torino (zona climatica E), con un valore di $EP_{nren} = 40$ kWh/(m²a) avente superficie utile 150 m². L'edificio presenta un fabbisogno di 6000 kWh termici annui pari a 21,6 GJ/a.

Valutiamo le dimensioni che dovrebbe avere un accumulo termico sensibile in acqua in grado di garantire il funzionamento stagionale dell'impianto.

BOX 2

ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NELL'ACCUMULO [1]

Raffreddamento dell'accumulo in assenza di prelievo

Il raffreddamento di un accumulatore può essere espresso con la funzione esponenziale:

$$\Delta t_t = \Delta t_i \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} \qquad (3)$$

dove:

Δt_t = sovratemperatura dell'accumulatore al tempo τ [°C];

Δt_i = sovratemperatura dell'accumulatore all'inizio del raffreddamento [°C];

τ = durata del raffreddamento [h];

m = massa della sostanza accumulatrice che si raffredda [kg];

c_p = calore specifico della sostanza accumulatrice (acqua) = 4,186 [kJ/(kg K)] = 1,16 [Wh/(kg K)];

A_V = superficie disperdente dell'accumulatore [m²];

k = coefficiente globale di scambio termico parete accumulatore [W/(m² K)].

T = costante di tempo del raffreddamento [h] = $m \cdot c_p / (A_V \cdot k)$.

Risolvendo l'equazione (3) rispetto alla costante di tempo T si ottiene:

$$T = \tau / \ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_t} \qquad (4)$$

Raffreddamento dell'accumulo in presenza di prelievo

Finora ci siamo limitati a considerare il mantenimento in temperatura dell'accumulo. Nel funzionamento effettivo l'accumulatore cede calore utile e disperde contemporaneamente calore dalla sua superficie.

Il bilancio termico dell'accumulatore per ogni mese considerato è dato da:

$$\underbrace{\dot{Q}_f \cdot d\tau}_{\text{Fornitura di calore}} = \underbrace{A_V \cdot k \cdot t \cdot d\tau}_{\text{Perdita di calore}} + \underbrace{\dot{Q}_{acc} \cdot d\tau}_{\text{Cessione di calore utile}} + \underbrace{m \cdot c_p \cdot dt}_{\text{Calore accumulato}} = 0 \qquad (5)$$

Durante l'inverno si assume prudenzialmente che la fornitura di calore sia nulla.

Separando le variabili:

$$-\left(\dot{Q}_{acc} + A_V \cdot k \cdot t\right) \cdot d\tau = m \cdot c_p \cdot dt$$

$$-\frac{d\tau}{m \cdot c_p} = dt \Big/ \left(\dot{Q}_{acc} + A_V \cdot k \cdot t\right)$$

Integrando si ottiene:

$$-A_V \cdot \frac{k}{m \cdot c_p} \cdot \tau = \ln\left(\dot{Q}_{acc} + A_V \cdot k \cdot t\right) - \ln C$$

essendo T = costante di tempo del raffreddamento [h] = $m \cdot c_p / (A_V \cdot k)$.

$$\dot{Q}_{acc} + A_V \cdot k \cdot t = C \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}$$

da cui

$$t = \frac{C}{A_V \cdot k} \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} - \frac{\dot{Q}_{acc}}{A_V \cdot k} \qquad (6)$$

Per $\tau = 0$ si ha la temperatura dell'accumulatore all'inizio del raffreddamento:

$$t_{i,acc} = \frac{C - \dot{Q}_{acc}}{A_V \cdot k}$$

da cui:

$$C = A_V \cdot k \cdot t_{i,acc} + \dot{Q}_{acc}$$

sostituendo nella (6) si ottiene:

$$t = \frac{A_V \cdot k \cdot t_{i,acc} + \dot{Q}_{acc}}{A_V \cdot k} \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} - \frac{\dot{Q}_{acc}}{A_V \cdot k}$$

L'equazione vale solo per il periodo di tempo τ in cui Q_{acc} può essere considerato costante.

$t_{i,acc}$ e t sono sovratemperature quindi la (3) diventa:

$$\Delta t_t = t_i \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} - \frac{\dot{Q}_{acc}}{A_V \cdot k}\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) \qquad (7)$$

essendo T = costante di tempo del raffreddamento [h] = $m \cdot c_p / (A_V \cdot k)$.

Questa equazione è paragonabile alla (3) nel primo termine che tiene conto del

Immaginiamo di scaldare durante l'estate l'accumulatore, mediante dei collettori solari, fino a una temperatura di 80 °C e che in inverno possa essere raffreddato fino a 40 °C, considerando di alimentare un impianto di riscaldamento di tipo radiante a pavimento. Per semplicità l'apporto solare viene considerato solo in estate, e l'utilizzo solo in inverno. In prima istanza non si considerano le dispersioni dell'involucro.

Quindi la differenza di temperatura corrispondente al calore utile è data da $\Delta t_{ut} = 80 - 40 = 40$ °C

Determinazione del volume dell'accumulo stagionale

Al netto delle perdite, il volume dell'accumulatore termico stagionale è dato dalla (1), che possiamo scrivere come:

$$V_{acc} = \frac{Q_{acc}}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta t_{ut}} \qquad (2)$$

dove:

V_{acc} = volume accumulatore [m³];

Q_{acc} = energia termica da immagazzinare [kJ];

c_p = calore specifico acqua [4,186 kJ/(kg K)];

ρ = densità acqua [1000 kg/m³].

Se consideriamo che l'accumulatore presenti il 20% di dispersioni, occorre maggiorare il fabbisogno calcolato Q_s di 21,6 GJ/a che diventa $Q_{acc} = Q_s \cdot 1{,}2 = 25{,}92$ GJ/a.

Risulta un volume $V_{acc} = 25920000/(4{,}186 \cdot 1000 \cdot 40) = 155$ m³.

L'energia termica dovrebbe essere approvvigionata per il periodo di riscaldamento invernale, tipicamente dal 15 ottobre al 15 aprile, per 183 giorni. Trattandosi di impianto radiante non vengono considerate intermittenze di funzionamento. La durata dell'accumulo sarà quindi $d = 183 \cdot 24 = 4392$ [h].

Calcolo spessore dell'isolamento termico

Consideriamo che l'accumulatore sia costituito da un serbatoio interrato. Con una temperatura iniziale dell'accumulo di 80 °C e una temperatura media invernale del terreno $t_g = 10$ °C la differenza di temperatura iniziale risulta essere: $\Delta t_i = t_i - t_g = 80 - 10 = 70$ °C.

Poniamo che il raffreddamento dell'accumulatore per dispersioni termiche Δt_V, quando non viene sottratto calore utile sia al massimo del 20% della caduta di temperatura utile Δt_{ut}, cioè $\Delta t_V = 40 \cdot 0{,}2 = 8$ °C.

Quindi, in assenza di prelievo di energia termica, alla fine del periodo di accumulo termico la sovratemperatura sarebbe ancora di $\Delta t_t = \Delta t_i - \Delta t_V = 70 - 8 = 62$ °C

Dall'equazione (4) si può calcolare la costante di tempo $T = 4392/\ln{}^{70}\!/_{62} = 36190$[h].

Consideriamo che l'accumulo sia di forma cilindrica di volume $V = \pi r^2 h$ con raggio 2,25 m e altezza 10 m tale per cui $V = \pi 2{,}25^2 \cdot 10 = 159$ m³ da cui $A_v = 2\pi r(h + r) = 173$ m².

Il coefficiente globale di scambio termico è dato da:

$$k = m \cdot \frac{c_p}{A_V \cdot T} = 155000 \cdot 1{,}16 / (173 \cdot 36190) = 0{,}029 \text{ [W/(m}^2\text{ K)]}$$

Considerando di utilizzare un isolamento in schiuma di poliuretano con una conducibilità 0,024 W/(m K) occorrerebbe uno spessore di isolante s = 0,024/0,029 = 83 cm.

Andamento della temperatura in presenza di sottrazione di calore utile

Il raffreddamento dell'accumulo viene determinato secondo la procedura descritta nel box 2.

Ritornando al caso in esame applicando la (7) può essere calcolato l'andamento delle temperature nell'accumulatore in presenza di prelievo come risulta nelle ultime due colonne della tabella 1.

Accumulo in acqua con *PCM* (materiale a cambiamento di fase)

Dalle valutazioni eseguite si evince come le dimensioni e lo spessore di isolamento, richiesti per un accumulo stagionale in acqua di tipo solamente sensibile, lo rendano difficilmente proponibile.

Se consideriamo di far cambiare di fase all'acqua (situazione che sarà considerata nel prossimo paragrafo), o più semplicemente di introdurre all'interno dell'accumulo un materiale in grado di cambiare stato nel range delle temperature in cui deve operare

TABELLA 1 Energia termica utile che deve cedere l'accumulatore in assenza di generazione ausiliaria

Mese	Giorni	T_{media} est. [°C]	$\Delta t = (20 - t_e)$ [°C]	GG	Q [%]	Q [GJ/mese]	[s/mese]	Q_N [kW]	[h/mese]	Δt_i [°C]	Δt_f [°C] solo dispersioni	Δt_f [°C] con dispersioni e prelievo
Ottobre	17	12,6	7,4	126	4,8	1,032	1468800	0,70	408	80	70	70
Novembre	30	6,8	13,2	396	15,0	3,248	2592000	1,25	720		69,22	67,65
Dicembre	31	2	18	558	21,2	4,577	2678400	1,71	744		66,31	61,39
Gennaio	31	0,4	19,6	608	23,1	4,984	2678400	1,86	744		60,14	53,21
Febbraio	28	3,2	16,8	470	17,9	3,859	2419200	1,60	672		52,13	44,58
Marzo	31	8,2	11,8	366	13,9	3,001	2678400	1,12	744		43,76	37,91
Aprile	15	12,7	7,3	110	4,2	0,898	1296000	0,69	360		37,14	32,60
	183			2633	100,0	21,6			4392		32,27	30,91

l'accumulo, possiamo aumentare considerevolmente la capacità termica dello stesso e conseguentemente siamo in grado di ridurne proporzionalmente le dimensioni, rendendo possibile un utilizzo stagionale del sistema di stoccaggio dell'energia termica.

In presenza di accumulo solamente sensibile, il calore immagazzinato dipende dalla massa *m* (prodotto del volume per la densità), dal calore specifico della sostanza e dal salto termico, come riportato nella (8).

$$Q_{acc} = c_p \cdot \rho \cdot V_{acc} \cdot \Delta t_{ut} \qquad (8)$$

dove:

Q_{acc} = energia termica da immagazzinare [kJ];

V_{acc} = volume accumulatore [m³];

c_p = calore specifico acqua [4,186 kJ/(kg K)];

ρ = densità acqua [1000 kg/m³];

Δt_{ut} = differenza di temperatura utile [°C].

Se inseriamo all'interno dell'accumulo un materiale a cambiamento di fase (generalmente contenuto entro sfere o cilindri di piccole dimensioni), esso può cambiare di stato nella fase di accumulo del calore (ad esempio durante la stagione estiva attraverso l'energia termica direttamente ricavata da un sistema di collettori solari oppure da cascami termici quali il calore ceduto al condensatore da un gruppo frigorifero oppure indirettamente prodotta attraverso una pompa di calore o una resistenza elettrica alimentata dalla sovrapproduzione estiva di un campo fotovoltaico) aumentando di molto la capacità dell'accumulo.

Immaginiamo di inserire nel nostro accumulo in acqua un volume pari all'80% costituito da involucri sigillati di un *PCM* avente una temperatura di fusione in un intervallo di temperatura tra 80 °C e 40 °C, utile per la nostra utenza. Per semplicità consideriamo che la temperatura di fusione sia prossima a 40 °C.

In questo caso il volume dell'accumulo sarà dato dalla (9 bis):

$$Q_{acc} = 0{,}2 \cdot V_{acc} \cdot c_p \cdot \rho_{H2O} \cdot \Delta t_{ut} + 0{,}8 \cdot V_{acc} \cdot \rho_{PCM} \left(c_{PCM} \cdot \Delta t_{ut} + \lambda \right) \qquad (9)$$

da cui

$$V_{acc} = \frac{Q_{acc}}{0{,}2 \cdot c_p \cdot \rho_{H2O} \cdot \Delta t_{ut} + 0{,}8 \cdot \rho_{PCM} \left(c_{PCM} \cdot \Delta t_{ut} + \lambda \right)} \qquad (9\ \text{bis})$$

Considerando la necessità di accumulare, come nel caso in esempio, 25,92 GJ nel periodo di riscaldamento e adottando un *PCM* (ad esempio un sale idrato a smaltimento sostenibile a fine ciclo di vita) avente le seguenti caratteristiche:

λ = calore latente di fusione del *PCM* = 200 [kJ/kg];

ρ_{PCM} = densità del *PCM* =1540 [kg/m³];

c_{PCM} = calore specifico del *PCM* = 3,14 [kJ/(kg K)];

si ottiene V_{acc} = 60 m³.

Si evince come l'utilizzo di un accumulo latente ha ridotto di più del 60% la dimensione dell'accumulo che è passato da 155 m³ a 60 m³. La realizzazione di un accumulo stagionale utilizzando un materiale a cambiamento di fase diventa praticabile trasformando ad esempio dei serbatoi di gasolio interrati esistenti, previa realizzazione di camera di tenuta, oppure installando dei nuovi serbatoi in resina.

Il calcolo eseguito è comunque cautelativo in quanto non considera alcun apporto solare nella stagione invernale.

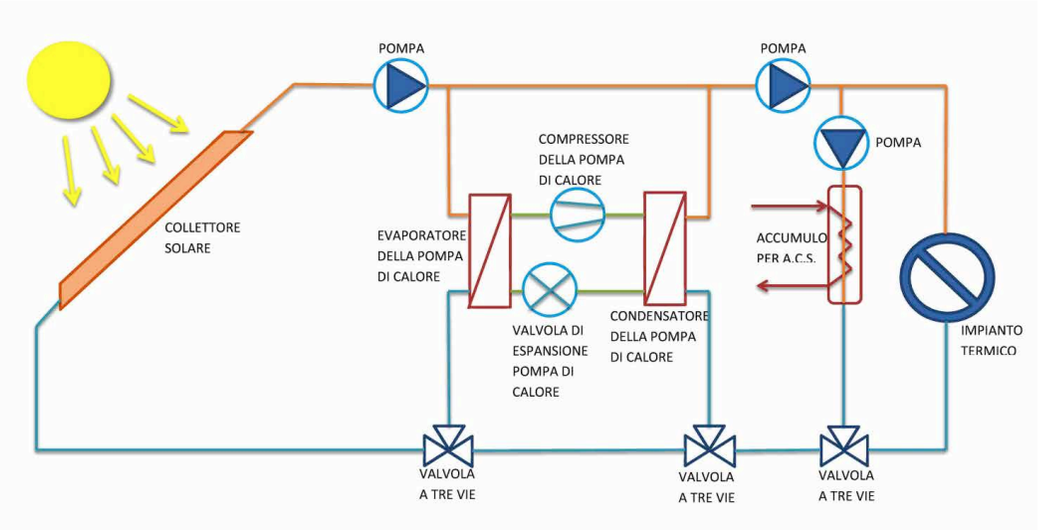

FIGURA 3 Schema di sistema di accumulo con pompa di calore

Accumulo in acqua con pompa di calore

Le dispersioni termiche all'involucro del sistema di accumulo stagionale possono essere notevolmente ridotte attraverso la diminuzione della temperatura con cui viene accumulata l'energia termica nel serbatoio.

In questo caso una pompa di calore acqua-acqua può estrarre calore dall'accumulo, inteso come sorgente a bassa temperatura fino al congelamento dell'accumulo stesso sfruttando il calore dovuto al cambiamento di fase liquido-solido dell'acqua: l'energia accumulata risulta essere molto maggiore. Si veda Figura 3.

In questo caso l'energia termica accumulata è data ancora dalla (8) che possiamo scrivere come:

$$Q_{acc} = \underbrace{V_{acc} \cdot \rho_{H2O} \cdot c_p \cdot \Delta t_{ut}}_{\text{Calore sensibile}} + \underbrace{V_{acc} \cdot \rho_{ICE} \cdot f \cdot \lambda}_{\text{Calore latente di congelamento}} \qquad (10)$$

dove:

Q_{acc} = energia termica da immagazzinare [kJ];

V_{acc} = volume accumulatore [m³];

c_p = calore specifico acqua [4,186 kJ/(kg K)];

ρ_{H20} = densità acqua a 4 °C [1000 kg/m³];

ρ_{ICE} = densità ghiaccio [999,8 kg/m³];

Δt_{ut} = differenza di temperatura utile [°C];

f = grado di congelamento;

λ = entalpia di congelamento o di fusione = [335 kJ/kg].

Il grado di congelamento deve essere inferiore a 1 per tenere lontana dalle pareti dell'accumulatore l'azione di spinta generata dal congelamento. Ricordiamo infatti che l'acqua è una delle poche sostanze che passando allo stato solido aumenta di volume e quindi diminuisce di densità [B]. Tuttavia, ai fini del calcolo possiamo assumere che $\rho_{H20} = \rho_{ICE}$ che continueremo a chiamare ρ.

Quindi la (10) diventa:

$$V_{acc} = \frac{Q_{acc}}{\rho\left(c_p \cdot \Delta t_{ut} + f \cdot \lambda\right)} \qquad (11)$$

di cui si richiama l'analogia con la (2), ricavata in assenza di calore latente.

Sostituendo i valori del nostro caso esempio:

Q_{acc} = energia termica da immagazzinare = 25,92 [GJ];

c_p = calore specifico acqua [4,186 kJ/(kg K)];

ρ = densità acqua [1000 kg/m^3];

Δt_{ut} = differenza di temperatura utile [°C];

f = grado di congelamento = 0,5 (solo il 50% dell'acqua viene trasformata in ghiaccio);

λ = entalpia di congelamento o di fusione = [335 kJ/kg].

Si ottiene un volume V_{acc} dell'accumulatore di 77 m^3.

Ma utilizzare un accumulo a bassa temperatura, sfruttando il calore di congelamento dell'acqua, presuppone l'utilizzo di una pompa di calore e la conseguente fornitura di energia elettrica per il suo funzionamento (che potrebbe derivare, anche in condizioni invernali, da energia fotovoltaica accumulata entro batterie a ciclo diurno).

Occorre considerare che il lavoro motore della pompa di calore può essere convertito in calore andando ad aumentare il calore estraibile dall'accumulatore. In altri termini il calore accumulato, a parità di fornitura di calore per il riscaldamento, può essere diminuito in misura pari al lavoro motore della pompa di calore.

Quindi il volume dell'accumulo V_{acc} può essere ridotto del rapporto ($COP - 1/COP$) essendo COP (Coefficient Of Performance) l'efficienza della pompa di calore intesa come il rapporto tra il calore erogato e il lavoro meccanico necessario al suo funzionamento.

Quindi la (11) diventa:

$$V_{acc} = \frac{Q_{acc}}{\rho\left(c_p \cdot \Delta t_{ut} + f \cdot \lambda\right)} \cdot \frac{COP - 1}{COP} \qquad (11\ bis)$$

Possiamo assumere, per una pompa di calore acqua-acqua, un valore COP = efficienza della pompa di calore nel periodo di riscaldamento = 3. Conseguentemente il volume dell'accumulo diventa V_{acc} = 52 m^3.

È immediato osservare che maggiore è l'efficienza della pompa di calore, più grande deve essere il volume dell'accumulo a fronte di una minor energia elettrica spesa.

Per ridurre le dispersioni all'involucro dell'accumulatore, e limitare lo spessore dell'isolante, potremmo abbassare la temperatura a cui scaldare l'accumulo in estate, ad esempio al valore di 12 °C.

In questo caso il volume dell'accumulatore sale a 79 m^3, ma occorre osservare che i collettori solari possono riscaldare l'accumulo a 12 °C anche in inverno, riducendo di conseguenza il volume dell'accumulo stagionale.

Potremmo infine pensare di portare il grado di congelamento all'80%, attraverso un preciso sistema di controllo.

In questo caso l'accumulo si ridurrebbe ulteriormente, partendo da acqua a 12 °C, da 79 a 54 m^3, mentre partendo da 80 °C scenderebbe da 52 a 40 m^3.

In questa condizione più favorevole occorre inserire, sullo scambiatore, un sistema di regolazione in modo da prelevare l'acqua dall'accumulo a temperature non troppo elevate per non mandare in crisi la pompa di calore.

Accumulo con pompa di calore acqua-acqua e collettori heat-pipe

Abbiamo visto che, sia sfruttando il calore di fusione del ghiaccio, sia sfruttando il calore di passaggio di fase di un *PCM*, raggiungiamo ottimi risultati in termini di riduzione del volume dell'accumulo stagionale, tuttavia non ancora tali da consentire un utilizzo diffuso di tale tecnologia, per ragioni di costi e specialmente per esigenze di spazio.

Occorre tuttavia osservare che finora non abbiamo considerato nessun tipo di apporto da parte dei collettori solari nel periodo invernale. Questa ipotesi, estremamente cautelativa, può essere superata operando secondo tre criteri applicativi:

1) l'accumulo viene mantenuto a bassa temperatura (es. 12 °C) utilizzandolo non direttamente sull'impianto radiante a pavimento, ma come sorgente termica a bassa temperatura per una pompa di calore acqua-acqua [fig. 4];

2) vengono installati collettori solari in grado di garantire una adeguata resa anche in condizioni invernali [2], quali quelli a tecnologia a tubi sottovuoto (heat-pipe) [Box 3];

3) viene massimizzata la produzione del campo fotovoltaico invernale installando una parte di pannelli solari, per le esigenze elettriche di alimentazione della pompa di calore, con l'inclinazione ottimale di 60°.

L'equazione alla base di tale tecnologia sarà ancora la (11 bis), che regola l'accumulo di calore sensibile e latente, nella quale viene introdotto il termine Q_s:

$$V_{acc} = \frac{Q_{acc} - Q_s}{\rho\left(c_p \cdot \Delta t_{ut} + f \cdot \lambda\right)} \cdot \frac{COP - 1}{COP} \qquad (12)$$

Sostituiamo i valori del nostro caso esempio:

Q_{acc} = energia termica da immagazzinare = 25,92 [GJ];

Q_s = energia termica recuperata dai collettori solari nel periodo invernale = 14,72 [GJ];

c_p = calore specifico acqua = 4,186 [kJ/(kg K)];

ρ = densità acqua [1000 kg/m^3];

Δt_{ut} = differenza di temperatura utile = 40 [°C];

f = grado di congelamento = 0,8 (l'80% dell'acqua viene trasformata in ghiaccio);

λ = entalpia di congelamento o di fusione = [335 kJ/kg].

Con i parametri dell'esempio considerato il volume dell'accumulatore scende da 40 m^3 a 18 m^3, dimensione in molti casi già accettabile, che può essere ulteriormente ridotta mediante l'installazione di un campo solare termico di maggiori dimensioni.

RESA INVERNALE COLLETTORI A TUBI SOTTOVUOTO

I collettori solari a tubi sottovuoto (heat-pipe) presentano una produzione estiva leggermente inferiore a quelli piani, ma l'efficienza invernale risulta decisamente più elevata (42%). Si veda Figura 4.

Possiamo determinare i valori di irraggiamento attraverso la procedura PV-GIS con inclinazione di 20° pari a quella del tetto.

La tabella 2 indica i valori di irraggiamento medio mensile al m² per una inclinazione di 20°.

Risulta per l'intero periodo di riscaldamento un valore complessivo di 607,9 kWh/m² pari a 2,19 GJ/m².

Considerando un'efficienza del 42% del collettore, risulta un valore di energia termica per il periodo invernale captata dal sistema solare a tubi sottovuoto di 2,19 · 0,42 = 0,92 GJ/m²

Immaginando di poter installare n. 5 pannelli solari sottovuoto della dimensione di 200 × 160 cm otteniamo una superficie di 16 m² corrispondente a un valore energetico Q_s = 14,72 GJ nel periodo di riscaldamento considerato.

TABELLA 2 Media mensile di irraggiamento al m² [kWh/m²] – Fonte PV-GIS [3]

Mese	Hi(m)
15-31 Ottobre	53,2
Novembre	75,1
Dicembre	75,9
Gennaio	84,2
Febbraio	96,4
Marzo	143,2
1-15 Aprile	79,9
	607,9

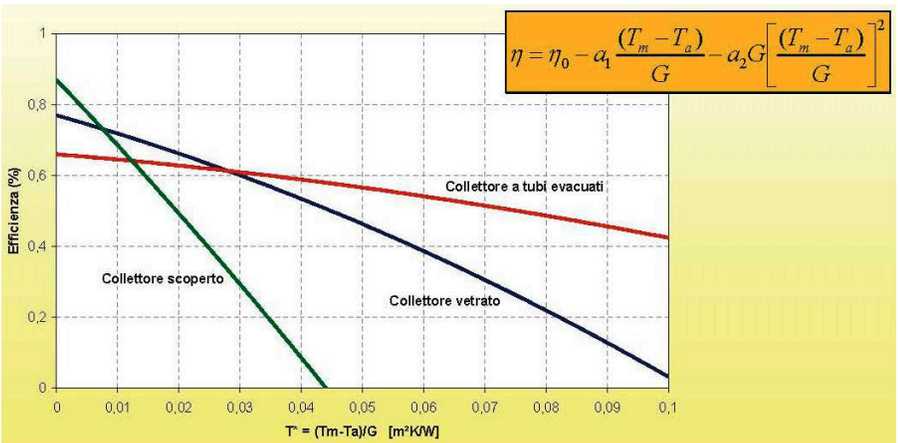

FIGURA 4 Curve di efficienza collettori solari [4]
Dove:
T_m = temperatura media nel collettore [°C]
T_a = temperatura aria ambiente [°C]
G = intensità radiazione solare [W/m²]
η = rendimento
η_0 = efficienza ottica caratteristica del collettore
a_1 = coefficiente angolare caratteristico dell'assorbitore [W/Km²]
a_2 = off-set caratteristico dell'assorbitore [W/K²m²]

BOX 3

Conclusione

Le norme da osservare nella costruzione di nuovi edifici e quelle da adottare per l'ottenimento di benefici fiscali nel retrofit di edifici esistenti, favoriscono la transizione verso un patrimonio edilizio dalle elevate prestazioni energetiche.

La compresenza di bassi carichi termici e di fonti rinnovabili aventi buona efficienza anche in condizioni invernali, quali i collettori solari a tubi sottovuoto, rende possibile la realizzazione di accumuli bifasici in acqua di durata stagionale aventi dimensioni contenute (es. serbatoi interrati in resina).

Il fluido stoccato, in fase liquida e prevalentemente solida (ghiaccio o materiale a cambiamento di fase), può essere utilizzato come sorgente a bassa temperatura per un sistema di generazione termica in pompa di calore acqua-acqua, alimentato tramite produzione elettrica da pannelli fotovoltaici, dotata di accumulo in batterie di tipo elettrochimico. ■

* *Marco Surra*, XX, Socio AICARR

NOTE

[A] Un'auto elettrica di prestazioni elevate (autonomia superiore a 500 km) ha una batteria che solitamente non supera gli 80 kWh. Infatti i consumi medi in ciclo urbano sono di 16 kWh per 100 km. Con una normale presa domestica monofase da 3 kW (assorbimento 13 A) si ha una efficienza di ricarica di circa 18 km/h. Nella ricarica notturna (si considerano 8 ore) può quindi essere agevolmente ricaricata una percorrenza di circa 140 km, più che sufficienti per un normale utilizzo in città. Quindi la ricarica notturna consente già una elevata percorrenza, senza la necessità di installare una *wallbox* o colonnina di ricarica. Per dimensionare in modo adeguato il campo fotovoltaico e il sistema di accumulo, limitandosi a considerare una sola auto elettrica in ricarica notturna è sufficiente quindi una batteria da 24 kWh.

[B] Questa caratteristica rende possibile la vita sulla terra in quanto se l'acqua fosse più densa allo stato solido i ghiacci non galleggerebbero e gli oceani sarebbero una massa congelata.

BIBLIOGRAFIA

[1] Kirn H., Hadenfeldt A., 1981. Le pompe di calore. Tecniche Nuove, Milano. 196-207
[2] UNI TS 11300-4, 2016. Appendice C. Prospetto C.2
[3] European Commission Joint Research Centre. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)
[4] Sabatelli V., Marzo 2011. Atti giornata seminariale. Solare termico. ENEA – Centro Ricerche TRISAIA. 26