



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ENERGETICA*

TESI DI LAUREA

In Impianti Termotecnici E Simulazione Energetica Dinamica M

**Caratterizzazione sperimentale di serbatoi di accumulo
termico latente con PCM inorganici macro-incapsulati e
confronto con sistemi di accumulo sensibile**

Relatore

Prof.ssa Ing. Claudia Naldi

Candidato

Emanuele Volpe

Correlatore

Ing. Gabriella Adele D'Errico

Dott. Ing. Matteo Dongellini

SESSIONE LUGLIO 2026

ANNO ACCADEMICO 2025/2026

Sommario

INTRODUZIONE	4
1.MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE	6
1.1 Generalità sui PCM	6
1.2 Tipologie di PCM	8
1.2.1 PCM organici.....	9
1.2.2 PCM inorganici	13
1.2.3 PCM eutettici.....	16
1.3 Applicazioni dei PCM.....	18
1.3.1 Gestione termica e accumulo termico.....	18
1.3.2 Utilizzo dei PCM nel campo dell'elettronica.....	20
1.3.3 Utilizzo dei PCM nel campo dell'edilizia.....	22
1.3.4 Utilizzo dei PCM nei sistemi a energia solare	24
1.3.5 Utilizzo dei PCM negli scambiatori di calore.....	28
1.3.6 Utilizzo dei PCM nel settore tessile.....	31
1.3.7 Utilizzo dei PCM nel settore spaziale.....	32
1.3.8 Utilizzo dei PCM nel settore alimentare e farmaceutico	34
1.4 Criticità dei PCM.....	35
1.4.1 Panoramica dell'implementazione dei PCM.....	35
1.4.2 Problema della conducibilità termica	36
1.4.3 Problema del contenimento dei PCM	39
2.SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO	43
2.1 Generalità sui sistemi di accumulo termico.....	43
2.2 Accumuli termici sensibili	47
2.2.1 Accumulo termico ad acqua	48
2.3 Accumuli termici latenti	50
2.4 Accumuli termochimici.....	52
2.5 Rischi sanitari: legionella	53
3.SET UP DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE	56
3.1 Composizione generale dell'impianto con accumulo	56
3.2 Impianto per lo studio di test di accumulo	60
3.2.1 Caldaia	60
3.2.2 Pompa di circolazione	61
3.2.3 Accumulo caldo	62
3.2.4 Accumulo freddo	64
3.2.5 Aerotermo	65
3.2.6 Chiller.....	66
3.2.7 Misuratore di portata.....	66
3.2.8 Valvole a sfera.....	67
3.2.9 Valvole a tre vie ON/OFF	68
3.2.10 Valvole a tre vie modulanti.....	69
3.2.11 Valvole di bilanciamento.....	70
3.2.12 Valvole di sicurezza	71
3.2.13 Valvola di sfogo.....	72
3.2.14 Valvola di ritegno	72
3.2.15 Vaso di espansione.....	73
3.2.16 Gruppo di riempimento	74

3.2.17 Filtro a “Y”	75
3.2.18 Defangatore.....	75
3.2.19 Tubazioni e raccordi	76
3.3 Configurazioni di utilizzo nelle prove sperimentali	77
3.3.1 Configurazione di carica.....	77
3.3.2 Configurazione di scarica	78
4. METODOLOGIA DELLE PROVE SPERIMENTALI	80
4.1 Caratteristiche del PCM macro-incapsulato	80
4.1.1 Disposizione dei PCM nell’accumulo.....	82
4.2 Strumenti per la misura e acquisizione delle temperature.....	84
4.2.1 Sensori RTD a 4 fili	84
4.2.2 Sistema di acquisizione Agilent	85
4.2.3 Posizionamento dei sensori	88
4.3 Svolgimento delle prove e applicativo LABVIEW	91
4.3.1 Applicativo LABVIEW e moduli National Instruments	91
4.3.2 Fasi di svolgimento delle prove	95
5. RISULTATI DELLE PROVE	101
5.1 Svolgimento delle prove.....	101
5.2 Primo set di prove $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	102
5.2.1 Prove di scarica a 65 kg/h (0,44 vol/h)	105
5.2.2 Prove di scarica a 130 kg/h (0,89 vol/h)	109
5.2.3 Prove di scarica a 260 kg/h (1,78 vol/h)	112
5.3 Secondo set di prove $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$	115
5.3.1 Prove di scarica a 65 kg/h (0,44 vol/h)	115
5.3.2 Prove di scarica a 130 kg/h (0,89 vol/h)	119
5.3.3 Prove di scarica a 260 kg/h (1,78 vol/h)	122
5.3 Riepilogo delle prove.....	124
6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	131
6.1 Analisi critica del lavoro sperimentale.....	131
6.2 Prospettive di miglioramento del sistema sperimentale	133
6.3 Prospettive future dei PCM e applicazioni reali	134
6.4 Conclusioni	135
BIBLIOGRAFIA	138

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, la crescente domanda di energia a livello globale, unita alla necessità di contenere gli impatti ambientali associati ai sistemi energetici tradizionali, ha indirizzato la ricerca verso lo sviluppo e l'impiego di soluzioni più sostenibili. Questo scenario ha favorito una progressiva transizione da un modello energetico basato prevalentemente sui combustibili fossili a uno orientato verso fonti a basse o nulle emissioni di carbonio. In tale contesto, le energie rinnovabili rappresentano una componente fondamentale del nuovo mix energetico; tuttavia, la loro natura intrinsecamente variabile e non programmabile, come nel caso dell'energia solare ed eolica, introduce criticità legate alla continuità e alla gestione della produzione.

Per superare tali limitazioni, risulta essenziale l'adozione di sistemi di accumulo dell'energia, in grado di disaccoppiare da un punto di vista temporale la produzione dal consumo. Tra le diverse tecnologie disponibili, i sistemi di accumulo termico (*Thermal Energy Storage, TES*) assumono un ruolo di particolare rilievo, soprattutto in applicazioni legate al riscaldamento, al raffrescamento e ai processi industriali. Questi sistemi consentono di immagazzinare energia termica nei periodi di surplus e di rilasciarla quando richiesto, migliorando l'efficienza complessiva degli impianti e contribuendo alla stabilità della rete energetica.

I sistemi TES possono essere classificati principalmente in accumuli sensibili, latenti e termochimici. Tra questi, gli accumuli termici latenti stanno attirando un crescente interesse grazie all'elevata densità energetica che li caratterizza. In particolare, essi sfruttano materiali a cambiamento di fase (*Phase Change Materials, PCM*), i quali sono in grado di immagazzinare elevate quantità di energia termica per unità di massa in volumi relativamente ridotti.

I PCM, studiati sin dagli anni Settanta, hanno conosciuto nel tempo un significativo sviluppo e trovano oggi applicazione in diversi ambiti dell'ingegneria, tra cui l'elettronica, l'edilizia e la termotecnica. Ciò che caratterizza questi materiali è l'elevato valore di calore latente associato ai processi di fusione e solidificazione, che consente di accumulare e rilasciare energia termica a temperatura pressoché costante. Per questo motivo risultano particolarmente adatti all'integrazione nei sistemi di accumulo termico, permettendo di ridurre i volumi di stoccaggio a parità di energia immagazzinata e di migliorare le prestazioni complessive del sistema.

Nonostante i numerosi vantaggi, l'impiego dei PCM presenta ancora alcune criticità, tra cui la bassa conducibilità termica, la possibile degradazione nel tempo e le problematiche legate al contenimento del materiale. Per questo motivo, negli ultimi anni sono state sviluppate diverse soluzioni tecnologiche che consentono di migliorare lo scambio termico e facilitare l'integrazione del PCM all'interno dei sistemi di accumulo.

L'attività di ricerca presentata in questo elaborato di tesi si inserisce in tale contesto e ha come obiettivo l'analisi sperimentale delle prestazioni termiche di un sistema di accumulo termico latente basato su un materiale a cambiamento di fase inorganico, denominato ATS 31, prodotto dall'azienda tedesca Axiotherm GmbH. Tale materiale è inserito all'interno di un sistema innovativo di macro-incapsulamento in polipropilene, noto come HeatSel, sviluppato e commercializzato dall'azienda kraftBoxx GmbH.

Le prove sperimentali sono state condotte presso il laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna, utilizzando un banco prova appositamente progettato per lo studio di sistemi di accumulo termico. In particolare l'analisi si è concentrata sul comportamento dinamico del sistema, sull'efficienza del trasferimento di calore e sulle eventuali criticità legate all'integrazione del PCM nel serbatoio di accumulo.

Più nel dettaglio, le prove sperimentali sono state condotte con l'obiettivo di confrontare le prestazioni di un sistema di accumulo termico sensibile, ottenuto riempiendo il serbatoio esclusivamente con acqua, con quelle di un sistema di accumulo termico latente realizzato mediante l'inserimento di capsule contenenti il PCM inorganico oggetto di studio. Tale confronto consente di valutare in modo diretto il beneficio del materiale a cambiamento di fase sulle prestazioni termiche del sistema di accumulo in termini di capacità di stoccaggio e di potenza termica media scambiata. I risultati sperimentali ottenuti confermano il contributo positivo legato all'utilizzo dei PCM in termini di prestazioni energetiche, confermando quanto riportato nella letteratura scientifica. Tuttavia, sono necessari ulteriori approfondimenti per ottimizzare l'impiego di questi materiali, individuare eventuali criticità e sviluppare soluzioni tecnologiche sempre più efficienti, in grado di favorirne una diffusione su larga scala.

1.MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

Il presente capitolo è dedicato all'analisi approfondita dei materiali a cambiamento di fase, con l'obiettivo di descriverne i principi di funzionamento, le principali proprietà e le caratteristiche che ne determinano il comportamento termico. Verrà inoltre proposta una classificazione delle diverse tipologie di PCM e saranno esaminate le loro applicazioni nei principali ambiti ingegneristici. Infine, saranno discusse le principali criticità, sia di natura fisica sia legate all'impiego applicativo, che possono limitarne l'efficacia nei sistemi energetici.

1.1 Generalità sui PCM

I materiali a cambiamento di fase (*Phase Change Materials*, PCM) costituiscono una tecnologia avanzata per l'accumulo di energia termica, grazie alla loro capacità di assorbire e rilasciare calore durante una transizione di fase, generalmente tra stato solido e liquido. Durante il processo di fusione, il materiale assorbe energia termica mantenendo la propria temperatura quasi costante fino al completamento del cambio fase. In fase di solidificazione, invece, il PCM rilascia l'energia precedentemente accumulata, tornando allo stato solido (figura 1). Questo comportamento consente di immagazzinare grandi quantità di energia in intervalli di temperatura relativamente ristretti.

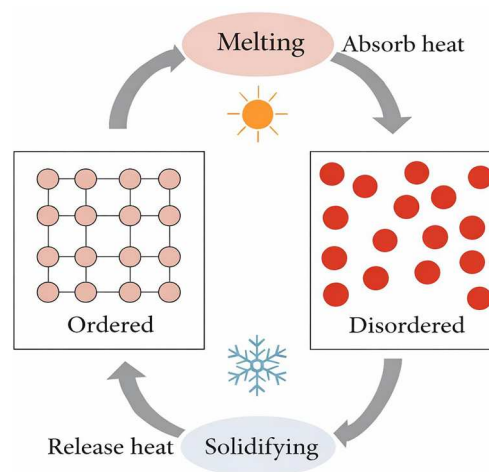


Figura 1. Schema del processo di solidificazione e fusione di un materiale [1]

L'energia coinvolta durante il cambiamento di fase è definita calore latente di fusione, ovvero la quantità di energia assorbita o ceduta dal materiale senza variazioni di temperatura. Questo aspetto rappresenta il principale vantaggio dei PCM rispetto ai sistemi di accumulo termico basati sul calore sensibile, nei quali l'energia è immagazzinata esclusivamente tramite

variazioni di temperatura. Per comprendere meglio la differenza tra calore latente e calore sensibile, si considera un processo di riscaldamento continuo. Inizialmente, un solido aumenta la propria temperatura (calore sensibile) fino a raggiungere il punto di fusione. Successivamente, durante il cambiamento di fase, l'energia fornita viene utilizzata per la trasformazione solido-liquido, mantenendo la temperatura costante. Una volta completata la fusione, ulteriori apporti energetici determinano un nuovo aumento della temperatura del liquido.

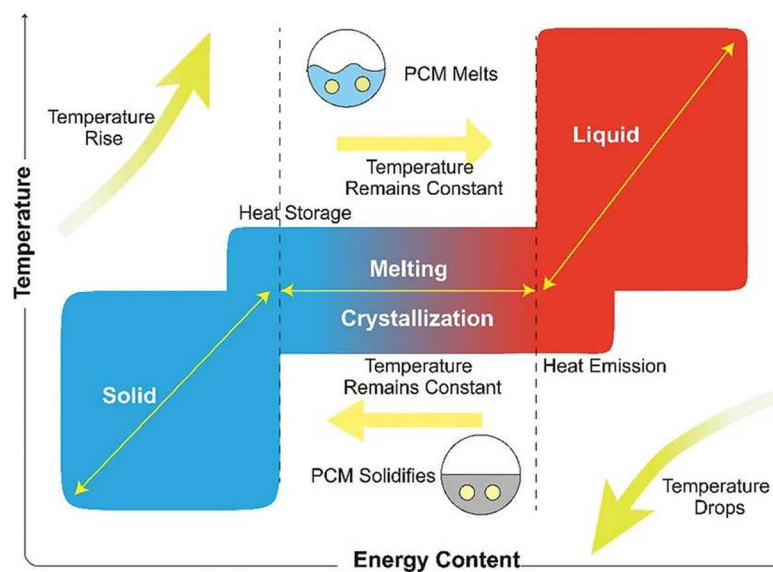


Figura 2. Rielaborazione dell'andamento temperatura materiale durante processo di riscaldamento continuo per mettere in evidenza il calore latente e quello sensibile [1]

Sebbene il calore latente di vaporizzazione sia generalmente maggiore rispetto a quello di fusione, nei sistemi di accumulo termico si preferisce utilizzare il passaggio solido-liquido. Ciò è dovuto alle elevate variazioni di volume associate al passaggio liquido-vapore, che comporterebbero maggiori complessità progettuali e costruttive. Il calore latente di fusione è espresso in J/kg o kJ/kg e dipende dalla massa del materiale, mentre la velocità del processo di fusione e solidificazione è influenzata dalle condizioni operative e dalle proprietà termofisiche del PCM.

Oltre al calore latente, le prestazioni dei PCM sono determinate da altre proprietà fondamentali:

- temperatura di fusione, che deve essere compatibile con il campo di funzionamento dell'applicazione;

- calore specifico, che rappresenta la quantità di energia necessaria per variare la temperatura del materiale;
- conducibilità termica, che influisce sulla velocità di trasferimento del calore all'interno del materiale.

La temperatura di fusione deve essere inferiore alla temperatura della sorgente termica per consentire la fusione del materiale, ma superiore alla temperatura ambiente, al fine di evitare dispersioni indesiderate.

Il calore specifico, espresso in $J/(kg \cdot K)$, contribuisce all'accumulo di energia nella fase sensibile, mentre una conducibilità termica elevata migliora la distribuzione del calore nel materiale. Tuttavia, molti PCM presentano una conducibilità termica relativamente bassa, rendendo necessario l'impiego di tecniche di miglioramento, come l'aggiunta di materiali ad alta conducibilità. Infine, nella selezione di un PCM devono essere considerati ulteriori aspetti:

- stabilità chimica e fisica durante cicli ripetuti;
- compatibilità con i materiali di contenimento;
- variazioni di densità tra fase solida e liquida;
- sicurezza e impatto ambientale.

Tali fattori risultano essenziali per garantire affidabilità, durabilità ed efficienza nei sistemi di accumulo termico basati su materiali a cambiamento di fase.

1.2 Tipologie di PCM

I materiali a cambiamento di fase possono essere classificati secondo diversi criteri, tra cui la natura della transizione termica e la composizione chimica. La classificazione più utilizzata in ambito ingegneristico distingue tre principali categorie: PCM organici, PCM inorganici ed PCM eutettici. Tale suddivisione consente di individuare con maggiore chiarezza le proprietà termofisiche, i vantaggi e i limiti operativi dei diversi materiali, facilitandone la selezione in funzione dell'applicazione.

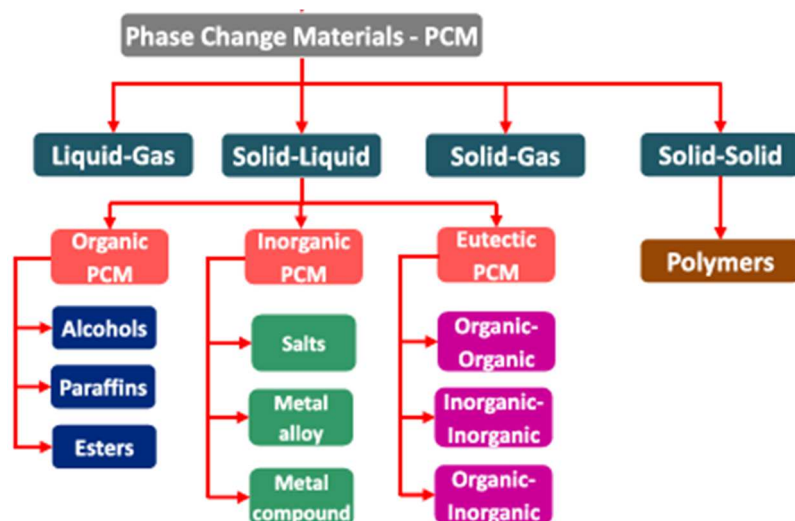


Figura 3. Classificazione dei materiali a cambiamento di fase (PCM) in funzione della loro natura chimica e principali sottocategorie [14]

1.2.1 PCM organici

I PCM organici sono tra i più diffusi nelle applicazioni di accumulo termico, grazie alla loro elevata stabilità chimica e alla buona ripetibilità dei cicli di fusione e solidificazione. Essi comprendono principalmente due sottocategorie: paraffine e composti non paraffinici, tra cui gli acidi grassi.



Figura 4. Paraffina (sinistra) e acido grasso (destra) [1]

Le paraffine sono costituite da miscele di idrocarburi lineari saturi, generalmente descrivibili con la formula chimica C_nH_{2n+2} dove n rappresenta il numero di atomi di carbonio nella catena.

Esempi tipici includono:

- ottadecano $C_{18}H_{38}$, con temperatura di fusione circa 28–30 °C;
- eicosano $C_{20}H_{42}$, con temperatura di fusione circa 36–38 °C;
- docosano $C_{22}H_{46}$, con temperatura di fusione circa 42–44 °C.

Questi materiali presentano un comportamento termico particolarmente regolare, caratterizzato da una fusione quasi isoterma e da valori di calore latente generalmente compresi tra 200 e 300 kJ/kg. Tali caratteristiche li rendono particolarmente adatti per applicazioni in cui è necessario mantenere temperature operative stabili, come nel condizionamento degli edifici o nella gestione termica di dispositivi elettronici.

I composti non paraffinici, in particolare gli acidi grassi, sono generalmente descritti dalla formula $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ e comprendono sostanze quali:

- acido laurico $\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$, con temperatura di fusione circa 43–45 °C;
- acido palmitico $\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$, con temperatura di fusione circa 62–64 °C;
- acido stearico $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$, con temperatura di fusione circa 68–70 °C.

Gli acidi grassi presentano valori di calore latente generalmente compresi tra 100 e 200 kJ/kg, inferiori rispetto alle paraffine, ma offrono una maggiore purezza chimica e una migliore riproducibilità delle proprietà termiche. In tabella 1 sono indicate le proprietà chimico-fisiche dei principali composti non paraffinici (acidi grassi):

Tabella 1. Proprietà chimico-fisiche di alcuni PCM organici (acidi grassi) [3]

Fatty acid	Number of carbon atoms in molecule	Melting temp. (°C)	Heat of fusion (J/g)	Density (g/cm ³)
Caprylic acid	8	16.3	148	–
CA	10	31.3–31.6	163	–
LA	12	41–44	183–212	0.87
MA	14	51.5–53.6	190–204.5	0.86
PA	16	61–63	203.4–212	0.942
SA	18	70.0	222	0.94
Arachidic acid	20	74.0	227	–
Undecylenic acid	22	24.6	141	–

I principali composti organici (paraffinici e non) con le corrispondenti proprietà chimico-fisiche più implementati finora per lo sviluppo di sistemi di accumulo di energia termica sono raggruppati nella seguente tabella:

Tabella 2. Proprietà chimico-fisiche dei principali PCM organici [1]

Name	Type	T _m (°C)	Latent heat (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	C _p (kJ/kg)	k (W/m K)
Octadecane	Paraffin	29	244	814 (sol) 724 (liq)	2150 (sol) 2180 (liq)	0.358 (sol) 0.152 (liq)
Heneicosane	Paraffin	41	294.9	773 (liq)	2386 (liq)	0.145 (liq)
Tricosane	Paraffin	48.4	302.5	777.6 (liq)	2181 (liq)	0.124 (liq)
Tetracosane	Paraffin	51.5	207.7	773.6 (liq)	2924 (liq)	0.137 (liq)
IGI 1230A	Blended paraffin	54.2	278.2	880 (sol) 770 (liq)	2800 (liq)	0.25 (sol) 0.135 (liq)
Oleic acid	Fatty acid	13	75.5	871 (liq)	1744 (liq)	0.103 (liq)
Capric acid	Fatty acid	32	153	1004 (sol) 878 (liq)	1950 (sol) 1720 (liq)	0.153 (liq)
Lauric acid	Fatty acid	44	178	1007 (sol) 965 (liq)	1760 (sol) 2270 (liq)	0.147 (liq)
Palmitic acid	Fatty acid	64	185	989 (sol) 850 (liq)	2200 (sol) 2480 (liq)	0.162 (liq)
Stearic acid	Fatty acid	69	202	965 (sol) 848 (liq)	2830 (sol) 2380 (liq)	0.172 (liq)

Dal punto di vista sperimentale, il comportamento dei PCM organici viene spesso analizzato mediante calorimetria a scansione differenziale (DSC), che consente di determinare il calore latente e le temperature di transizione. Nella Figura 5 è visibile l'andamento tipico di una curva DSC: la zona pastosa inizia intorno ai 319 K e raggiunge il picco a 331 K, corrispondente alla fusione completa. Le paraffine miscelate, spesso utilizzate commercialmente, possono mostrare una zona di transizione estesa anche di 10-20°C.

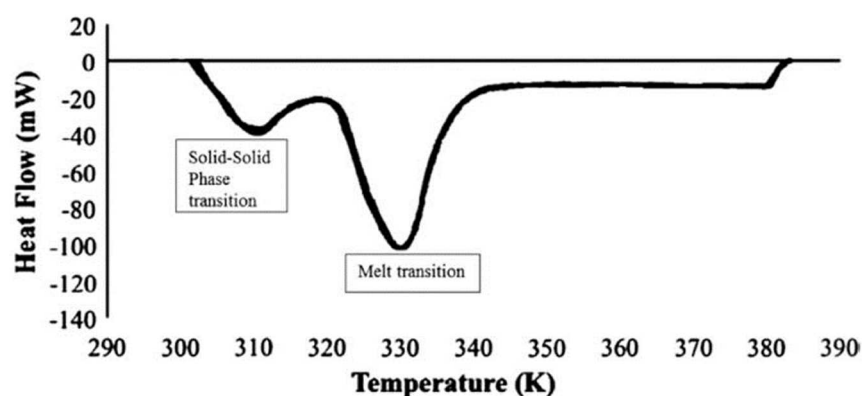


Figura 5: andamento tipico della curva DSC per un PCM organico [1]

I PCM organici presentano una serie di vantaggi che ne favoriscono l'impiego in numerose applicazioni, in particolare nei sistemi di accumulo termico a bassa e media temperatura. Uno dei principali punti di forza è rappresentato dalla elevata stabilità chimica e termica, che consente al materiale di mantenere pressoché inalterate le proprietà anche dopo un elevato numero di cicli di fusione e solidificazione. Questo aspetto è particolarmente rilevante nei sistemi energetici, dove i materiali sono sottoposti a cicli ripetuti e devono garantire affidabilità nel lungo periodo. Un ulteriore vantaggio è l'assenza di fenomeni di corrosione: a differenza dei PCM inorganici, i materiali organici non reagiscono in modo significativo con i materiali di contenimento, permettendo l'utilizzo di contenitori metallici standard senza particolari trattamenti superficiali. Ciò si traduce in una maggiore semplicità progettuale e in una riduzione dei costi di realizzazione. Dal punto di vista termico, i PCM organici presentano un comportamento prevedibile e riproducibile, caratterizzato da una fusione relativamente uniforme e da un limitato fenomeno di sotto-raffreddamento. Questo garantisce una buona affidabilità del processo di accumulo e rilascio dell'energia, rendendo tali materiali particolarmente adatti per applicazioni in cui è richiesta una regolazione stabile della temperatura. Inoltre, le temperature di fusione delle paraffine e degli acidi grassi coprono un intervallo ampio (tipicamente tra 20 e 70 °C), risultando ben compatibili con le applicazioni nel settore edilizio, nel comfort termico e nella gestione energetica degli edifici. Infine, i PCM organici sono generalmente caratterizzati da una buona compatibilità ambientale, soprattutto nel caso degli acidi grassi, che possono essere biodegradabili e derivati da fonti rinnovabili.

Nonostante i numerosi vantaggi, i PCM organici presentano alcune limitazioni che devono essere attentamente considerate nella progettazione dei sistemi di accumulo termico. Il limite più rilevante è rappresentato dalla bassa conducibilità termica, generalmente dell'ordine di 0.2 W/m·K. Questo comporta una scarsa capacità di trasmissione del calore all'interno del materiale, con conseguente formazione di gradienti termici e rallentamento dei processi di fusione e solidificazione. Dal punto di vista ingegneristico, ciò si traduce in tempi di risposta più lunghi e in una minore efficienza negli scambi termici, rendendo spesso necessario l'impiego di tecniche di miglioramento, come l'inserimento di alette metalliche o di materiali ad alta conducibilità. Un ulteriore svantaggio è la potenziale infiammabilità di alcuni composti organici, in particolare delle paraffine. Questo aspetto impone l'adozione di adeguate misure

di sicurezza, soprattutto in applicazioni in cui sono presenti elevate temperature o sorgenti di innesco. Dal punto di vista energetico, i PCM organici presentano generalmente una densità energetica inferiore rispetto ai materiali inorganici. Ciò significa che, a parità di energia accumulata, è necessario utilizzare volumi maggiori di materiale, con possibili implicazioni in termini di ingombro e progettazione del sistema. Infine, alcuni PCM organici possono presentare costi relativamente elevati, soprattutto nel caso di materiali puri o ad alte prestazioni, e una conducibilità termica limitata che richiede soluzioni progettuali aggiuntive, aumentando la complessità del sistema.

1.2.2 PCM inorganici

I PCM inorganici rappresentano una classe di materiali ampiamente studiata per applicazioni di accumulo termico, grazie alle loro elevate prestazioni in termini di densità energetica e conducibilità termica. Essi comprendono principalmente sali idrati e, in misura minore, metalli e leghe a basso punto di fusione. I sali idrati costituiscono la categoria più diffusa tra i PCM inorganici e sono generalmente descritti dalla formula $\text{Sale} \times n\text{H}_2\text{O}$ dove n indica il numero di molecole d'acqua legate alla struttura cristallina. Tra i materiali più utilizzati si possono citare:

- cloruro di calcio esaidrato $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, con temperatura di fusione circa 29–30 °C;
- solfato di sodio decaidrato (sale di Glauber) $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, con temperatura di fusione circa 32–34 °C;
- nitrato di sodio NaNO_3 , con temperatura di fusione circa 306 °C (per applicazioni ad alta temperatura).

Nel seguito sono riportate le immagini del cloruro di calcio e del solfato di sodio con rispettive strutture cristalline:

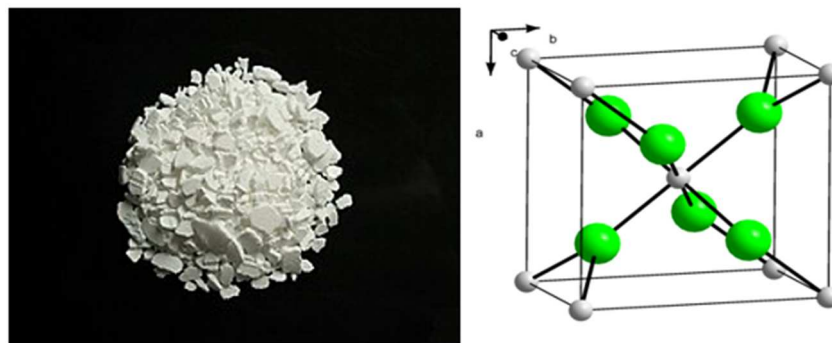


Figura 6. Cloruro di calcio e rispettiva struttura cristallina [4]

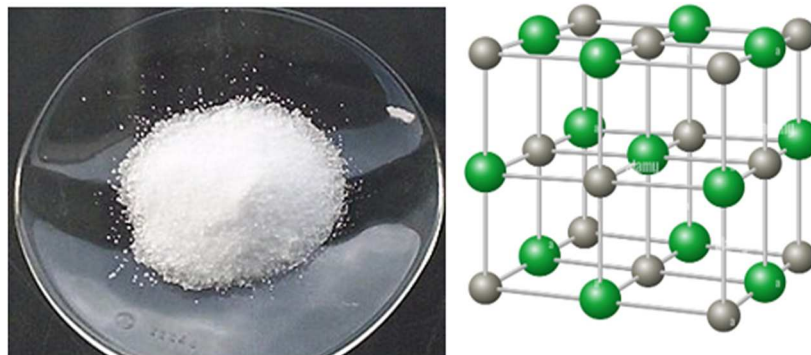


Figura 7. Solfato di sodio e rispettiva struttura cristallina (rielaborata) [5]

Questi materiali sono caratterizzati da valori di calore latente elevati, generalmente compresi tra 200 e 350 kJ/kg, superiori a quelli tipici dei PCM organici. Inoltre, presentano una maggiore conducibilità termica, che consente un trasferimento di calore più rapido all'interno del materiale e quindi tempi di carica e scarica più contenuti. Dal punto di vista applicativo, i PCM inorganici risultano particolarmente adatti per sistemi in cui è richiesta un'elevata densità di accumulo energetico, come negli impianti solari termici o nei sistemi di accumulo industriale. Tuttavia, l'utilizzo dei sali idrati è spesso limitato da fenomeni di instabilità durante i cicli termici. In particolare, si possono verificare processi di separazione di fase, in cui la componente salina e l'acqua di cristallizzazione si separano durante la fusione, compromettendo la reversibilità del processo. Inoltre, è frequente il fenomeno del sottoraffreddamento (*supercooling*), che ritarda la solidificazione del materiale e riduce l'efficienza dell'accumulo termico. Un ulteriore aspetto critico è rappresentato dalla corrosività di molti PCM inorganici, che possono reagire con i materiali di contenimento, richiedendo l'impiego di leghe resistenti o trattamenti superficiali specifici. Nel seguito è riportata la tabella 3 che riassume le proprietà chimico-fisiche dei principali PCM inorganici:

Tabella 3. Proprietà chimico-fisiche dei principali PCM inorganici [6]

Inorganic compounds	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Density (kg/m ³)	Specific heat at the melting point (kJ/kg K)	Thermal conductivity (W/mK)
Mg(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	130	275	NA	NA	NA
Hitec XL: 48% Ca(NO ₃) ₂ –45%KNO ₃ –7%NaNO ₃	140	NA	1992	1.44	0.519
Hitec: KNO ₃ –NaNO ₂ –NaNO ₃	142	84	1990	1.34	0.6
LiNO ₃ –NaNO ₃	195	NA	NA	NA	NA
KNO ₃ /NaNO ₃ eutetic	223	105	NA	NA	NA
NaNO ₃	307/308	74	2260/2257	NA	0.5
65.2%NaOH–20%NaCl–14.8%Na ₂ CO ₃	318	290	2000	1.85	1.0
KNO ₃	333/336	266	2110	NA	0.5
22.9% KCl–60.6% MnCl ₂ –16.5% NaCl	350	215	2250	0.96	0.95
KOH	380	150	2044	NA	0.5
MgCl ₂ /KCl/NaCl	380	400	1800	0.96	NA
Na ₂ CO ₃ –BaCO ₃ /MgO	500–850	NA	2600	NA	5
Li ₂ CO ₃	618	NA	2091	2.07	NA
Sb ₂ O ₃	652	387	5670	0.43	NA
MgCl ₂	714	542	2140	NA	NA
80.5% LiF–19.5% CaF ₂ eutetic	767	790	2100/2670	1.97/1.84	1.7/5.9
LiF	850	811	NA	NA	NA
Na ₂ CO ₃	854	276	2533	NA	2
K ₂ CO ₃	897	236	2290	NA	2

NA, not available.

Accanto ai sali idrati, esiste una categoria meno diffusa ma di crescente interesse costituita dai PCM metallici, che includono metalli puri e leghe a basso punto di fusione. Esempi tipici sono:

- gallio Ga, con temperatura di fusione circa 29.8 °C;
- leghe eutettiche a base di stagno e bismuto (es. Sn-Bi).

Di seguito è riportata la tabella 4 che riassume le proprietà chimico-fisiche dei principali PCM inorganici metallici:

Tabella 4. Proprietà dei principali PCM inorganici metallici [1]

Name	T _m (°C)	Latent heat (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	C _p (kJ/kg)	k (W/m K)
Cesium	28.65	16.4	1796	0.236	17.4
Gallium	29.8	80.1	5907	0.237	29.4
Indium	156.8	28.59	7030	0.23	36.4
Tin	232	60.5	730	0.221	15.08
Bismuth	271.4	53.3	979	0.122	8.1
Zinc	419	112	7140	0.39 (sol) 0.48 (liq)	116
Al59-35Mg-6Zn	443	310	2380	1.63 (sol) 1.46 (liq)	NA
Al54-22Cu-18Mg-6Zn	520	305	3140	1.51 (sol) 1.13 (liq)	NA
Al65-30Cu-5Si	571	422	2730	1.3 (sol) 1.2 (liq)	NA
Al88-Si12	576	560	2700	1.038 (sol) 1.741 (liq)	160
Mg	648	365	1740	1.27 (sol) 1.37 (liq)	156
Al	661	388	2700	0.9 (sol) 0.9 (liq)	237

I PCM inorganici offrono diversi vantaggi rilevanti nelle applicazioni di accumulo termico. In primo luogo, presentano una elevata densità energetica, che consente di accumulare grandi quantità di energia in volumi relativamente ridotti. Questo aspetto è particolarmente importante nei sistemi in cui lo spazio è limitato o in applicazioni industriali ad alta potenza. Un altro vantaggio significativo è la maggiore conducibilità termica rispetto ai PCM organici. Ciò favorisce un trasferimento di calore più efficiente e uniforme, riducendo i tempi necessari per i processi di carica e scarica e migliorando le prestazioni complessive del sistema. Inoltre, i PCM inorganici risultano generalmente non infiammabili, rappresentando quindi una soluzione più sicura rispetto ai materiali organici in applicazioni dove la sicurezza è un fattore critico. Infine, molti sali idrati sono economicamente vantaggiosi e facilmente reperibili, rendendoli adatti a implementazioni su larga scala.

Nonostante le elevate prestazioni, i PCM inorganici presentano alcune criticità che ne limitano l'utilizzo, già citati precedentemente. Tra questi vi è anche una ridotta stabilità ciclica, soprattutto in assenza di adeguati trattamenti o additivi, e una maggiore complessità gestionale rispetto ai materiali organici.

In tabella 5 si riassumono le principali differenze in termini di vantaggi/svantaggi tra i PCM organici e inorganici:

Tabella 5. Vantaggi/svantaggi principali dei PCM organici/inorganici [2]

	Organic (Paraffins)	Inorganic (Salt Hydrates)
Advantages	-non-corrosive; -chemically and thermally stable; -no or little sub-cooling.	-high melting enthalpy; -high density.
Disadvantages	-lower melting enthalpy; -lower density; -low thermal conductivity; -flammable.	-sub-cooling; -corrosive; -phase separation; -phase segregation, lack of thermal stability; -cycling stability.

1.2.3 PCM eutettici

PCM eutettici sono materiali costituiti dalla combinazione di due o più componenti, selezionati in modo tale da ottenere una miscela caratterizzata da un punto di fusione ben definito e costante, inferiore rispetto a quello dei singoli componenti puri. Questo comportamento è tipico dei sistemi eutettici e rappresenta uno dei principali vantaggi di questa classe di

materiali. Dal punto di vista termodinamico, una miscela eutettica fonde e solidifica a una temperatura unica, senza intervalli di transizione, comportandosi quindi in modo analogo a una sostanza pura. Questo aspetto è particolarmente vantaggioso nelle applicazioni di accumulo termico, dove è richiesta una temperatura di esercizio stabile e controllata.

I PCM eutettici possono essere costituiti da materiali:

- organici
- inorganici
- una combinazione di entrambi.

In base alla natura dei componenti, essi vengono classificati in tre principali categorie:

- Eutettici organici-organici: questi PCM sono costituiti da miscele di composti organici, come paraffine o acidi grassi, opportunamente selezionati per ottenere una temperatura di fusione desiderata. Essi presentano una buona stabilità chimica, sono generalmente non tossici e compatibili con numerosi materiali di contenimento. Inoltre, consentono una progettazione flessibile del punto di fusione, modulabile attraverso la composizione della miscela. Tuttavia, come per i PCM organici puri, il principale limite è rappresentato dalla bassa conducibilità termica, che può ridurre l'efficienza degli scambi termici e richiedere l'adozione di strategie di miglioramento (ad esempio l'aggiunta di materiali ad alta conducibilità).
- Eutettici inorganici-inorganici: questa categoria comprende miscele di sali inorganici progettate per ottenere una temperatura di fusione specifica e costante. Sono particolarmente utilizzati in applicazioni ad alta temperatura, come sistemi solari termici a concentrazione o accumuli termici industriali. I PCM eutettici inorganici offrono elevata densità energetica, buona conducibilità termica e transizioni di fase ben definite. Tuttavia, presentano alcune criticità come il rischio di segregazione dei componenti durante i cicli termici, possibile corrosività verso i materiali di contenimento e la necessità di un controllo accurato della composizione.
- Eutettici organico-inorganici: questi materiali combinano un componente organico e uno inorganico, con l'obiettivo di sfruttare i vantaggi di entrambe le categorie, ovvero la stabilità chimica e compatibilità degli organici con l'alta densità energetica

e conducibilità degli inorganici. Questa tipologia rappresenta una soluzione avanzata, ma presenta una maggiore complessità progettuale.

La compatibilità tra i componenti e la stabilità nel tempo devono essere attentamente valutate, rendendo la produzione più costosa e tecnicamente impegnativa.

Di seguito è riportata la tabella con i più comuni PCM eutettici, e le rispettive proprietà chimico-fisiche:

Tabella 6. Proprietà chimico-fisiche dei principali PCM eutettici [1]

No.	Material	Melting Point (°C)	Latent Heat (kJ/kg)
1	Gallium-gallium antimony eutectic	29.8	-
2	Gallium	30.0	80.3
3	Cerro-low eutectic	58.0	90.9
4	Bi-Cd-In eutectic	61.0	25.0
5	Cerro-bend eutectic	70.0	32.6
6	Bi-Pb-In eutectic	70.0	29.0
7	Bi-In eutectic	72.0	25.0
8	Bi-Pb eutectic	125.0	-

1.3 Applicazioni dei PCM

1.3.1 Gestione termica e accumulo termico

I materiali a cambiamento di fase trovano applicazione nei sistemi di gestione termica grazie alla loro capacità di accumulare e rilasciare energia sotto forma di calore latente durante il passaggio di fase solido-liquido. Tale processo avviene a temperatura pressoché costante, permettendo una regolazione termica più efficace rispetto ai sistemi basati esclusivamente sull'accumulo di calore sensibile. A differenza dei sistemi operanti in condizioni stazionarie, i PCM risultano particolarmente adatti a contesti caratterizzati da regimi transitori, quali cicli termici intermittenti, variazioni periodiche del carico o condizioni operative non costanti. In questi scenari, il materiale assorbe il calore in eccesso durante le fasi di incremento della temperatura, fondendo e immagazzinando energia, per poi rilasciarla durante la fase di raffreddamento attraverso il processo di solidificazione.

Un'applicazione significativa riguarda la gestione termica di dispositivi elettronici, nei quali l'accumulo temporaneo di calore è fondamentale per evitare fenomeni di surriscaldamento. Durante il funzionamento ad alta intensità, il PCM assorbe il surplus termico mantenendo la temperatura entro limiti operativi accettabili; se opportunamente dimensionato, il materiale consente di stabilizzare la temperatura per tutta la durata del ciclo di utilizzo, riducendo la

necessità di sistemi di raffreddamento attivi come ventole o dissipatori. Le soluzioni tradizionali di raffreddamento, infatti, si basano su sistemi attivi che richiedono alimentazione energetica e comportano rumore e manutenzione. Al contrario, l'utilizzo dei PCM consente una gestione passiva, caratterizzata da funzionamento silenzioso, maggiore affidabilità e assenza di consumo energetico diretto durante il ciclo operativo. Quando l'obiettivo principale non è la dissipazione del calore ma il suo immagazzinamento, i PCM vengono impiegati nei sistemi di accumulo termico (*Thermal Energy Storage*, TES). In tali sistemi, l'energia termica prodotta in eccesso viene accumulata nel materiale durante la fusione e successivamente recuperata durante la solidificazione, consentendo una gestione più efficiente dell'energia nel tempo. Un esempio tipico è rappresentato dagli impianti solari termici, nei quali la produzione di energia non coincide temporalmente con la domanda. Durante le ore di maggiore irraggiamento, si verifica un surplus energetico che può essere accumulato nei PCM e successivamente utilizzato nelle ore serali o in condizioni di ridotta disponibilità di radiazione solare. Tale concetto è illustrato in figura 8:

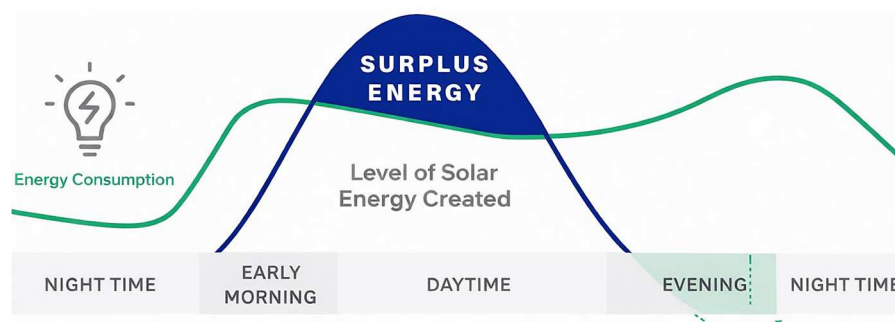


Figura 8. Rielaborazione dell'andamento standard giornaliero della produzione di energia termica da solare termico rispetto alla richiesta di energia termica [1]

Le tecnologie di accumulo termico possono essere classificate in tre principali categorie: accumulo di calore sensibile, accumulo di calore latente e accumulo termochimico. Tra queste, l'accumulo basato su PCM offre una densità energetica significativamente superiore rispetto ai sistemi a calore sensibile, consentendo una riduzione della massa e del volume dei sistemi di stoccaggio. Nella seguente figura viene illustrato un confronto tra i vari meccanismi di stoccaggio in relazione al volume di accumulo necessario per ciascuna tipologia:

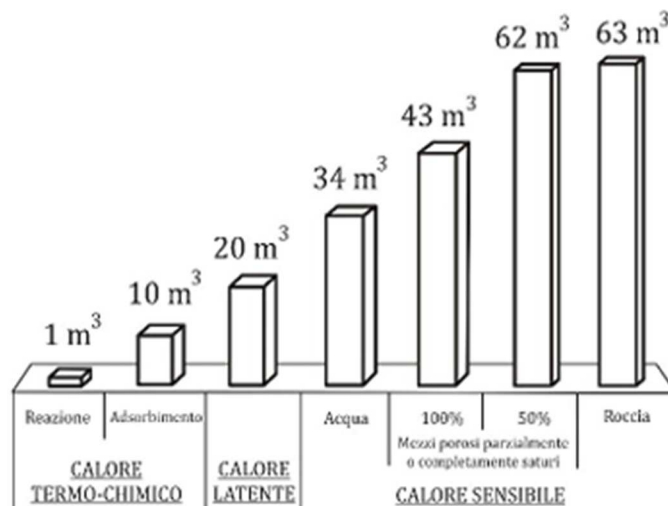


Figura 9. Confronto tra meccanismi di stoccaggio: volume di materiale necessario per accumulare 10 GJ di energia [7]

Rispetto ai materiali termochimici, i PCM risultano generalmente più semplici da implementare e gestire, poiché non implicano reazioni chimiche complesse e presentano variazioni di densità relativamente contenute durante il cambiamento di fase. Per garantire prestazioni efficienti, il PCM utilizzato deve possedere alcune proprietà fondamentali: elevato calore latente, per massimizzare la quantità di energia accumulata; adeguata conducibilità termica, per favorire lo scambio di calore; stabilità chimica e termica nel tempo, per assicurare un funzionamento affidabile durante cicli ripetuti; e compatibilità con i materiali di contenimento, al fine di evitare fenomeni di degradazione o corrosione. Ulteriori aspetti rilevanti includono il limitato sottoraffreddamento, la ridotta segregazione di fase e una buona ripetibilità del comportamento termico. Oltre agli impianti solari, i sistemi TES basati su PCM trovano applicazione in numerosi ambiti, tra cui il riscaldamento e raffrescamento degli edifici, la produzione di acqua calda sanitaria e l'integrazione in materiali da costruzione avanzati, contribuendo al miglioramento dell'efficienza energetica e alla riduzione dei consumi.

1.3.2 Utilizzo dei PCM nel campo dell'elettronica

Nel campo dell'elettronica moderna, il continuo aumento delle prestazioni dei dispositivi è strettamente legato alla cosiddetta legge di Moore, secondo la quale il numero di transistor integrati in un circuito tende a raddoppiare con cadenza regolare, comportando un significativo incremento della potenza di calcolo. Questo progresso tecnologico è accompagnato da un parallelo aumento della densità di potenza dissipata, rendendo la gestione termica uno degli aspetti più critici nella progettazione dei sistemi elettronici. Per

garantire l'affidabilità e la durata dei componenti, è necessario mantenere le temperature operative entro limiti ben definiti, generalmente inferiori a circa 85 °C, sia in condizioni stazionarie sia durante i transitori termici. Nei sistemi elettronici convenzionali, la dissipazione del calore è affidata a soluzioni di raffreddamento attivo, quali dissipatori accoppiati a ventole o, nei sistemi ad alte prestazioni, a circuiti di raffreddamento a liquido. Tuttavia, tali soluzioni comportano un aumento della complessità, dei consumi energetici e della manutenzione. In particolare, nei dispositivi elettronici portatili, caratterizzati da dimensioni ridotte e configurazioni ultrasottili, l'integrazione di sistemi di raffreddamento tradizionali risulta spesso limitata o impraticabile. In questo contesto, i materiali a cambiamento di fase rappresentano una soluzione efficace per la gestione termica passiva. Essi sfruttano il calore latente associato al cambiamento di fase solido-liquido per assorbire energia durante il funzionamento del dispositivo, contribuendo a limitare l'aumento della temperatura. Durante le fasi di maggiore attività, il calore generato dai componenti viene trasferito al PCM, che fonde accumulando energia e agendo come un vero e proprio "buffer termico". Questo comportamento risulta particolarmente vantaggioso nei dispositivi soggetti a carichi variabili nel tempo, come smartphone, laptop e sistemi elettronici intermittenti. In presenza di picchi di dissipazione termica, il PCM è in grado di smorzare l'aumento della temperatura e ritardare il raggiungimento del regime stazionario, riducendo i picchi termici e migliorando la stabilità operativa del sistema. Al termine della fase di carico, il materiale solidifica rilasciando gradualmente il calore accumulato verso l'ambiente, ripristinando le condizioni iniziali per i cicli successivi.

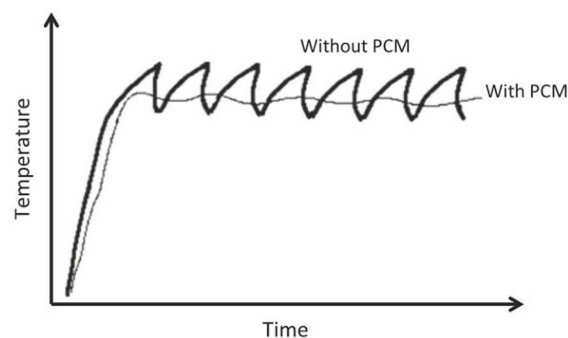


Figura 10. Smorzamento dei picchi di temperatura in un dispositivo elettronico grazie all'utilizzo di PCM [1]

Dal punto di vista applicativo, i PCM possono essere integrati in prossimità dei componenti più critici, come microprocessori, moduli di potenza e batterie, oppure in combinazione con

dissipatori tradizionali, dando origine a sistemi di raffreddamento ibridi. Questa integrazione consente di migliorare la distribuzione della temperatura e di ridurre la formazione di punti caldi (hot spots), che rappresentano una delle principali cause di degrado e malfunzionamento dei componenti elettronici. La scelta del PCM è un aspetto fondamentale nella progettazione del sistema. In ambito elettronico, si utilizzano generalmente materiali con temperatura di fusione compresa tra 30 °C e 60 °C, in modo da operare nel range tipico delle temperature di esercizio.

Tra i materiali più diffusi si trovano le paraffine, grazie alla loro stabilità chimica, sicurezza e affidabilità nel tempo, anche se la loro bassa conducibilità termica può rappresentare un limite.

Per ovviare a tale problema, i PCM vengono spesso combinati con materiali ad alta conducibilità, come grafite o strutture metalliche, al fine di migliorare il trasferimento di calore. Un aspetto critico è rappresentato dalla fase di solidificazione, generalmente più lenta rispetto alla fusione, a causa della predominanza dei fenomeni di conduzione rispetto alla convezione. Questo può limitare le prestazioni del sistema in condizioni di funzionamento continuo. Tuttavia, mediante un'adeguata progettazione geometrica e l'impiego di configurazioni sottili o strutture composite, è possibile ottimizzare il comportamento termico del sistema.

Nel complesso, l'utilizzo dei PCM nei sistemi elettronici consente di ottenere una significativa riduzione dei picchi di temperatura, un miglioramento della stabilità termica e una maggiore affidabilità dei dispositivi, rappresentando una soluzione particolarmente efficace nei contesti in cui l'impiego di sistemi di raffreddamento attivi risulta limitato o inefficiente.

1.3.3 Utilizzo dei PCM nel campo dell'edilizia

Nel settore edilizio, l'impiego dei materiali a cambiamento di fase (PCM) rappresenta una strategia efficace per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici e il comfort termico degli ambienti interni. In un contesto caratterizzato da una crescente attenzione alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni, i PCM consentono di incrementare la capacità di accumulo termico degli edifici senza modificare significativamente le caratteristiche strutturali dell'involucro. A differenza dei materiali tradizionali, che accumulano energia sotto forma di calore sensibile attraverso variazioni di temperatura, i PCM sfruttano il calore latente associato

al cambiamento di fase, permettendo di immagazzinare e rilasciare grandi quantità di energia a temperatura pressoché costante.

Questo comportamento risulta particolarmente vantaggioso negli edifici soggetti a carichi termici variabili, come quelli esposti all'irraggiamento solare o caratterizzati da variazioni dell'occupazione durante la giornata. Durante le ore diurne, il calore proveniente dall'ambiente esterno e dagli apporti interni viene assorbito dal PCM, che fonde accumulando energia e limitando l'aumento della temperatura interna. Nelle ore notturne, in presenza di condizioni ambientali più favorevoli, il materiale solidifica rilasciando il calore accumulato e contribuendo al mantenimento di condizioni di comfort termico. Questo ciclo di accumulo e rilascio consente di ridurre le oscillazioni della temperatura interna e di attenuare i picchi termici.

Dal punto di vista applicativo, i PCM possono essere integrati in diversi componenti dell'involucro edilizio, tra cui pareti, solai, controsoffitti e pavimenti, oppure incorporati in intonaci, pannelli in cartongesso o materiali compositi.

Questa integrazione consente di aumentare l'inerzia termica degli edifici, in particolare nel caso di strutture leggere, migliorandone il comportamento dinamico senza incrementare significativamente massa e spessore.

Un aspetto particolarmente rilevante è il contributo dei PCM alla riduzione dei carichi di raffrescamento estivo. Durante il giorno, il materiale assorbe il calore in eccesso riducendo il fabbisogno di climatizzazione, mentre durante la notte può rilasciare l'energia accumulata mediante ventilazione naturale o sistemi di free cooling.

Questo approccio consente di migliorare l'efficienza energetica complessiva dell'edificio e di ridurre i consumi associati agli impianti HVAC.

Nel seguito un tipico esempio di integrazione di un PCM nella sezione trasversale di un pannello la cui funzione è quella di ridurre le fluttuazioni di temperatura dei fabbricati di nuova costruzione:

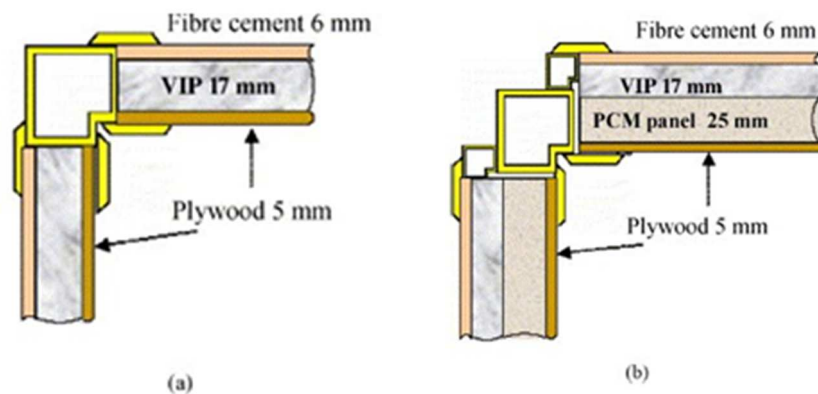


Figura 11. Sezione trasversale di un pannello: (a) senza PCM e (b) con PCM [9]

La scelta del PCM deve essere effettuata in funzione delle condizioni climatiche e delle temperature operative dell'ambiente. In applicazioni edilizie, sono generalmente preferiti materiali con temperatura di fusione compresa tra 20 °C e 26 °C, in modo da operare all'interno dell'intervallo di comfort termico. Altri parametri fondamentali includono il calore latente, la conducibilità termica, la stabilità ciclica e la compatibilità con i materiali da costruzione. Tra i principali vantaggi dell'utilizzo dei PCM in edilizia si annoverano la riduzione delle oscillazioni termiche interne, il miglioramento del comfort abitativo e la diminuzione dei picchi di carico energetico. Tuttavia, alcune criticità possono riguardare la bassa conducibilità termica, che può limitare la velocità di scambio termico, e la necessità di una corretta progettazione per evitare fenomeni di sottoraffreddamento o degrado nel lungo periodo. Nel complesso, l'integrazione dei PCM negli edifici rappresenta una soluzione promettente per lo sviluppo di sistemi passivi ad alta efficienza energetica, in grado di contribuire in modo significativo alla riduzione dei consumi e al miglioramento delle prestazioni termoenergetiche degli edifici.

1.3.4 Utilizzo dei PCM nei sistemi a energia solare

Uno dei principali limiti dei sistemi solari è la loro intrinseca dipendenza dall'irraggiamento solare, che rende la produzione energetica discontinua e non programmabile. Per superare questa criticità, nei sistemi solari termici avanzati viene introdotto l'accumulo di energia termica (TES), che consente di disaccoppiare la fase di produzione da quella di utilizzo dell'energia. Nei grandi impianti solari, questa esigenza è soddisfatta mediante centrali solari a concentrazione (CSP), le quali sfruttano sistemi ottici per focalizzare la radiazione solare su un ricevitore lineare o puntuale. In particolare, la configurazione a collettori parabolici lineari rappresenta una delle tecnologie più diffuse: gli specchi concentrano la radiazione su un tubo

ricevitore attraversato da un fluido termovettore (HTF, Heat Transfer Fluid), che assorbe energia termica ad alta temperatura riducendo le dispersioni grazie a involucri sottovuoto. Nelle figure di seguito vengono illustrati degli schemi di funzionamento di un singolo specchio parabolico e di un intero impianto parabolico lineare:



Figura 12. Pannelli solari a depressione parabolica [10]

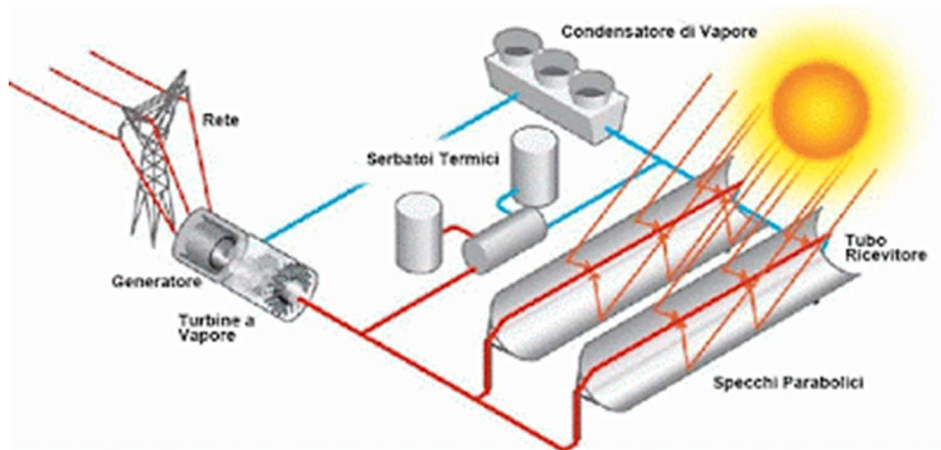


Figura 13. Schema di funzionamento di un impianto parabolico lineare [10]

L'energia termica accumulata nel fluido può essere utilizzata direttamente per la produzione di vapore, destinato all'azionamento di turbine per la generazione elettrica, oppure trasferita a un sistema di accumulo termico. Durante i periodi di elevata insolazione, il calore in eccesso viene immagazzinato nei sistemi TES, consentendo di mantenere la produzione energetica anche in assenza di radiazione solare, ad esempio nelle ore serali o notturne.

Nei sistemi CSP attualmente più diffusi, l'accumulo avviene tramite sali fusi in configurazione a due serbatoi (hot tank e cold tank).

Durante la fase di carica, il fluido termovettore cede calore al sale, che viene trasferito dal serbatoio freddo a quello caldo.

Nella fase di scarica, il processo si inverte: il sale caldo rilascia energia al fluido, che alimenta il ciclo termodinamico di generazione.

In figura 14 è illustrato un esempio di configurazione di un sistema di accumulo TES tramite Sali fusi a due serbatoi:

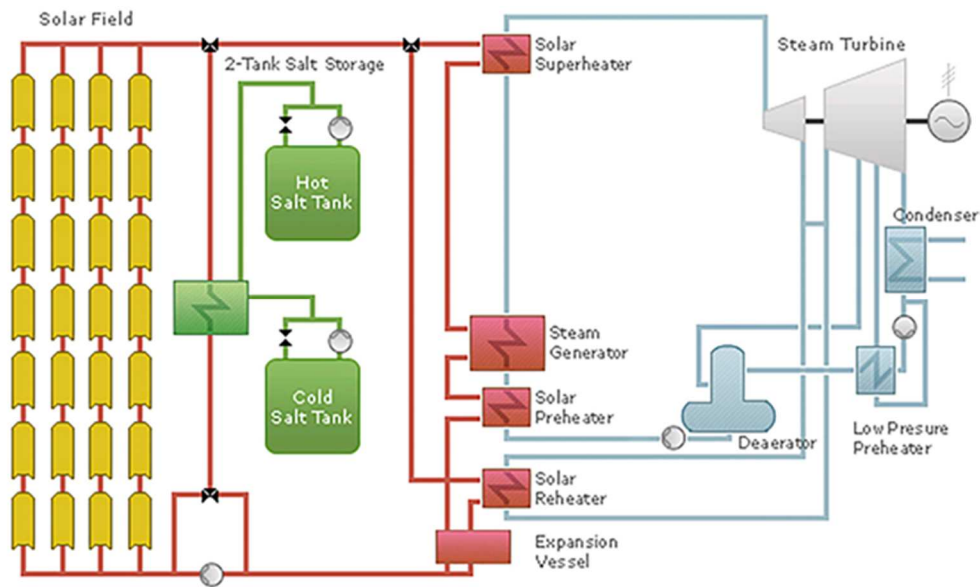


Figura 14. Configurazione di un impianto con sistema di accumulo termico a sali fusi a due serbatoi indiretti [8]

I sali fusi risultano particolarmente adatti grazie agli elevati punti di fusione (tipicamente compresi tra 300 °C e oltre 800 °C), che permettono di operare a temperature elevate e quindi con rendimenti termodinamici più alti. Tuttavia, presentano alcune criticità rilevanti, tra cui l'elevata corrosività nei confronti dei materiali strutturali, la bassa conducibilità termica e costi elevati legati alla gestione e al mantenimento allo stato liquido. In questo contesto, l'impiego dei PCM rappresenta una possibile evoluzione tecnologica. A differenza dei sistemi a calore sensibile, i PCM consentono di accumulare energia sotto forma di calore latente, offrendo una maggiore densità energetica e la possibilità di operare a temperatura quasi costante. L'integrazione dei PCM nei sistemi CSP può quindi portare a una riduzione del volume dei serbatoi, a una semplificazione dell'impianto e a un miglioramento dell'efficienza complessiva. I PCM utilizzati in queste applicazioni sono generalmente materiali inorganici, in grado di operare nell'intervallo di temperatura 300–800 °C, spesso basati su sali o miscele eutettiche.

Tuttavia, anche questi materiali presentano problematiche analoghe ai sali fusi, quali la corrosione, la bassa conducibilità termica e possibili fenomeni di degrado ciclico.

Oltre agli impianti su larga scala, i sistemi di accumulo termico latente trovano applicazione anche in ambito domestico, in particolare nei sistemi solari per la produzione di acqua calda sanitaria. Questi sistemi sono generalmente costituiti da collettori solari a piastra piana, nei quali un fluido termovettore scorre all'interno di tubazioni assorbendo il calore solare. Nel seguito uno schema esemplificativo di tale configurazione:

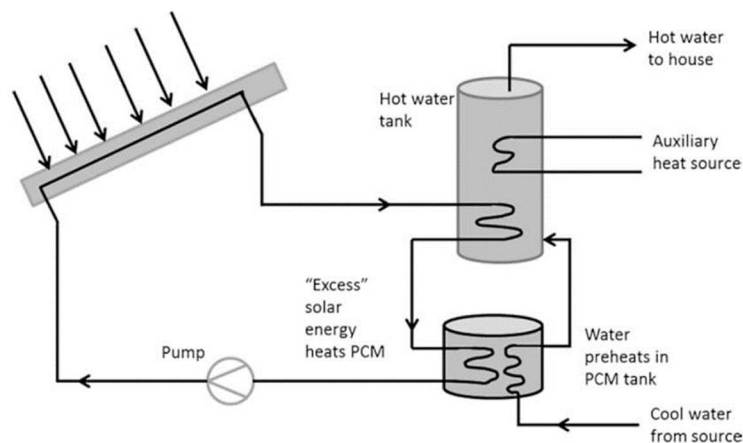


Figura 15. Schema sistema solare su piccola scala per produzione acqua calda con accumulo di energia termica [1]

A differenza degli impianti CSP, l'assenza di sistemi di concentrazione limita le temperature operative, rendendo tali sistemi più adatti ad applicazioni a bassa temperatura. L'energia termica raccolta viene trasferita a un serbatoio di accumulo, che può essere integrato con PCM per migliorare la capacità di immagazzinamento. Durante le ore di maggiore insolazione, il PCM assorbe il calore fondendo, mentre nelle ore successive rilascia l'energia accumulata, garantendo la disponibilità di acqua calda anche in assenza di irraggiamento. L'integrazione dei PCM consente di ridurre la dipendenza da sistemi ausiliari, come resistenze elettriche o caldaie a gas, migliorando l'efficienza energetica complessiva del sistema e riducendo i consumi. In queste applicazioni, i PCM devono avere temperature di fusione comprese tra circa 29 °C e 55 °C, compatibili con le condizioni operative degli impianti domestici. Tra i materiali più utilizzati figurano il cloruro di calcio esaidrato ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e le paraffine, che offrono un buon compromesso tra capacità di accumulo, stabilità termica e costo. Tuttavia, anche in questo caso, è necessario considerare aspetti quali la conducibilità termica e la stabilità nel lungo periodo per garantire prestazioni affidabili.

1.3.5 Utilizzo dei PCM negli scambiatori di calore

I materiali a cambiamento di fase trovano applicazione in una vasta gamma di settori oltre a quelli tradizionalmente associati all'accumulo energetico negli edifici e alla gestione termica dei dispositivi elettronici. La loro capacità di immagazzinare e rilasciare grandi quantità di energia sotto forma di calore latente, mantenendo una temperatura pressoché costante durante il cambiamento di fase, li rende particolarmente adatti a tutte quelle applicazioni in cui è richiesta una regolazione termica passiva, efficiente e affidabile. Un primo ambito di grande rilevanza è rappresentato dai sistemi di accumulo termico avanzati e dagli scambiatori di calore. In queste applicazioni, i PCM vengono impiegati per incrementare la densità energetica dei sistemi e migliorare la gestione dei flussi termici. In figura 16 sono riportate alcune possibili configurazioni.

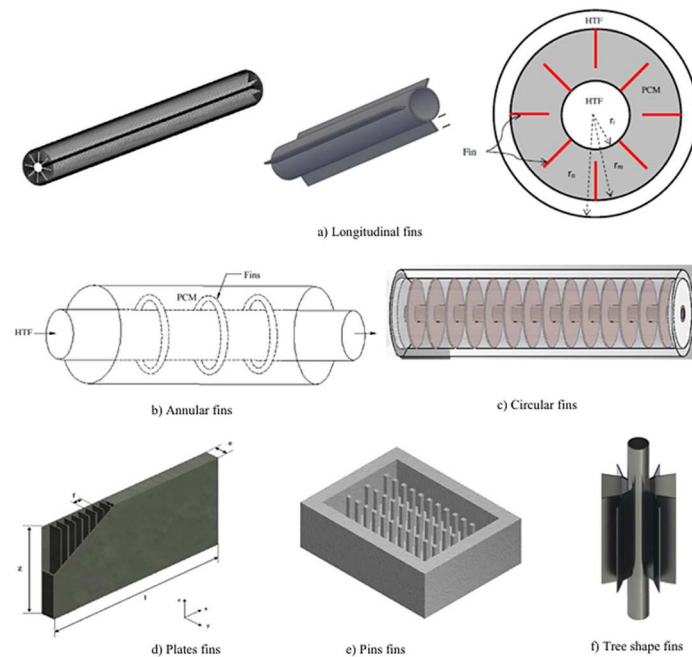


Figura 16. Vari tipi di configurazioni di PCM integrati con alette [11]

Dal punto di vista progettuale, una delle configurazioni più diffuse è quella a letto compatto (packed bed) con PCM incapsulato, in cui il materiale è suddiviso in capsule sferiche o cilindriche, tipicamente con diametri compresi tra 5 e 50 mm, immerse in un flusso di fluido termovettore. Questa soluzione consente di ottenere superfici specifiche di scambio elevate, dell'ordine di $100\text{--}1000\text{ m}^2/\text{m}^3$, favorendo un'intensa interazione termica tra fluido e PCM.

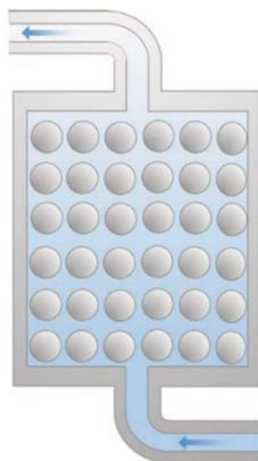


Figura 17. Schema di un sistema di accumulo a letto compatto [1]

Durante la fase di carica, il trasferimento di calore è dominato dalla convezione forzata nel fluido e dalla successiva conduzione all'interno del PCM, mentre nella fase di scarica la solidificazione avviene prevalentemente per conduzione, rendendo questa fase generalmente più lenta e limitante. Il comportamento del sistema è spesso descritto mediante il numero di Stefan (Ste) e il numero di Biot (Bi), che permettono di valutare rispettivamente il rapporto tra calore sensibile e latente e l'importanza delle resistenze termiche interne rispetto a quelle superficiali. Dal punto di vista energetico, i PCM permettono di raggiungere densità di accumulo tipiche dell'ordine di $100\text{--}300 \text{ kWh/m}^3$, significativamente superiori rispetto ai sistemi a calore sensibile basati su acqua o solidi (generalmente inferiori a 80 kWh/m^3 nello stesso intervallo di temperatura). Tuttavia, il principale limite è rappresentato dalla bassa conducibilità termica, tipicamente compresa tra 0.2 e $0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ per i PCM organici e fino a circa $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ per quelli inorganici. Per superare questa criticità, vengono adottate diverse strategie di intensificazione dello scambio termico, tra cui:

- integrazione di strutture ad alta conducibilità, come schiume metalliche (fino a $10\text{--}50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ effettivi);
- utilizzo di additivi conduttivi (grafite espansa, nanoparticelle metalliche o carboniose);
- impiego di alette (fins) per aumentare la superficie di contatto;
- riduzione della dimensione caratteristica delle capsule per limitare le resistenze interne.

Un'altra configurazione di particolare interesse è quella degli scambiatori a fascio tubiero con PCM nel mantello, nei quali il fluido scorre all'interno dei tubi mentre il PCM riempie la zona esterna. In tali sistemi, il coefficiente globale di scambio è fortemente influenzato dalla progressiva formazione dello strato solido durante la solidificazione, che introduce una resistenza termica crescente nel tempo. Nelle immagini in seguito delle rappresentazioni grafiche di tali scambiatori:

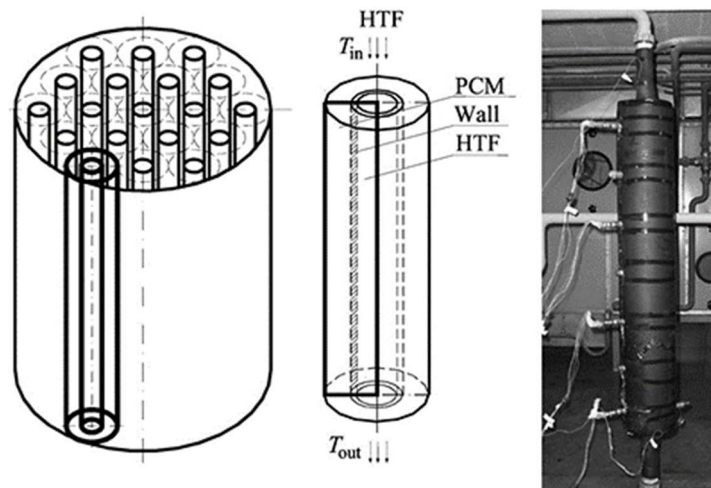


Figura 18. Scambiatore di calore a fascio tubiero integrato con PCM [12]

Per migliorare l'uniformità del trasferimento termico lungo lo scambiatore, vengono spesso adottate configurazioni a PCM multipli con diversi punti di fusione (cascaded PCM). Questa soluzione consente di mantenere un gradiente termico più favorevole lungo il percorso del fluido, aumentando l'efficienza complessiva e riducendo le irreversibilità termodinamiche. Si riporta in figura 19 un esempio di configurazione cascaded PCM:

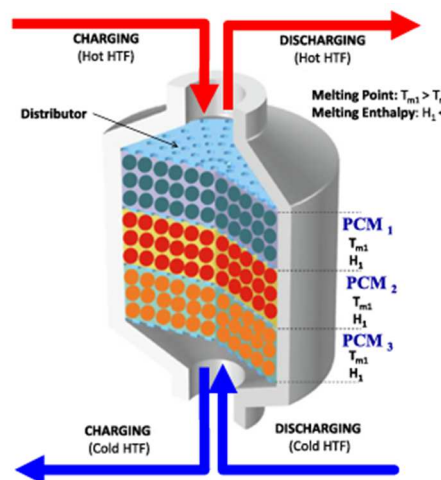


Figura 19. Configurazione Cascaded-MultiPCM [14]

Dal punto di vista dinamico, i tempi di carica e scarica dipendono fortemente dalla geometria e dalle proprietà del sistema: in assenza di tecniche di miglioramento, la fase di solidificazione può risultare anche 2–5 volte più lenta rispetto alla fusione. L'introduzione di alette o materiali ad alta conducibilità può ridurre i tempi di scarica fino al 40–60%, rendendo il sistema più reattivo e adatto ad applicazioni reali. In generale, la progettazione di scambiatori con PCM richiede un compromesso tra elevata densità energetica, velocità di risposta termica e complessità costruttiva rendendo fondamentale un'accurata ottimizzazione termo-fluidodinamica del sistema.

1.3.6 Utilizzo dei PCM nel settore tessile

Un ambito applicativo in forte espansione per i materiali a cambiamento di fase è rappresentato dal settore tessile, in cui tali materiali vengono utilizzati per sviluppare sistemi di regolazione termica passiva integrati nei capi di abbigliamento. In queste applicazioni, i PCM vengono generalmente microincapsulati e successivamente incorporati all'interno delle fibre tessili oppure applicati come rivestimento superficiale mediante tecniche di coating. La microincapsulazione costituisce un aspetto chiave della tecnologia, poiché consente di confinare il materiale in involucri polimerici con dimensioni tipiche comprese tra 1 e 100 μm , prevenendo la fuoriuscita del PCM durante la fase liquida e garantendo stabilità meccanica e chimica nel tempo. I materiali più utilizzati per il core sono generalmente paraffine o acidi grassi, mentre i gusci sono costituiti da polimeri come melammina-formaldeide o poliuretano. Di seguito è riportata una rappresentazione visiva dell'incapsulamento di una paraffina nel tessuto:

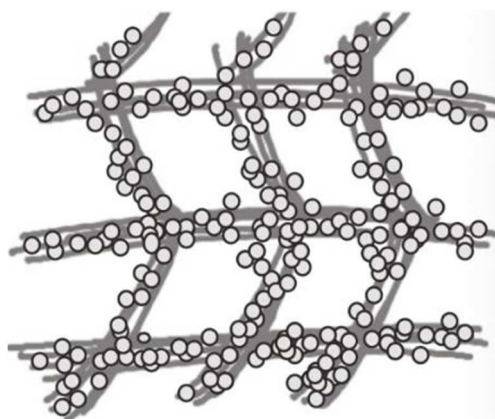


Figura 20. Design delle sfere microincapsulate di PCM inserite nel tessuto del capo da abbigliamento [1]

Dal punto di vista termico, il funzionamento si basa sull'assorbimento del calore corporeo durante l'attività fisica o in condizioni ambientali calde: il PCM fonde accumulando energia e contribuendo a limitare l'aumento della temperatura percepita. Nella fase opposta, quando la temperatura ambiente diminuisce, il materiale solidifica rilasciando il calore accumulato, migliorando il comfort termico dell'utilizzatore. I PCM impiegati in ambito tessile sono selezionati in funzione della temperatura della pelle umana, tipicamente compresa tra 28 °C e 35 °C, e presentano calori latenti dell'ordine di 150–250 kJ/kg. Questo consente di ottenere un effetto di buffering termico percepibile, sebbene limitato nel tempo a causa della ridotta quantità di materiale integrabile nel tessuto (tipicamente 5–30% in massa). Dal punto di vista prestazionale, studi sperimentali mostrano che l'integrazione di PCM nei tessuti può comportare:

- una riduzione delle variazioni di temperatura superficiale dell'ordine di 2–4 °C;
- un ritardo nel raggiungimento del picco termico di alcuni minuti fino a decine di minuti, a seconda della quantità di PCM e delle condizioni operative.

Tuttavia, le prestazioni sono fortemente influenzate da diversi fattori critici. In primo luogo, la bassa conducibilità termica dei PCM limita la velocità di scambio termico tra il corpo umano e il materiale, riducendo l'efficacia del sistema in condizioni dinamiche. Inoltre, la quantità di PCM integrabile è limitata per non compromettere proprietà fondamentali del tessuto quali flessibilità, traspirabilità e comfort meccanico.

Nel complesso, l'utilizzo dei PCM nel settore tessile rappresenta una soluzione innovativa per il miglioramento del comfort termico, anche se le prestazioni restano limitate dalla quantità di materiale utilizzabile e dalla necessità di mantenere le proprietà funzionali del tessuto. Le principali sfide riguardano quindi l'ottimizzazione del compromesso tra capacità di accumulo termico, durabilità e comfort dell'utilizzatore.

1.3.7 Utilizzo dei PCM nel settore spaziale

Nel settore aerospaziale, i materiali a cambiamento di fase (PCM) rivestono un ruolo fondamentale nei sistemi di controllo termico passivo (Passive Thermal Control Systems, PTCS), in cui è necessario garantire condizioni operative stabili in ambienti caratterizzati da assenza di convezione e da elevate escursioni termiche. In orbita, infatti, i componenti sono soggetti a cicli termici estremi, con temperature che possono variare tipicamente tra –150 °C

e oltre +120 °C, a seconda delle condizioni di esposizione alla radiazione solare. In tali condizioni, i PCM vengono impiegati per smorzare le variazioni di temperatura, sfruttando il calore latente associato al cambiamento di fase.

I materiali utilizzati devono soddisfare requisiti particolarmente stringenti, tra cui:

- elevata stabilità termica e chimica su cicli ripetuti (fino a 10^4 – 10^5 cicli);
- compatibilità con il vuoto e bassa pressione di vapore;
- assenza di degrado o separazione di fase;
- sicurezza e affidabilità nel lungo periodo.

Tra i PCM più utilizzati si trovano paraffine, sali idrati e materiali eutettici, selezionati in funzione della temperatura operativa richiesta. I valori di calore latente sono generalmente compresi tra 150 e 250 kJ/kg, analogamente ad altre applicazioni, ma la progettazione è fortemente influenzata dalla necessità di garantire un controllo preciso della temperatura. Uno degli aspetti più critici è rappresentato dal trasferimento di calore all'interno del PCM. In condizioni di microgravità, infatti, la convezione naturale è praticamente assente, e il trasferimento termico avviene prevalentemente per conduzione. Questo comporta una riduzione dell'efficienza di scambio termico e rende necessario l'impiego di soluzioni avanzate, come strutture interne ad alta conducibilità (alette, schiume metalliche), inserimento di materiali compositi con grafite o fibre carboniose o ottimizzazione geometrica dei moduli per ridurre le distanze di diffusione termica.

Dal punto di vista energetico, i PCM consentono di ottenere sistemi compatti con elevata densità di accumulo, riducendo massa e volume, due parametri critici nelle missioni spaziali. Tuttavia, la progettazione deve considerare attentamente il bilancio termico complessivo, in quanto la fase di solidificazione può risultare limitante in assenza di adeguati meccanismi di dissipazione del calore verso l'esterno (radiatori).

Nel complesso, l'utilizzo dei PCM nel settore aerospaziale rappresenta una soluzione altamente efficiente e affidabile per la gestione termica in ambienti estremi, anche se richiede una progettazione accurata per compensare le limitazioni legate all'assenza di convezione e alla necessità di dissipazione radiativa del calore.

1.3.8 Utilizzo dei PCM nel settore alimentare e farmaceutico

L'impiego dei materiali a cambiamento di fase (PCM) nei sistemi di trasporto e conservazione a temperatura controllata rappresenta una soluzione sempre più diffusa per garantire la stabilità termica lungo la cosiddetta catena del freddo. In questi contesti, il mantenimento di condizioni termiche rigorosamente controllate è fondamentale per preservare la qualità e la sicurezza dei prodotti, in particolare nel settore alimentare e farmaceutico.

A differenza dei sistemi di refrigerazione attivi, i PCM consentono di realizzare sistemi di controllo termico passivo, in grado di mantenere la temperatura entro intervalli prestabiliti per tempi prolungati senza necessità di alimentazione continua. Questo risulta particolarmente vantaggioso nelle fasi di trasporto, distribuzione e stoccaggio temporaneo, dove l'affidabilità e la continuità della refrigerazione sono fattori critici.

Nel settore alimentare, i PCM sono generalmente utilizzati per mantenere temperature comprese tra 0 °C e 8 °C, tipiche della refrigerazione, oppure inferiori a -18 °C per la conservazione di prodotti surgelati. Nel settore farmaceutico, invece, i requisiti sono spesso ancora più stringenti: ad esempio, molti vaccini devono essere mantenuti in un intervallo ristretto tra 2 °C e 8 °C, mentre altri prodotti biologici richiedono temperature inferiori o condizioni controllate per evitare degradazioni. Dal punto di vista termico, i PCM utilizzati in queste applicazioni presentano calori latenti tipicamente compresi tra 150 e 250 kJ/kg, che consentono di garantire autonomie termiche dell'ordine di 10–48 ore, a seconda della quantità di materiale impiegato, delle condizioni ambientali e delle caratteristiche di isolamento del contenitore.

Dal punto di vista progettuale, una criticità rilevante è rappresentata dalla non uniformità della distribuzione della temperatura all'interno del contenitore. Per questo motivo, la disposizione dei PCM deve essere ottimizzata (ad esempio lungo le pareti o in configurazioni stratificate) per garantire una distribuzione omogenea del campo termico e prevenire la formazione di zone critiche. Un ulteriore aspetto importante riguarda la sicurezza e la stabilità del materiale, in particolare nel settore farmaceutico, dove è necessario utilizzare PCM non tossici, non infiammabili e compatibili con normative sanitarie. Nel complesso, l'utilizzo dei PCM nella catena del freddo consente di migliorare l'affidabilità dei sistemi di conservazione, ridurre il consumo energetico rispetto ai sistemi attivi e garantire una maggiore flessibilità operativa.

Tuttavia, la progettazione deve essere attentamente calibrata per assicurare il rispetto dei vincoli termici richiesti, in particolare in condizioni ambientali variabili e per tempi di trasporto prolungati.

1.4 Criticità dei PCM

1.4.1 Panoramica dell'implementazione dei PCM

L'impiego dei materiali a cambiamento di fase nei sistemi energetici, sebbene offra vantaggi significativi in termini di accumulo termico, è accompagnato da una serie di problematiche che devono essere attentamente considerate già nelle fasi preliminari di progettazione. Tali criticità derivano sia dalle proprietà intrinseche dei materiali sia dalle modalità con cui essi interagiscono con il sistema in cui vengono integrati.

Un primo aspetto riguarda la gestione del materiale durante la transizione di fase. Quando il PCM passa allo stato liquido, perde la propria forma e deve quindi essere necessariamente contenuto all'interno di un sistema che ne impedisca la dispersione. Questo vincolo introduce una complessità progettuale non trascurabile, poiché il contenitore deve garantire al tempo stesso tenuta meccanica, compatibilità chimica e buone prestazioni di scambio termico. A ciò si aggiunge il problema della variazione volumetrica, fenomeno tipico dei cambiamenti di fase solido-liquido. L'espansione che accompagna la fusione può raggiungere valori anche significativi, dell'ordine del 10–20%, e può generare sollecitazioni interne che, se non adeguatamente gestite, portano a deformazioni, perdita di contatto termico o danneggiamento del sistema di contenimento. Parallelamente, durante la solidificazione, la contrazione può dare origine a cavità interne, con conseguenze negative sul trasferimento di calore.

Un ulteriore limite è rappresentato dalla dinamica di risposta del materiale. I PCM non sempre sono in grado di adattarsi rapidamente a variazioni improvvise del carico termico, soprattutto quando il trasferimento di calore all'interno del materiale è limitato. Questo comportamento può ridurre l'efficacia del sistema in applicazioni caratterizzate da picchi termici rapidi o cicli di funzionamento transitori.

Dal punto di vista delle proprietà fisiche, la bassa conducibilità termica costituisce uno dei principali ostacoli alla diffusione del calore all'interno del PCM, rendendo spesso necessario l'impiego di soluzioni di intensificazione dello scambio termico. Inoltre, in alcuni casi, possono

emergere problematiche legate alla stabilità chimica e ciclica, come fenomeni di degradazione nel tempo, separazione di fase (tipica di alcuni sali idrati) o sottoraffreddamento, che compromettono la ripetibilità del comportamento termico. Infine, non devono essere trascurati aspetti pratici quali la compatibilità con i materiali strutturali, il possibile carattere corrosivo di alcuni PCM e i vincoli economici legati all'integrazione nei sistemi reali. Tutti questi elementi contribuiscono a rendere l'impiego dei PCM una scelta che richiede un'attenta valutazione multidisciplinare.

1.4.2 Problema della conducibilità termica

Tra le diverse criticità associate ai materiali a cambiamento di fase, la limitata conducibilità termica rappresenta uno degli ostacoli più rilevanti per il loro impiego efficace in applicazioni reali. Tale proprietà influisce in modo diretto sulla velocità con cui il materiale è in grado di assorbire, distribuire e rilasciare il calore, condizionando in maniera significativa le prestazioni complessive del sistema. I PCM, in particolare quelli organici come le paraffine, presentano valori di conducibilità termica piuttosto bassi, generalmente dell'ordine di $0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, mentre nei materiali inorganici tali valori risultano solo moderatamente superiori.

Questa caratteristica determina una difficoltà nella propagazione del calore all'interno del materiale, soprattutto in presenza di gradienti termici elevati o di flussi termici intensi. Durante la fase di carica, ovvero nella fusione del materiale, il trasferimento di calore avviene inizialmente per conduzione nello strato solido a diretto contatto con la sorgente termica.

Con l'avanzare del processo e la formazione della fase liquida, possono instaurarsi moti convettivi naturali che contribuiscono ad aumentare il trasporto di calore all'interno del PCM. Tuttavia, tali fenomeni convettivi sono fortemente dipendenti dalla geometria del sistema, dall'orientamento e dalle condizioni operative, e non sempre risultano sufficienti a garantire una distribuzione uniforme della temperatura. Di conseguenza, si osserva spesso una fusione non omogenea del materiale, con una regione liquida concentrata in prossimità della sorgente di calore e zone interne che rimangono solide per tempi più lunghi.

Questo comportamento può portare alla formazione di gradienti termici marcati e, in alcuni casi, a fenomeni di surriscaldamento localizzato (hot spots), che riducono l'efficacia del PCM come sistema di accumulo e possono compromettere la sicurezza del dispositivo.

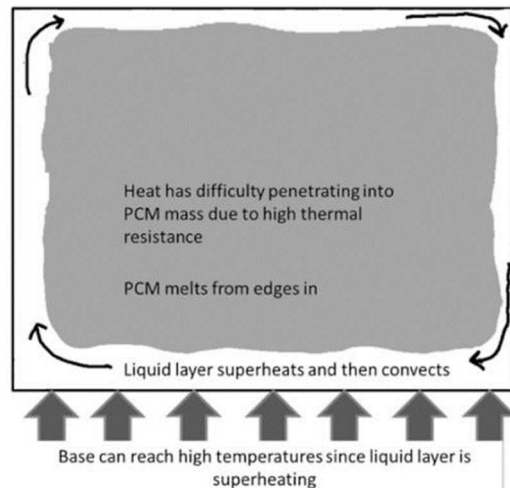


Figura 21. Convezione naturale in caso di PCM con bassa conducibilità termica [1]

Il problema diventa ancora più evidente nella fase di scarica, cioè durante la solidificazione. In questa fase, infatti, il trasferimento di calore è dominato quasi esclusivamente dalla conduzione, poiché la presenza della fase liquida diminuisce progressivamente e i moti convettivi si riducono fino a scomparire. Il materiale solidifica a partire dalle superfici più fredde, generando uno strato solido che cresce nel tempo. Questo strato solido agisce come una vera e propria barriera termica, aumentando la resistenza al flusso di calore tra la parte interna ancora liquida e l'ambiente esterno.

Di conseguenza, il processo di solidificazione rallenta progressivamente, portando a tempi di scarica significativamente più lunghi rispetto a quelli di carica. In molti casi, tale asimmetria può rappresentare un limite operativo rilevante, soprattutto nelle applicazioni in cui è richiesta una risposta termica rapida e ciclica.

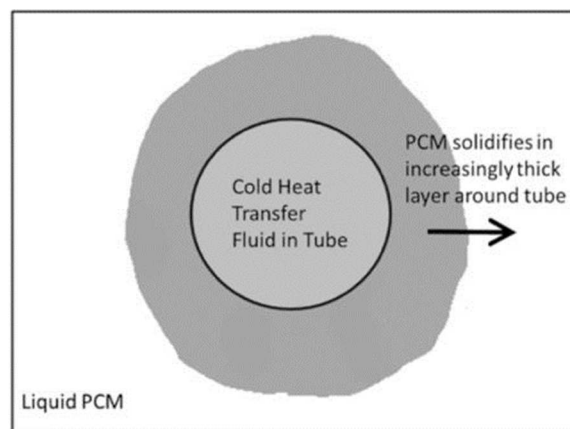


Figura 22. Solidificazione parziale del PCM in prossimità della parete a contatto con la sorgente fredda [1]

Un ulteriore aspetto da considerare è il possibile verificarsi di fenomeni di bypass termico, in cui il flusso di calore tende a seguire percorsi a minore resistenza, aggirando parzialmente il PCM. Questo comporta un utilizzo non ottimale del materiale e una riduzione dell'efficienza complessiva del sistema di accumulo. Alla luce di queste considerazioni, risulta evidente come la conducibilità termica costituisca un parametro chiave nella progettazione dei sistemi basati su PCM. Per questo motivo, una parte significativa della ricerca scientifica è attualmente orientata allo sviluppo di soluzioni in grado di migliorare il trasferimento di calore, attraverso l'impiego di materiali compositi, strutture ad alta conducibilità o configurazioni geometriche ottimizzate. Per ridurre gli effetti negativi della bassa conducibilità termica, la ricerca ha sviluppato diverse strategie di intensificazione del trasferimento di calore all'interno dei PCM. In generale, gli approcci più utilizzati possono essere ricondotti a tre categorie principali:

- Inserimento di strutture metalliche su scala macroscopica: una prima soluzione consiste nell'integrare nel PCM elementi metallici ad elevata conducibilità, come alette, reti tridimensionali o schiume porose in alluminio, rame o nichel. Questi componenti creano percorsi preferenziali per il calore, riducendo la resistenza termica interna del sistema e favorendo una più rapida propagazione dell'energia all'interno del materiale. Le alette, ad esempio, suddividono il PCM in volumi più piccoli e riducono le distanze di diffusione termica, velocizzando soprattutto la fase di fusione. Di contro, l'aggiunta di metallo comporta una diminuzione della frazione di PCM attivo e un aumento della massa complessiva del sistema. Le schiume metalliche rappresentano spesso un compromesso interessante, poiché associano elevata conducibilità a un grande rapporto superficie/volume, migliorando lo scambio termico senza penalizzare eccessivamente la capacità di accumulo.
- Utilizzo di materiali carboniosi su scala macroscopica: materiali a base di carbonio, come fibre di carbonio e schiume di grafite risultano particolarmente interessanti perché combinano peso ridotto, buona stabilità chimica e prestazioni termiche elevate. In modo analogo alle schiume metalliche, anche le strutture grafiche porose aumentano notevolmente la superficie di scambio e migliorano la distribuzione del calore all'interno del PCM. Tuttavia, rispetto alle strutture metalliche, le schiume di grafite possono presentare una morfologia meno regolare, con pori non uniformi,

bordi frastagliati e talvolta celle chiuse che rendono più complesso il riempimento completo con il materiale a cambiamento di fase. Di conseguenza, il processo di impregnazione richiede maggiore attenzione. Negli sviluppi più recenti, l'interesse si è esteso anche verso gli aerogel di grafene, materiali estremamente leggeri e caratterizzati da conducibilità termiche molto elevate, riportate in letteratura fino a valori dell'ordine di $5300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

- Aggiunta di materiali carboniosi su scala micro- e nanometrica: il terzo approccio consiste nella dispersione all'interno del PCM di additivi ad alta conducibilità su scala molto piccola, come nanotubi di carbonio, nanoparticelle carboniose o foglietti di grafene. Anche quantità relativamente modeste di questi materiali possono produrre un miglioramento apprezzabile delle proprietà termiche del composito, grazie sia all'elevata conducibilità intrinseca sia all'ampia superficie specifica. Il trasporto di calore nei materiali carboniosi di questo tipo è favorito dalla propagazione dei fononi lungo strutture cristalline ordinate e da legami covalenti molto forti, tipici del carbonio. A seconda della morfologia e del grado di ordine strutturale, la conducibilità termica può collocarsi in intervalli molto elevati, tipicamente compresi tra 300 e $3000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Rimangono però da considerare alcuni aspetti critici, come l'uniformità della dispersione, la possibile agglomerazione delle particelle e l'effetto che tali additivi possono avere sulla viscosità o sulle altre proprietà termofisiche del materiale composito.

1.4.3 Problema del contenimento dei PCM

Per evitare la fuoriuscita del materiale durante la fase liquida e prevenire fenomeni di contaminazione del sistema, l'impiego dei PCM richiede l'adozione di adeguate soluzioni di confinamento. In particolare, il materiale deve essere racchiuso all'interno di un involucro solido, realizzato con materiali compatibili e stabili nelle condizioni operative, in modo da garantire continuità funzionale e sicurezza nel lungo periodo. Uno degli aspetti più critici nella progettazione dei sistemi a PCM riguarda la variazione volumetrica associata al cambiamento di fase. Durante la fusione, infatti, molti materiali subiscono un aumento di volume che può raggiungere valori dell'ordine del 10–20%. Questo fenomeno comporta, durante la successiva solidificazione, la possibile formazione di spazi vuoti all'interno del contenitore. La presenza di

tali cavità, generalmente riempite d'aria, introduce una significativa resistenza termica, poiché la conducibilità dell'aria è molto inferiore rispetto a quella del PCM. Di conseguenza, il trasferimento di calore risulta penalizzato, con effetti negativi sull'efficienza complessiva del sistema. Inoltre, la posizione e la distribuzione di questi vuoti influenzano il comportamento termico interno, alterando i gradienti di temperatura e la propagazione del fronte di fusione. In condizioni operative in cui la gravità è rilevante, gli spazi vuoti tendono a localizzarsi nella parte superiore del contenitore. Questo aspetto assume particolare importanza nella disposizione delle superfici di scambio: qualora la sorgente di calore sia posta superiormente, lo strato d'aria può agire da barriera isolante, riducendo significativamente il flusso termico verso il PCM. Per questo motivo, nella progettazione dei sistemi è fondamentale considerare attentamente sia la geometria del contenitore sia la posizione delle sorgenti termiche, al fine di limitare la formazione di vuoti e minimizzarne gli effetti.

Le soluzioni adottate per il contenimento dei PCM possono essere ricondotte a tre approcci principali:

- PCM macro-incapsulati:

Una delle soluzioni più immediate consiste nel confinare il PCM all'interno di contenitori di dimensioni macroscopiche, realizzati con materiali aventi buona conducibilità termica e adeguata compatibilità chimica. Le geometrie utilizzate possono essere diverse, tra cui configurazioni rettangolari, cilindriche o sferiche; queste ultime risultano particolarmente vantaggiose grazie al miglior rapporto superficie/volume e alla riduzione dei punti critici di perdita. Il PCM viene generalmente inserito allo stato liquido e successivamente sigillato mediante tecniche di giunzione come saldatura o brasatura. È inoltre necessario prevedere opportuni volumi di compensazione per assorbire l'espansione durante la fusione. Tuttavia, questa soluzione presenta alcune criticità: tra le principali si evidenziano il rischio di perdite nel tempo, la necessità di garantire una perfetta tenuta del contenitore e possibili problemi di compatibilità chimica. Alcuni PCM, come i sali idrati o i metalli a basso punto di fusione, possono infatti risultare corrosivi nei confronti dei materiali strutturali.

- PCM micro-incapsulati:

Un approccio più evoluto consiste nella suddivisione del PCM in particelle di piccole dimensioni, rivestite da un guscio protettivo, generalmente di natura polimerica. Le dimensioni

delle microcapsule sono tipicamente comprese tra 1 e 1000 μm , mentre nei sistemi più avanzati si possono ottenere strutture su scala nanometrica. Questa configurazione consente di aumentare notevolmente la superficie di scambio termico, favorendo una più rapida risposta del materiale durante i processi di fusione e solidificazione. Inoltre, i PCM micro-incapsulati possono essere facilmente integrati in materiali compositi oppure dispersi in fluidi termovettori, dando origine a sistemi con accumulo termico distribuito.

Le tecniche di produzione più diffuse includono processi di polimerizzazione in emulsione, in sospensione o interfacciale, che permettono la formazione di un rivestimento sottile e uniforme attorno al nucleo di PCM.

Nel seguito uno schema tipico di micro-incapsulamento core-sheal (il core, ovvero il nucleo che in questo caso è acido palmitico PA e lo sheal ovvero il guscio in materiale inorganico AlOOH):

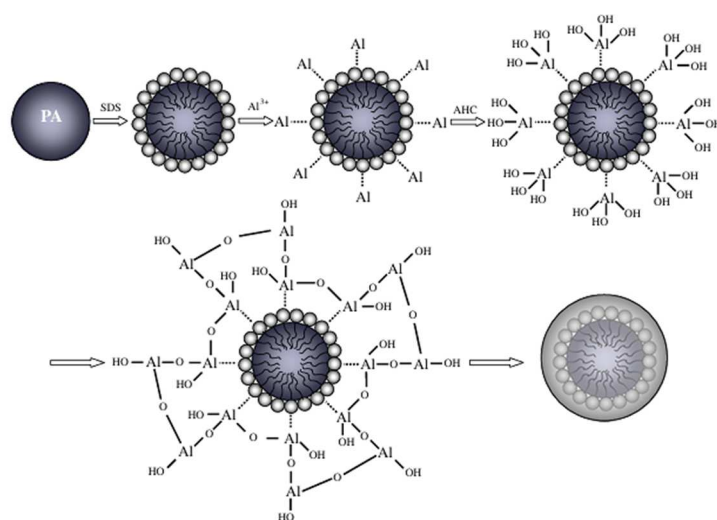


Figura 23. Schema di preparazione di una configurazione Core-Sheal (microincapsulazione) [13]

Nonostante i vantaggi, anche questa soluzione presenta alcune limitazioni, tra cui l'incremento della viscosità nei fluidi contenenti microcapsule, la possibile rottura dei gusci in presenza di sollecitazioni meccaniche e i costi di produzione generalmente più elevati rispetto alle soluzioni tradizionali.

- PCM a forma stabile (SS-PCM):

Una soluzione alternativa consiste nell'utilizzo di PCM a forma stabile, in cui il materiale a cambiamento di fase viene inglobato all'interno di una matrice solida, tipicamente polimerica, che ne impedisce la fuoriuscita anche in fase liquida. In questo caso, il PCM liquido viene

miscelato con un polimero a temperature superiori ai rispettivi punti di fusione. Successivamente, il sistema viene raffreddato, ottenendo un materiale composito in cui la matrice polimerica, rimanendo solida durante il funzionamento, trattiene il PCM per effetto capillare.

Questo approccio elimina la necessità di contenitori rigidi e riduce la formazione di vuoti durante i cicli termici. Tuttavia, comporta una diminuzione della capacità di accumulo energetico complessiva, poiché la frazione polimerica non contribuisce al calore latente. Per questo motivo, è necessario ottimizzare la composizione del materiale, limitando la quantità di polimero al minimo indispensabile.

2.SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO

Il presente capitolo è dedicato all'analisi delle principali tecnologie di accumulo termico, comunemente indicate con l'acronimo TES (Thermal Energy Storage). In una prima fase viene fornita una panoramica generale sui sistemi di accumulo e sulle loro caratteristiche fondamentali. Successivamente, l'attenzione si concentra sulle tre principali modalità di stoccaggio dell'energia termica: accumulo sensibile (SHS), accumulo latente (LHS) e accumulo termochimico (TCS). Infine, vengono esaminate le possibili criticità di natura sanitaria associate all'impiego dei sistemi TES.

2.1 Generalità sui sistemi di accumulo termico

Nel contesto attuale di transizione energetica, caratterizzato da una crescente attenzione alla decarbonizzazione, i sistemi di accumulo dell'energia termica stanno assumendo un ruolo sempre più strategico. Essi rappresentano infatti una soluzione efficace per migliorare la flessibilità e l'efficienza del sistema energetico, favorendo al contempo una maggiore integrazione delle fonti rinnovabili, la riduzione delle emissioni climalteranti e un utilizzo più razionale delle risorse disponibili. Uno degli aspetti più rilevanti dell'accumulo termico è la possibilità di separare temporalmente la fase di produzione dell'energia da quella di utilizzo. Questo consente una gestione più efficiente dei carichi energetici e contribuisce in modo significativo alla riduzione delle emissioni nei settori ad elevata intensità energetica. Le applicazioni dei sistemi TES sono molteplici e riguardano sia il settore civile sia quello industriale. In ambito civile, essi trovano largo impiego nella produzione di acqua calda sanitaria (ACS), nel riscaldamento degli ambienti e nei sistemi di climatizzazione. Nel settore industriale, invece, vengono utilizzati in processi che prevedono cicli termici di riscaldamento e raffreddamento. Dal punto di vista impiantistico, i sistemi di accumulo termico possono essere realizzati sia in forma centralizzata sia distribuita. I sistemi centralizzati sono generalmente impiegati per il recupero e l'accumulo di grandi quantità di calore, ad esempio in impianti industriali o in sistemi solari a concentrazione, con potenze che possono raggiungere diversi megawatt. Al contrario, i sistemi distribuiti sono progettati per applicazioni domestiche o commerciali, con livelli di potenza più contenuti, tipicamente dell'ordine di pochi o decine di kilowatt. Il principio di funzionamento dei sistemi TES si basa sull'immagazzinamento temporaneo di energia sotto forma di calore (o, in alcuni casi, di

freddo), che può essere successivamente rilasciata quando necessario. Le principali fonti da cui può essere recuperata l'energia includono la radiazione solare, l'energia geotermica e il calore di scarto proveniente da processi industriali. L'energia accumulata può essere quindi riutilizzata per il riscaldamento, il raffrescamento o, indirettamente, per la produzione di energia elettrica. In funzione del meccanismo fisico alla base dell'accumulo, le tecnologie TES si distinguono in tre categorie principali, come schematizzato in figura 24:

- Accumulo di calore sensibile (*Sensible thermal energy storage*, STES): si basa sull'immagazzinamento di energia termica mediante l'aumento della temperatura di un materiale, senza che avvenga alcuna trasformazione di fase. I materiali più comunemente utilizzati sono acqua, oli termici e solidi quali rocce o materiali ceramici, scelti per l'elevata capacità termica e la buona stabilità alle variazioni di temperatura. Questa tecnologia è consolidata, relativamente semplice ed economicamente vantaggiosa; tuttavia, richiede volumi considerevoli per accumulare grandi quantità di energia.
- Accumulo di calore latente (*Latent thermal energy storage*, LTES): utilizza materiali a cambiamento di fase, PCM, i quali sono in grado di assorbire o rilasciare energia durante la transizione tra due stati fisici, generalmente tra fase solida e liquida. Come già discusso nel capitolo precedente, l'impiego dei PCM consente di ottenere una maggiore densità energetica rispetto ai sistemi sensibili e di mantenere la temperatura pressoché costante durante i processi di accumulo e rilascio del calore.
- Accumulo termochimico (*Thermochemical thermal energy storage*, TTES): è basato su reazioni chimiche reversibili, attraverso le quali l'energia viene immagazzinata sotto forma di legami chimici. Il calore viene rilasciato durante reazioni esotermiche (di ricombinazione) e assorbito durante reazioni endotermiche (di dissociazione). Questa tecnologia presenta un'elevata capacità di accumulo e perdite energetiche molto ridotte nel tempo; tuttavia, risulta attualmente meno matura rispetto alle altre soluzioni e presenta criticità legate alla stabilità dei materiali, ai fenomeni di corrosione e ai processi di trasferimento di massa e calore.

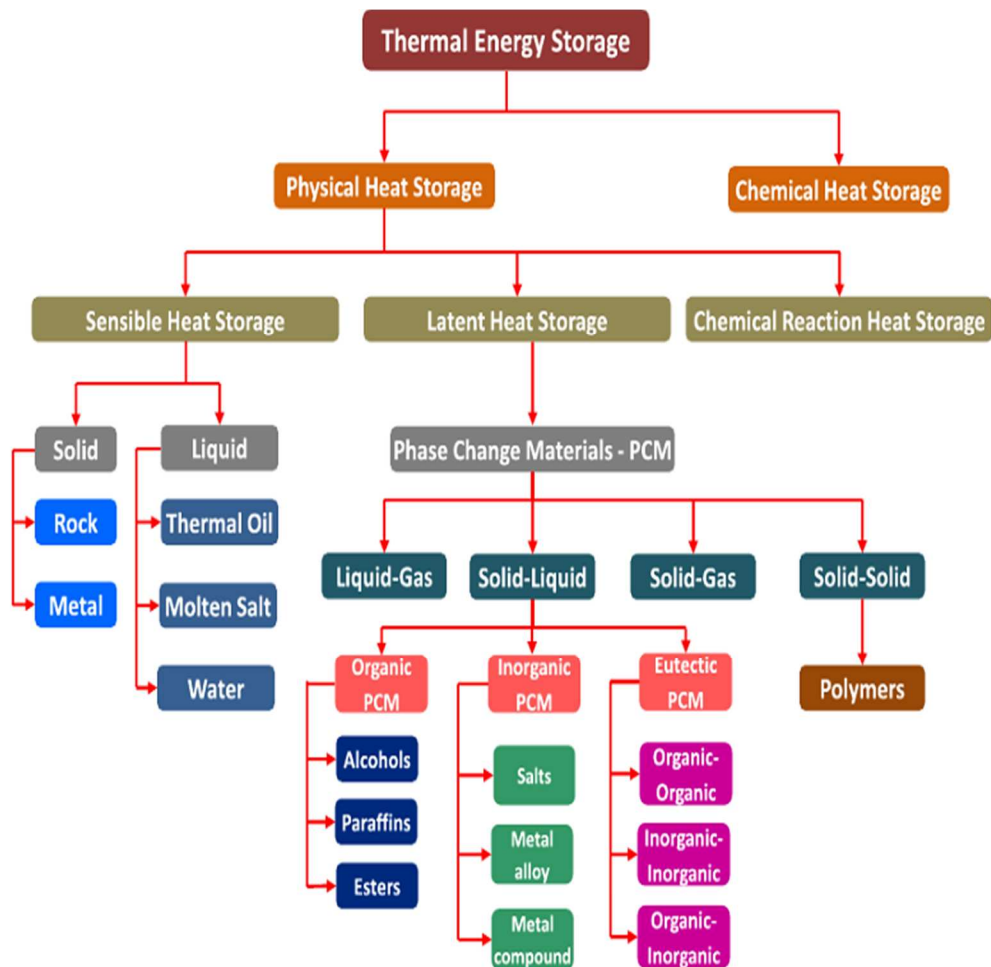


Figura 24: schema delle tipologie di accumulo di energia termica (TES) [14]

Le tecnologie di accumulo termico coprono un ampio intervallo di temperature operative, generalmente compreso tra $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, e presentano densità energetiche variabili indicativamente tra 10 e 2250 MJ/m^3 . I principali parametri che caratterizzano un sistema di accumulo termico, rappresentati in tabella 8, includono:

- **Capacità di accumulo:** rappresenta la quantità totale di energia termica che il sistema è in grado di immagazzinare. Essa dipende dalla tecnologia di accumulo adottata, dalle proprietà del materiale utilizzato e dalle dimensioni complessive del sistema;
- **Potenza termica:** rappresenta la velocità con cui il sistema è in grado di assorbire o cedere energia termica;
- **Efficienza:** è definita come il rapporto tra l'energia utile effettivamente fornita all'utenza e l'energia impiegata per caricare il sistema. Questo parametro tiene

conto delle perdite termiche che si verificano durante le fasi di accumulo, stoccaggio e rilascio;

- Durata dello stoccaggio: indica il periodo di tempo durante il quale l'energia può essere conservata all'interno del sistema. Tale intervallo può variare significativamente, da poche ore fino a settimane o mesi, come nel caso degli accumuli stagionali;
- Tempi di carica e scarica: descrivono il tempo necessario rispettivamente per immagazzinare o rilasciare energia, influenzando direttamente la reattività e la flessibilità operativa del sistema;
- Costo: può essere espresso sia in termini di capacità (€/kWh) sia di potenza (€/kW). Esso dipende dai costi di investimento e di esercizio delle apparecchiature, nonché dalla loro vita utile, generalmente correlata al numero di cicli di utilizzo.

Tabella 7. Parametri principali che caratterizzano le 3 categorie di sistemi TES [15]

TES System	Capacity (kWh/t)	Power (MW)	Efficiency (%)	Storage Period	Cost (€/kWh)
Sensible (hot water)	10–50	0.001–10.0	50–90	days/months	0.1–10
Phase-change material (PCM)	50–150	0.001–1.0	75–90	hours/months	10–50
Chemical reactions	120–250	0.01–1.0	75–100	hours/days	8–100

Dal punto di vista economico, il costo complessivo di un sistema TES include sia i materiali di accumulo sia le apparecchiature necessarie per le fasi di carica e scarica, oltre ai costi operativi. I sistemi basati su accumulo sensibile risultano generalmente più economici, poiché costituiti essenzialmente da serbatoi isolati e componenti di scambio termico relativamente semplici. I materiali impiegati, come acqua, rocce o cemento, sono infatti poco costosi, anche se l'isolamento termico può incidere in modo significativo sul costo totale. Al contrario, i sistemi a calore latente (LTES) e quelli termochimici (TTES) presentano una maggiore complessità e, di conseguenza, costi più elevati. Essi richiedono materiali di accumulo più sofisticati e sistemi avanzati di scambio termico; nel caso dei TTES, si aggiunge anche la necessità di gestire processi di trasferimento di massa. La valutazione economica complessiva di un sistema TES dipende quindi in larga misura dalle specifiche condizioni operative e applicative, inclusi il numero e la frequenza dei cicli di utilizzo. Attualmente, uno dei principali limiti alla diffusione su larga scala di queste tecnologie è rappresentato dal costo specifico. Per questo motivo, la

ricerca è orientata verso lo sviluppo di materiali innovativi e di sistemi di contenimento e isolamento sempre più efficienti.

2.2 Accumuli termici sensibili

Gli accumuli termici sensibili rappresentano la tecnologia più semplice e consolidata tra i sistemi di accumulo termico. Essi si basano sull'immagazzinamento dell'energia attraverso il riscaldamento o il raffreddamento di un materiale di accumulo, che può essere sia allo stato solido sia liquido, come nel caso di acqua, sabbia, sali fusi o rocce.

Tra i diversi materiali disponibili, l'acqua rappresenta il mezzo di accumulo più diffuso a livello commerciale, grazie alle sue eccellenti proprietà termofisiche e alla versatilità di impiego sia in ambito residenziale che industriale.

Per applicazioni su larga scala, è inoltre possibile ricorrere allo stoccaggio sotterraneo di calore sensibile, utilizzando sia fluidi sia materiali solidi. I principali punti di forza dei sistemi STES risiedono nella loro economicità e nella sicurezza operativa, poiché non richiedono l'impiego di sostanze tossiche o pericolose.

Il funzionamento di tali sistemi si basa sulla capacità termica del materiale e sulla variazione di temperatura che esso subisce durante le fasi di carica e scarica.

Come illustrato in figura 25, la quantità di energia termica accumulata è direttamente proporzionale all'incremento di temperatura, evidenziando una relazione lineare tra il calore immagazzinato e la temperatura del mezzo di accumulo.

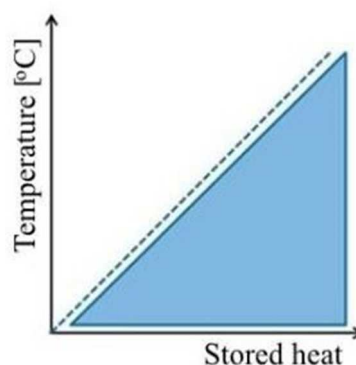


Figura 25. Relazione lineare tra la temperatura e il calore accumulato in un SHS [16]

La quantità di energia termica accumulata può essere determinata mediante la seguente espressione:

$$Q_s = \int m \times c_p \times dt = m \times c_p \times (t_f - t_i) \quad (2.1)$$

dove:

- Q_s rappresenta il calore accumulato, espresso in joule (J);
- m è la massa del materiale di accumulo, espressa in chilogrammi (kg);
- c_p è il calore specifico del materiale, espresso in J/(kg·K);
- t_i è la temperatura iniziale, espressa in °C;
- t_f è la temperatura finale, espressa in °C.

La tabella 8 riporta una selezione dei materiali più comunemente impiegati nei sistemi di accumulo termico sensibile, evidenziandone le principali proprietà termofisiche:

Tabella 8. Materiali più comunemente impiegati nei sistemi di accumulo termico [14]

Medium	Fluid Type	Temperature Range (°C)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/(kg·K))
Sand	-	20	1555	800
Rock	-	20	2560	879
Brick	-	20	1600	840
Concrete	-	20	2240	880
Granite	-	20	2640	820
Aluminium	-	20	2707	896
Cast iron	-	20	7900	837
Water	-	0–100	1000	4190
Caloria HT43	Oil	12–260	867	2200
Engine oil	Oil	≤160	888	1880
Ethanol	Organic liquid	≤78	790	2400
Propane	Organic liquid	≤97	800	2500
Butane	Organic liquid	≤118	809	2400
Isotunaol	Organic liquid	≤100	808	3000
Isopentanol	Organic liquid	≤148	831	2200
Octane	Organic liquid	≤126	704	2400

Tra i fluidi, l'acqua rappresenta il mezzo di accumulo più diffuso grazie al suo elevato calore specifico, al basso costo e alla facile reperibilità. Tuttavia, per applicazioni che richiedono temperature operative superiori ai 100 °C, si rende necessario l'impiego di fluidi alternativi, quali oli termici, sali fusi o metalli liquidi, in grado di garantire stabilità termica a temperature più elevate. Per quanto riguarda i materiali solidi, questi risultano particolarmente adatti in applicazioni come il riscaldamento dell'aria, dove vengono spesso utilizzati letti granulari o materiali rocciosi.

2.2.1 Accumulo termico ad acqua

L'acqua rappresenta il fluido più comunemente utilizzato nei sistemi di accumulo termico sensibile, grazie alla sua elevata capacità termica, al costo contenuto e alla facile disponibilità. Per queste ragioni, i serbatoi di acqua calda trovano ampia diffusione in numerose applicazioni, tra cui impianti solari termici, sistemi di riscaldamento e configurazioni di cogenerazione, dove

consentono di immagazzinare e rendere disponibile energia termica in modo efficiente. Numerosi studi e applicazioni pratiche hanno dimostrato che l'accumulo in serbatoi d'acqua costituisce una soluzione economicamente vantaggiosa, soprattutto quando si riesce a mantenere una buona stratificazione termica all'interno del volume di accumulo e un adeguato isolamento del sistema, condizioni fondamentali per limitare le perdite di calore. Nel caso di un sistema a temperatura uniforme, ovvero in assenza di stratificazione, la quantità di energia termica accumulata può essere determinata attraverso la seguente relazione:

$$Q_S = m \times c_p \times Dt_s \quad (2.2)$$

dove Q_S rappresenta l'energia accumulata, m la massa del fluido e c_p il calore specifico, mentre Dt_s indica la variazione di temperatura del sistema. L'intervallo operativo di temperatura è generalmente vincolato, inferiormente, dai requisiti dell'applicazione e, superiormente, da fenomeni quali l'evaporazione del fluido o l'aumento delle perdite termiche. Per questo motivo, i sistemi ad acqua operano tipicamente entro limiti di temperatura ben definiti. Dal punto di vista dimensionale, i serbatoi destinati alla produzione di acqua calda sanitaria presentano volumi che possono variare da alcune centinaia di litri fino a diversi metri cubi. In applicazioni su larga scala, come lo stoccaggio stagionale dell'energia solare, si impiegano invece serbatoi di grandi dimensioni, che possono raggiungere anche migliaia di metri cubi. Un esempio rappresentativo di applicazione è costituito dagli impianti solari combinati, nei quali il serbatoio di accumulo svolge una funzione centrale: esso viene alimentato dai collettori solari e, se necessario, da una fonte ausiliaria, e distribuisce il calore sia per la produzione di acqua calda sanitaria sia per il riscaldamento degli ambienti. Di seguito, in figura 26, un esempio di tale configurazione:

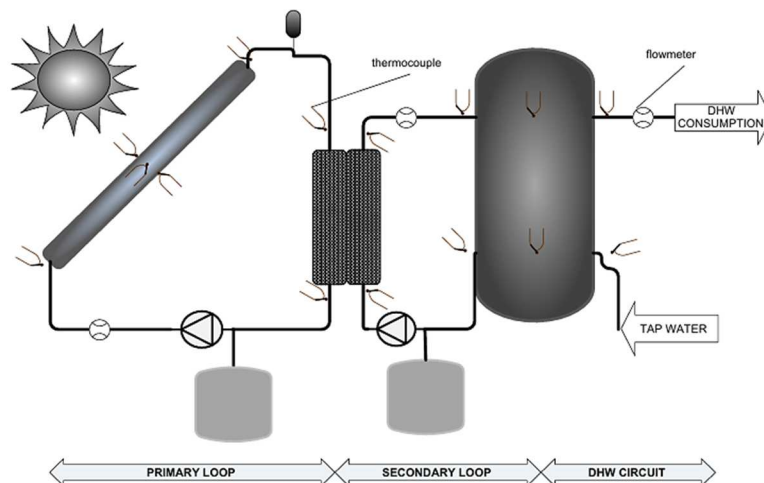


Figura 26. Impianto solare combinato che utilizza un sistema STES ad acqua [17]

2.3 Accumuli termici latenti

I sistemi di accumulo termico latente (LTES) si basano sull'impiego di materiali a cambiamento di fase (PCM), caratterizzati dalla capacità di assorbire e rilasciare elevate quantità di energia durante il passaggio da una fase all'altra, generalmente tra stato solido e liquido.

A differenza degli accumuli a calore sensibile, in cui l'energia viene immagazzinata attraverso una variazione di temperatura, nei sistemi latenti il processo avviene principalmente durante la transizione di fase. In questa fase, il materiale assorbe o cede calore mantenendo una temperatura quasi costante, come illustrato qualitativamente in figura 27.

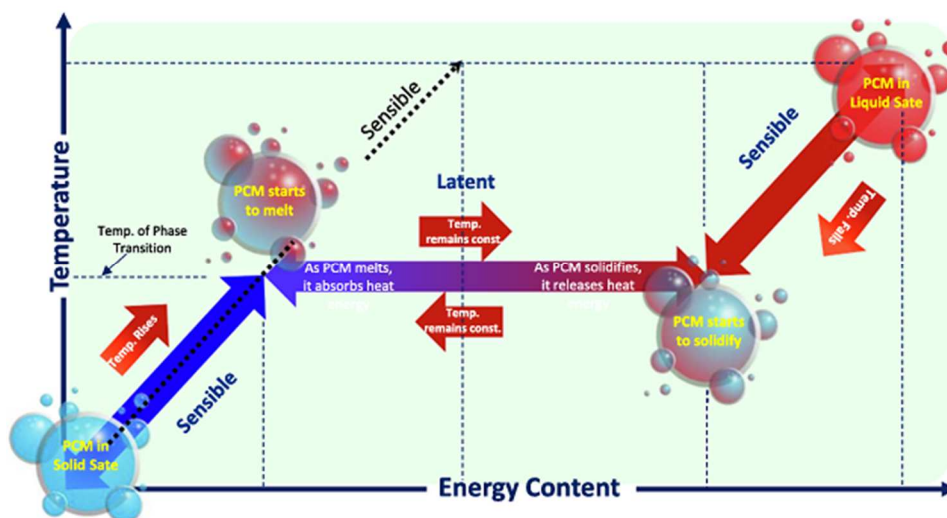


Figura 27. Calore immagazzinato da un sistema TES latente che sfrutta i PCM [14]

Questo comportamento rappresenta uno dei principali vantaggi dei PCM, poiché consente di operare in condizioni termiche stabili. L'elevata quantità di energia accumulabile a parità di volume è un'altra caratteristica distintiva di questi sistemi. La densità energetica risulta infatti

significativamente superiore rispetto agli accumuli sensibili, rendendo gli LTES particolarmente adatti in applicazioni in cui lo spazio disponibile è limitato o è richiesta una gestione precisa della temperatura.

Dal punto di vista dei meccanismi fisici, le transizioni di fase possono essere di diversa natura. Le trasformazioni solido-solido, associate a modifiche della struttura cristallina, risultano meno diffuse a causa della minore quantità di energia coinvolta.

Le transizioni liquido-gas, pur offrendo valori molto elevati di calore latente, comportano variazioni volumetriche significative che ne complicano l'impiego pratico. Per questo motivo, i materiali più utilizzati nei sistemi di accumulo sono quelli che operano una transizione solido-liquido, in grado di garantire un buon compromesso tra capacità di accumulo e stabilità dimensionale, con variazioni di volume generalmente contenute.

La quantità di energia accumulata in un sistema LTES può essere descritta considerando tre contributi distinti: il riscaldamento del materiale nella fase solida, il calore latente associato al cambiamento di fase e il successivo riscaldamento nella fase liquida. La capacità di accumulo termico Q_s , espressa in J, di un sistema LTES è descritta dall'equazione:

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_m} m \times c_p \times dt + (m \times f \times \Delta q) + \int_{t_m}^{t_f} m \times c_p \times dt \quad (2.3)$$

che diventa:

$$Q_s = m \times [c_{ps} \times (t_m - t_i) + f \times \Delta q + c_{pl} \times (t_f - t_m)] \quad (2.4)$$

dove m rappresenta la massa del materiale, t_i , t_m e t_f sono rispettivamente la temperatura iniziale, la temperatura di fusione e quella finale, c_{ps} e c_{pl} sono i calori specifici nelle fasi solida e liquida, f è la frazione di materiale che subisce il cambiamento di fase e Δq è il calore latente di fusione.

Per un corretto funzionamento di un sistema di accumulo latente, è necessario che il materiale selezionato presenti una temperatura di transizione compatibile con il range operativo richiesto.

Inoltre, risulta fondamentale garantire un'adeguata superficie di scambio termico, al fine di favorire i processi di carica e scarica, e utilizzare contenitori compatibili con le proprietà chimico-fisiche del PCM.

Nonostante i numerosi vantaggi, come visto in precedenza, i sistemi LTES presentano anche alcune criticità quali la bassa conducibilità termica, che può limitare la velocità di trasferimento del calore, la compatibilità chimica con i materiali di contenimento e costi generalmente più elevati rispetto ai sistemi di accumulo termico sensibile.

2.4 Accumuli termochimici

I sistemi di accumulo termochimico (TTES) si basano sull'impiego di materiali termochimici (TCM), in grado di immagazzinare e rilasciare energia attraverso reazioni chimiche reversibili di tipo endotermico ed esotermico. In questi sistemi, l'energia non viene accumulata sotto forma di variazione di temperatura o cambiamento di fase, ma come energia chimica associata alla trasformazione del materiale. Il principio di funzionamento può essere descritto considerando un materiale reagente A che, durante la fase di carica, assorbe calore e si decompone nei prodotti B e C. Questa fase è endotermica e consente di immagazzinare energia nel sistema. I prodotti della reazione possono essere separati e conservati anche per lunghi periodi, senza la necessità di mantenere elevate temperature, riducendo così le perdite energetiche durante lo stoccaggio. Nella fase di scarica, i prodotti B e C vengono nuovamente messi in contatto nelle opportune condizioni operative, dando luogo alla reazione inversa, di tipo esotermico, che comporta il rilascio dell'energia precedentemente accumulata. Questo meccanismo, schematizzato in figura 28, rappresenta uno degli aspetti più interessanti degli accumuli termochimici, ovvero la possibilità di separare fisicamente il processo di accumulo da quello di conservazione.

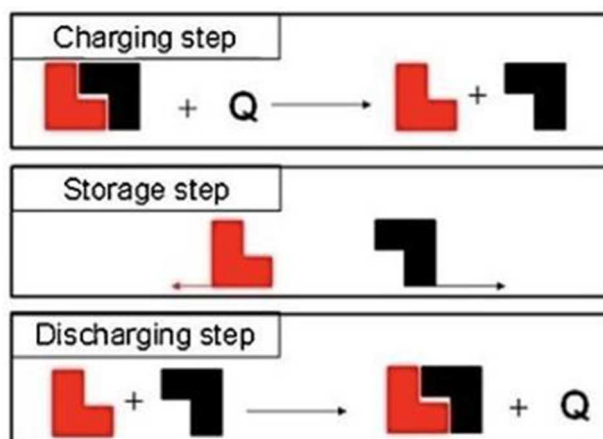


Figura 28. Schema del processo di carica e scarica di un accumulo termochimico [14]

Un esempio rilevante di applicazione è rappresentato dalla decomposizione termica di ossidi metallici, particolarmente promettente per sistemi di accumulo ad alta temperatura. In tali processi, la reazione comporta la liberazione di ossigeno, che può essere recuperato oppure disperso, mentre nella fase inversa può essere riassorbito dall'ambiente. Tra le reazioni più studiate si possono citare:

- la decomposizione dell'ossido di potassio, attiva in un intervallo di temperatura compreso tra 300 °C e 800 °C, caratterizzata da un elevato contenuto energetico;
- la decomposizione dell'ossido di piombo, che avviene a temperature più contenute, tipicamente tra 300 °C e 350 °C, ma con una capacità di accumulo inferiore.

Oltre alle reazioni di decomposizione, anche i processi di adsorbimento e assorbimento trovano applicazione nei sistemi TTES. In questi casi, l'energia viene accumulata attraverso l'interazione tra una sostanza e la superficie di un materiale solido o liquido. Tali sistemi risultano particolarmente interessanti non solo per lo stoccaggio di energia termica, ma anche per il controllo dell'umidità e, in alcuni casi, per il trasporto dell'energia sotto forma di materiali reattivi. I processi di adsorbimento sono generalmente impiegati in applicazioni a bassa e media temperatura, tipicamente fino a circa 350 °C, mentre le reazioni chimiche consentono di operare anche a temperature più elevate, ampliando il campo di applicazione dei sistemi termochimici. Nella tabella 9 nel seguito sono riassunti i principali materiali più promettenti per l'applicazione in sistemi di accumulo termochimico:

Tabella 9. Materiali più promettenti per accumuli termochimici [18]

Thermochemical Material (C)	Solid Reactant (A)	Working Fluid (B)	Energy Storage Density of Thermochemical Material (GJ/m ³)	Charging Reaction Temperature (°C)
MgSO ₄ ·7H ₂ O	MgSO ₄	7H ₂ O	2.8	122
FeCO ₃	FeO	CO ₂	2.6	180
Ca(OH) ₂	CaO	H ₂ O	1.9	479
Fe(OH) ₂	FeO	H ₂ O	2.2	150
CaCO ₃	CaO	CO ₂	3.3	837
CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaSO ₄	2H ₂ O	1.4	89

2.5 Rischi sanitari: legionella

La legionella è un batterio ubiquitario negli ambienti acquatici, sia naturali sia artificiali. La sua rilevanza in ambito impiantistico è legata alla capacità di colonizzare reti idriche civili e

industriali, dove può proliferare in presenza di condizioni favorevoli, dando origine a infezioni anche gravi, note con il termine di legionellosi. Le manifestazioni cliniche associate all'infezione si distinguono principalmente in due forme. La prima è la malattia del legionario, una polmonite severa che interessa soprattutto soggetti vulnerabili, quali anziani, immunodepressi o individui con patologie pregresse. Il periodo di incubazione è generalmente compreso tra 2 e 10 giorni e, in assenza di trattamento adeguato, può avere esiti anche fatali. La seconda è la febbre di Pontiac, una forma più lieve con sintomatologia simil-influenzale, caratterizzata da un'incubazione più breve (1–2 giorni) e da una risoluzione spontanea senza complicazioni. La trasmissione all'uomo avviene prevalentemente per via inalatoria, attraverso aerosol contenente il batterio. Tali aerosol possono essere generati da numerosi dispositivi presenti negli impianti, tra cui docce, rubinetti, sistemi di climatizzazione, torri evaporative e serbatoi.

La proliferazione della legionella è favorita da specifiche condizioni ambientali e operative. In particolare, il batterio si sviluppa più facilmente in intervalli di temperatura compresi tra 25 °C e 45 °C, in presenza di ristagni idrici o scarsa circolazione. Ulteriori fattori favorevoli sono la formazione di biofilm sulle superfici interne delle tubazioni e la presenza di sedimenti o incrostazioni, che possono fornire nutrienti e protezione al microrganismo. La crescita e la sopravvivenza del batterio dipendono in modo significativo anche dalle caratteristiche fisico-chimiche dell'acqua e dalla configurazione degli impianti. Per tale motivo, risulta fondamentale adottare criteri progettuali e gestionali adeguati, soprattutto in contesti particolarmente sensibili, come strutture ospedaliere, alberghiere, residenze sanitarie assistenziali e impianti sportivi.

Le Linee Guida emanate dal Ministero della Salute nel 2015, in accordo con la Conferenza Stato-Regioni, sottolineano la necessità di un approccio integrato alla gestione del rischio, basato su un insieme coordinato di misure preventive e correttive. Tra queste rientrano:

- una progettazione accurata degli impianti idraulici, evitando zone di ristagno e tratti terminali non utilizzati;
- la manutenzione periodica degli impianti idrici e di climatizzazione;
- la pulizia e la disinfezione regolare di serbatoi, tubazioni e punti di erogazione;

- il controllo delle temperature operative, mantenendo l'acqua fredda al di sotto dei 20 °C e quella calda al di sopra dei 50 °C;
- la circolazione continua dell'acqua per prevenire fenomeni di stagnazione.

È importante evidenziare che nessuna singola misura è sufficiente a garantire la completa eliminazione del rischio. La prevenzione della legionellosi richiede infatti un approccio sistemico, che integri progettazione, gestione, monitoraggio e interventi di disinfezione. I trattamenti di controllo possono essere suddivisi in metodi chimici e metodi fisici, applicabili sia in modalità continua, con funzione preventiva, sia attraverso interventi shock in caso di contaminazione. Tra i metodi chimici si distinguono l'utilizzo di ipoclorito di sodio, efficace sia in trattamento continuo sia discontinuo, il biossido di cloro, particolarmente attivo anche a basse concentrazioni e in grado di agire sul biofilm, e i sistemi di ionizzazione rame-argento, che sfruttano l'azione antimicrobica degli ioni metallici.

Un'ulteriore soluzione è rappresentata dall'impiego di perossido di idrogeno in combinazione con argento, che consente una buona efficacia limitando la formazione di sottoprodotti indesiderati. La scelta del trattamento chimico deve essere effettuata considerando diversi aspetti, tra cui la qualità dell'acqua, i materiali dell'impianto e le condizioni operative. In ogni caso, tali trattamenti non possono sostituire le misure strutturali e gestionali, ma devono essere integrati all'interno di una strategia complessiva. I metodi fisici, generalmente più semplici da implementare, si basano principalmente sul controllo della temperatura e sull'impiego di barriere fisiche. Tra questi si includono lo shock termico, che prevede l'innalzamento della temperatura dell'acqua fino a 70–80 °C per un periodo prolungato, e la disinfezione termica continua, basata sul mantenimento di temperature superiori a 50 °C o su cicli periodici a circa 60 °C.

Ulteriori soluzioni sono rappresentate dalla filtrazione terminale, mediante filtri installati nei punti d'uso, e dall'irraggiamento UV, efficace per trattamenti localizzati ma privo di effetto residuo. Anche per i metodi fisici risulta fondamentale l'integrazione con altre strategie di controllo, al fine di prevenire la riformazione del biofilm e la conseguente ricontaminazione degli impianti.

3.SET UP DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE

Nel presente capitolo viene illustrato in maniera dettagliata l'impianto sperimentale utilizzato per l'esecuzione delle prove sperimentali.

L'analisi è articolata in più sezioni: inizialmente vengono descritti i singoli componenti che costituiscono l'apparato, successivamente viene analizzato il funzionamento complessivo dell'impianto, con particolare attenzione all'interazione tra i diversi sottosistemi. Infine, vengono presentate le configurazioni operative adottate durante le campagne sperimentali, distinguendo tra fase di carica e fase di scarica del serbatoio di accumulo termico.

3.1 Composizione generale dell'impianto con accumulo

In questa sezione viene fornita una visione d'insieme dell'intero impianto, includendo tutti i componenti precedentemente descritti e il loro collegamento all'interno del circuito.

L'obiettivo è quello di chiarire il funzionamento globale del sistema, mettendo in relazione la configurazione impiantistica con le modalità operative adottate durante le prove. A tal fine, si farà riferimento sia agli schemi idraulici, utili per comprendere la logica di funzionamento del circuito, sia alle rappresentazioni dell'impianto reale, che consentono di identificare concretamente i diversi elementi installati.

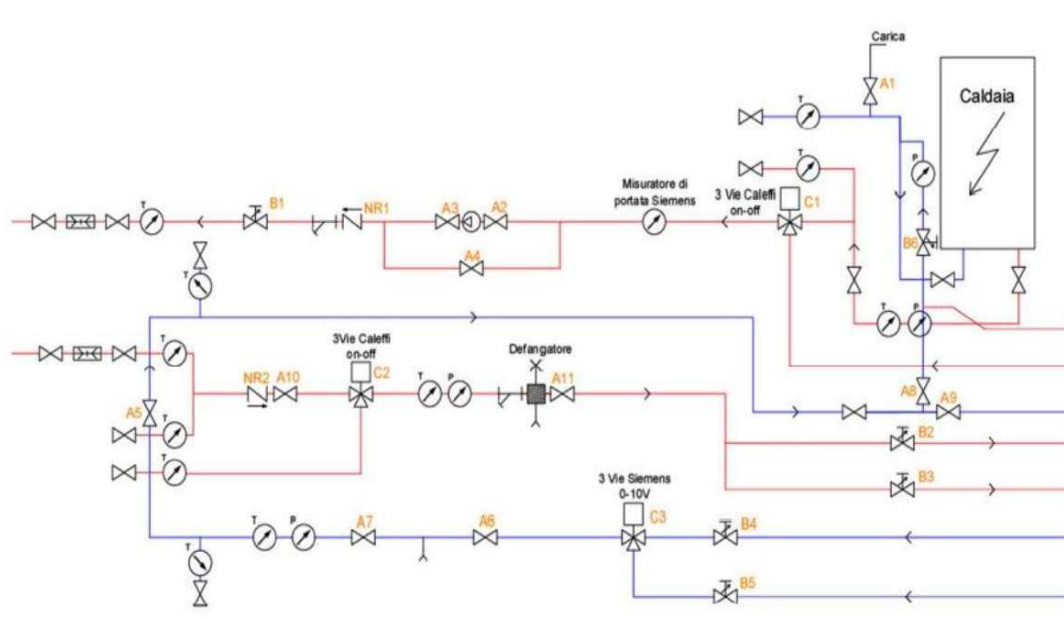


Figura 29. Schema dell'impianto lato sinistro



Figura 30. Foto reale dell'impianto lato sinistro

Il circuito idraulico ha origine dal punto di ingresso dell'acqua nella caldaia, la cui portata è regolata mediante una valvola di bilanciamento manuale. Tale componente consente di impostare le condizioni operative desiderate in funzione della specifica prova sperimentale. A valle della caldaia si sviluppa il ramo principale del circuito, identificato come ramo di carica dell'accumulo. Esso comprende una valvola a tre vie ON/OFF (componente C1, Figura 29), un misuratore di portata Siemens e una pompa di circolazione Wilo. In condizioni operative standard, la valvola C1 è mantenuta in posizione ON, permettendo il convogliamento del fluido verso il sistema di misura e successivamente verso l'unità di pompaggio. La pompa di circolazione è dotata di valvole di intercettazione a monte e a valle, che ne consentono l'isolamento durante eventuali operazioni di manutenzione. Parallelamente al ramo principale è presente una linea di bypass, equipaggiata con una valvola a sfera dedicata, che permette il funzionamento del circuito anche in assenza della pompa principale. In questa configurazione, la circolazione del fluido è garantita dal circolatore integrato nella caldaia, assicurando così la continuità operativa dell'impianto anche in condizioni di fermo dell'unità di pompaggio principale.



Figura 31. Pompa di circolazione con ramo di by-pass

Successivamente, il fluido incontra una seconda valvola a tre vie ON/OFF (componente C2, Figura 29), la cui funzione è quella di regolare l'interazione con il serbatoio di accumulo. In particolare, quando la valvola è in posizione OFF, il fluido viene deviato attraverso il serbatoio di accumulo: dopo aver attraversato il volume di accumulo, esso rientra nel circuito principale tramite il ramo inferiore della valvola stessa. Al contrario, quando la valvola C2 è in posizione ON, il serbatoio di accumulo viene escluso dal circuito e il fluido prosegue direttamente lungo il ramo principale senza attraversarlo.

A valle della valvola C2, il circuito è dotato di una sezione dedicata al trattamento del fluido termovettore, composta da un filtro a "Y" e da un defangatore. Tali dispositivi svolgono un ruolo fondamentale nel garantire l'affidabilità dell'impianto in quanto permettono la rimozione di impurità solide e particelle in sospensione che potrebbero compromettere il corretto funzionamento dei componenti. In particolare, i filtri a "Y" sono collocati in prossimità di curve e giunzioni, ovvero nelle zone in cui, a causa delle condizioni di moto turbolento, è più probabile l'accumulo di sedimenti. Proseguendo lungo il circuito, il flusso viene suddiviso in due rami distinti, attivabili o escludibili tramite valvole di intercettazione e dispositivi di bilanciamento, che consentono di configurare diverse modalità operative dell'impianto. In dettaglio:

- Il ramo superiore convoglia il fluido verso l'aerotermostato esterno, il quale ha la funzione di dissipare calore e quindi raffreddare l'acqua;
- Il ramo inferiore costituisce un bypass dell'aerotermostato, permettendo al fluido di evitare il passaggio attraverso lo scambiatore nel caso in cui tale ramo venga escluso.

I due rami confluiscono successivamente in una valvola a tre vie miscelatrice (componente C5, Figura 32), che consente, a seconda della configurazione impostata, di miscelare le due correnti oppure di escluderne completamente una. A valle della valvola C5, il fluido può seguire due differenti percorsi:

- proseguire lungo il circuito principale;
- essere parzialmente deviato verso l'accumulo freddo, in funzione delle condizioni operative e del fabbisogno richiesto dal sistema. L'accumulo freddo è direttamente collegato al chiller, il quale ha il compito di raffreddare il fluido e mantenerne la temperatura intorno al valore di

setpoint, pari a circa 10 °C. L'ultima sezione del circuito è costituita da due rami, rappresentati nello schema in Figura 32 (linee blu nella parte inferiore):

- il ramo superiore trasporta la quota di fluido in uscita dalla valvola C5 che non viene inviata all'accumulo;
- il ramo inferiore rappresenta invece la linea di prelievo dell'acqua dall'accumulo freddo.

Questi due flussi convergono infine in un'ulteriore valvola a tre vie miscelatrice (componente C3, Figura 29), la quale svolge un ruolo chiave nella regolazione della temperatura del fluido inviato al serbatoio di accumulo in prova. Il controllo della temperatura in ingresso al sistema di accumulo risulta particolarmente critico durante la fase di scarica, in quanto è necessario garantire condizioni termiche ben definite e riproducibili, mantenendo la temperatura di ritorno entro un valore di setpoint stabilito per ciascuna prova sperimentale.

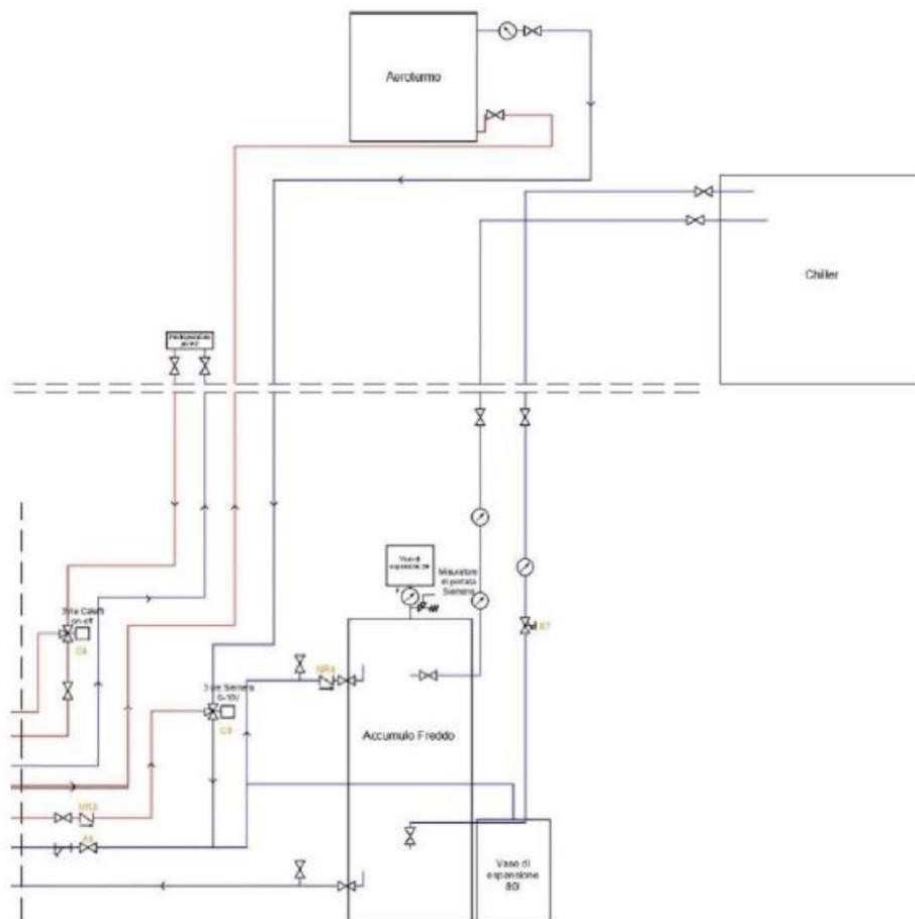


Figura 32. Schema dell'impianto lato destro



Figura 33. Foto reale dell'impianto lato destro

3.2 Impianto per lo studio di test di accumulo

L'impianto impiegato per l'intera attività sperimentale è stato realizzato appositamente all'interno del laboratorio di Fisica Tecnica, con l'obiettivo di analizzare il comportamento di sistemi di accumulo termico basati su materiali a cambiamento di fase (PCM). Si tratta di un sistema articolato, costituito da numerosi componenti e punti di connessione, progettato per consentire l'analisi in diverse condizioni operative. Proprio in virtù di questa flessibilità, l'impianto presenta anche alcune diramazioni e linee non direttamente coinvolte nelle prove considerate nel presente lavoro. Il cuore del sistema è rappresentato dal serbatoio di accumulo, realizzato come prototipo sperimentale e progettato per lo studio del comportamento termico sia in configurazione con acqua, sia con materiale PCM macro-incapsulato.

3.2.1 Caldaia

Nel circuito è installata una caldaia elettrica murale, prodotta dalla Vaillant, con una potenza nominale pari a 14 kW (Figura 34).



Figura 34. Caldaia elettrica Vaillant

La scelta di adottare una caldaia elettrica, in luogo di un generatore a combustione, è stata motivata principalmente da esigenze di sicurezza e semplicità impiantistica, in quanto consente di evitare la presenza di sistemi di evacuazione dei fumi e di adduzione dell'aria comburente. Il riscaldamento del fluido avviene per effetto Joule, mediante due resistenze elettriche da 7 kW ciascuna, integrate all'interno dell'unità. L'apparecchiatura è in grado di operare in un intervallo di temperatura compreso tra 28 °C e 85 °C ed è dotata di un sistema di sicurezza che interviene al raggiungimento dei 95 °C. La pressione massima di esercizio è pari a 3 bar. All'interno della caldaia è inoltre integrata una pompa di circolazione, caratterizzata da una portata volumetrica nominale di 1.202 l/h e da una prevalenza residua pari a 30 kPa. Tale pompa può essere utilizzata come sistema ausiliario nel caso di indisponibilità della pompa principale del circuito. Infine, a completamento dei dispositivi di sicurezza, l'unità è equipaggiata con un vaso di espansione avente volume pari a 7 litri.

3.2.2 Pompa di circolazione

Per garantire la movimentazione del fluido termovettore all'interno del circuito è stata installata una pompa centrifuga prodotta da WILO, alimentata in corrente monofase a 230 V (Figura 35).



Figura 35. Pompa di circolazione Wilo

La pompa è progettata per operare con fluidi in un intervallo di temperatura compreso tra -20 °C e 110 °C. Al fine di evitare fenomeni di cavitazione, è necessario che la pressione operativa non scenda al di sotto di 1 bar. Una delle caratteristiche principali del dispositivo è la possibilità di modulare le condizioni di funzionamento, grazie a una prevalenza variabile compresa tra 4,9 kPa e 98 kPa. In funzione delle esigenze sperimentali, è possibile selezionare diverse modalità di regolazione:

- Velocità a giri fissi, che consente di impostare una delle tre velocità di rotazione disponibili;
- Regolazione lineare, nella quale la variazione del numero di giri comporta una modifica della portata mantenendo pressoché costante la prevalenza;
- Regolazione proporzionale, in cui la variazione del numero di giri determina una modifica simultanea sia della portata sia della prevalenza.

Questa flessibilità operativa consente di adattare il comportamento della pompa alle diverse condizioni di prova, garantendo un controllo accurato del flusso all'interno del sistema.

3.2.3 Accumulo caldo

Il serbatoio di accumulo termico rappresenta l'elemento centrale dell'impianto e costituisce il componente principale oggetto di studio (Figura 36).

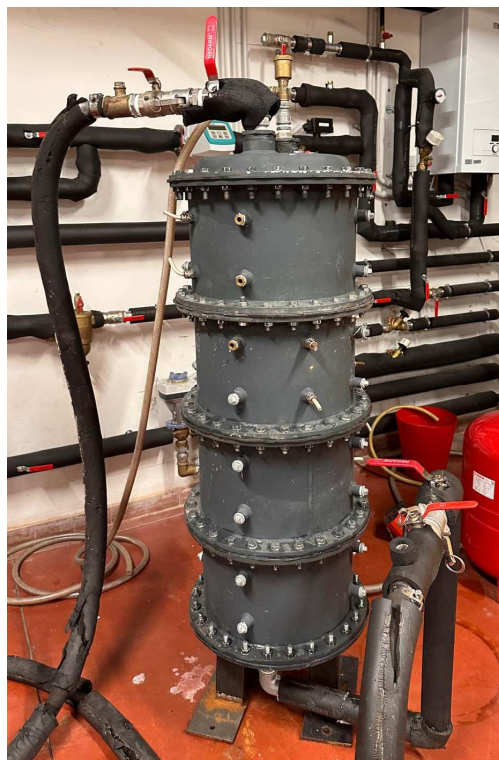


Figura 36. Accumulo caldo prototipo

Esso è stato appositamente progettato per l'analisi del comportamento termico di sistemi di accumulo basati su materiali PCM. Realizzato in acciaio, il serbatoio presenta una capacità complessiva pari a 146 litri ed è configurato secondo una struttura modulare. In particolare, l'accumulo è costituito da quattro moduli assemblati mediante connessioni flangiate e sistemi di fissaggio meccanico. Questa soluzione progettuale consente di variare il volume totale del sistema in funzione delle esigenze sperimentali, garantendo una notevole flessibilità.

Ciascun modulo è dotato di otto pozzetti distribuiti lungo la superficie laterale, all'interno dei quali vengono installati sensori di temperatura. Tali sensori permettono di monitorare in modo dettagliato l'evoluzione del campo termico sia nel fluido che nel materiale di accumulo. Il serbatoio è inoltre equipaggiato con due bocchelli principali, collocati rispettivamente nella parte superiore e inferiore, che consentono l'ingresso e l'uscita del fluido termovettore.

Il sistema è completato da connessioni idrauliche realizzate mediante tubazioni flessibili, collegate tramite raccordi rapidi di tipo camlock. Questa soluzione consente un rapido scambio tra linea di mandata e linea di ritorno, permettendo di modificare agevolmente la configurazione del circuito. Grazie a questa flessibilità, è possibile invertire i collegamenti di ingresso e uscita del fluido, rendendo possibile lo studio del comportamento dell'accumulo sia

in condizioni di carica stratificata (ingresso dall'alto) sia in condizioni non stratificate (ingresso dal basso).

A completamento della configurazione del serbatoio sono presenti:

- uno scarico posizionato nella parte inferiore;
- uno sfiato superiore, dotato di valvola a sfera per la messa in atmosfera;
- una valvola di sicurezza installata nella parte sommitale.

3.2.4 Accumulo freddo

Il serbatoio di accumulo freddo, fornito dall'azienda Pacetti, è illustrato in Figura 37.



Figura 37. Accumulo freddo Pacetti

Esso è realizzato in acciaio al carbonio di tipo S235JR ed è rivestito con uno strato isolante in poliuretano espanso rigido (PUR) di spessore pari a 55 mm. Tale isolamento è progettato per svolgere una duplice funzione: limitare le dispersioni termiche e prevenire la formazione di condensa sulle superfici esterne. Il serbatoio ha una capacità massima di circa 500 litri ed è progettato per mantenere il fluido a temperatura pressoché costante durante il funzionamento. La pressione nominale di esercizio è pari a 1,5 bar, mentre la pressione massima ammissibile raggiunge gli 8 bar. In condizioni operative standard, la pressione interna si mantiene intorno al valore nominale; tuttavia, nel caso in cui essa superi i 4 bar, è prevista l'attivazione automatica di una valvola di sicurezza installata nella parte superiore del

serbatoio. Il campo di temperatura di progetto è compreso tra -10 °C e 90 °C. Durante le prove sperimentali, tuttavia, il sistema viene fatto operare mantenendo l'accumulo freddo a una temperatura prossima ai 10 °C, in accordo con il setpoint imposto dal chiller.

3.2.5 Aerotermo

All'esterno del laboratorio è installato un aerotermo, il cui compito è quello di dissipare il calore trasportato dal fluido termovettore proveniente dal circuito, riducendone la temperatura prima della reimmissione nel sistema. Il funzionamento del dispositivo si basa su uno scambio termico tra acqua e aria ambiente: il fluido caldo attraversa lo scambiatore cedendo calore all'aria, e viene quindi restituito al circuito a una temperatura inferiore rispetto a quella di ingresso. L'aerotermo utilizzato (Figura 38), prodotto dalla Galletti, è costituito da uno scambiatore di calore a pacco alettato, realizzato con tubi in rame e alette in alluminio, soluzione che consente di aumentare significativamente la superficie di scambio termico.



Figura 38. Aerotermo Galletti

Il flusso d'aria attraverso lo scambiatore è generato da un ventilatore, che garantisce condizioni di convezione forzata e quindi un incremento delle prestazioni di scambio termico. Il ventilatore è azionato da un motore elettrico brushless dotato di inverter, che permette la regolazione della velocità di rotazione. Questa caratteristica consente di modulare la portata d'aria e, di conseguenza, l'intensità dello scambio termico, adattando il funzionamento dell'aerotermo alle diverse condizioni operative dell'impianto. A completamento del sistema sono presenti una vaschetta per la raccolta della condensa, generata durante il raffreddamento del fluido, e opportuni dispositivi di canalizzazione che indirizzano il flusso d'aria in uscita.

3.2.6 Chiller

All'esterno del laboratorio è installato un chiller prodotto dalla Galletti, illustrato in Figura 39, il cui funzionamento si basa su un ciclo frigorifero a compressione di vapore.



Figura 39. Chiller Galletti

Il sistema è costituito dai principali componenti del ciclo frigorifero: evaporatore, condensatore, compressore e valvola di espansione. Come fluido refrigerante viene utilizzato R-410A, che consente il trasferimento di energia termica attraverso continui passaggi di fase tra stato liquido e vapore. Nel dettaglio, il refrigerante assorbe calore dall'acqua contenuta nell'accumulo freddo, operando a temperatura inferiore rispetto a quest'ultima, e successivamente lo cede all'ambiente esterno, caratterizzato da una temperatura più elevata. In questo modo si realizza il raffreddamento del fluido termovettore circolante nel sistema. Il ciclo è azionato da un compressore volumetrico rotativo, dotato di inverter, che consente la modulazione della potenza frigorifera attraverso la variazione della velocità di rotazione. L'espansione del refrigerante è invece regolata mediante una valvola di espansione elettronica controllata tramite logica PID, installata a monte dell'evaporatore. A fini di sicurezza, il chiller è equipaggiato con un vaso di espansione di capacità pari a 5 litri, progettato per compensare eventuali variazioni di pressione nel circuito. Il dispositivo è direttamente collegato all'accumulo freddo e consente di mantenere la temperatura dell'acqua intorno al valore di setpoint, pari a circa 10 °C nelle condizioni operative standard.

3.2.7 Misuratore di portata

Sulla linea di mandata, a valle della caldaia, è installato un misuratore di portata elettromagnetico fornito da Siemens (Figura 40).



Figura 40. Misuratore di portata Siemens

Il principio di funzionamento si basa sulla legge di induzione elettromagnetica di Faraday: il passaggio di un fluido elettricamente conduttivo all'interno di un campo magnetico genera una differenza di potenziale proporzionale alla velocità del fluido stesso.

Tale segnale viene acquisito ed elaborato dal sistema di misura, permettendo di determinare la portata volumetrica. Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia è l'assenza di organi meccanici in movimento, che comporta una ridotta manutenzione e perdite di carico trascurabili rispetto ad altre tipologie di strumenti, quali misuratori a diaframma o a effetto Venturi.

Le prestazioni in termini di accuratezza risultano elevate: per velocità del fluido superiori a 0,1 m/s, l'incertezza di misura è pari a $\pm 0,2\% \pm 1 \text{ mm/s}$, mentre per velocità inferiori a 0,1 m/s l'errore è pari a $\pm(0,125/v)\%$.

3.2.8 Valvole a sfera

All'interno del circuito sono presenti numerose valvole manuali di intercettazione a sfera, fornite dall'azienda Cimberio (Figura 41).



Figura 41. Valvole di intercettazione a sfera Cimberio

Questi dispositivi svolgono una funzione di tipo ON/OFF, consentendo l'apertura o la completa chiusura del flusso all'interno delle tubazioni. Il loro funzionamento si basa sulla rotazione di una sfera forata alloggiata nel corpo valvola: mediante l'azionamento di una leva esterna, la

sfera viene orientata in modo da allineare o disallineare il foro rispetto alla direzione del flusso, permettendo o impedendo il passaggio del fluido.

Le valvole a sfera rivestono un ruolo fondamentale nella gestione operativa dell'impianto, in quanto permettono di isolare specifiche sezioni del circuito, effettuare interventi di manutenzione e configurare percorsi alternativi del fluido, come nel caso dei rami di bypass. La loro semplicità costruttiva e l'elevata affidabilità le rendono particolarmente adatte a impianti sperimentali caratterizzati da frequenti modifiche di configurazione.

3.2.9 Valvole a tre vie ON/OFF

L'impianto è equipaggiato con tre valvole a tre vie ON/OFF automatiche, fornite da Caleffi (Figura 42).



Figura 42. Valvola a tre vie Caleffi

Queste valvole sono realizzate con corpo in ottone e otturatore a sfera cromata e sono azionate da un servomotore elettrico alimentato a 230 V in corrente monofase. Il loro funzionamento prevede due configurazioni operative distinte: in presenza di alimentazione elettrica, la valvola consente il passaggio del fluido nel ramo principale del circuito; in assenza di alimentazione, invece, devia il flusso verso il ramo di bypass. In questo modo è possibile controllare in maniera automatica la distribuzione del fluido tra i diversi rami dell'impianto. Il tempo di commutazione tra le due posizioni è dell'ordine di circa 40 secondi. Le valvole operano in un intervallo di temperatura compreso tra -5 °C e 110 °C e sono progettate per resistere a pressioni di esercizio fino a 10 bar, garantendo affidabilità anche in condizioni operative variabili.

3.2.10 Valvole a tre vie modulanti

All'interno dell'impianto sono installate due valvole a tre vie modulanti, fornite da Siemens (Figura 43), progettate per la regolazione e la miscelazione di due flussi in ingresso in un'unica corrente in uscita.



Figura 43. Valvola a tre vie modulante Siemens

Le valvole sono realizzate con corpo in bronzo e otturatore in acciaio inox, materiali che garantiscono elevata resistenza alla corrosione e una buona durabilità nel tempo, anche in condizioni operative variabili. Il funzionamento è affidato a un servomotore elettrico controllato mediante segnale analogico in tensione continua compreso tra 0 e 10 V. In particolare:

- con segnale pari a 0 V, una delle due vie risulta completamente aperta mentre l'altra è chiusa;
- con segnale pari a 10 V, si ottiene la configurazione opposta;
- per valori intermedi del segnale, entrambe le vie risultano parzialmente aperte, consentendo la miscelazione dei flussi in proporzioni variabili.

Questo tipo di regolazione continua permette un controllo preciso della temperatura del fluido all'interno del circuito, risultando fondamentale nelle fasi di prova in cui è necessario imporre condizioni termiche ben definite. Il tempo di attuazione dell'otturatore per il passaggio completo tra le due configurazioni estreme è di circa 30 secondi.

3.2.11 Valvole di bilanciamento

L'impianto è dotato di cinque valvole di bilanciamento (Figura 44), di cui quattro prodotte da Caleffi e una dalla Watts.



Figura 44. Valvola di bilanciamento Caleffi

Questi dispositivi svolgono un ruolo essenziale nella regolazione idraulica del circuito, consentendo di controllare e distribuire correttamente le portate nei diversi rami dell'impianto. Attraverso la regolazione manuale della perdita di carico introdotta dalla valvola, è possibile equilibrare il sistema, evitando squilibri tra i vari circuiti paralleli e garantendo che ogni sezione riceva la portata di fluido desiderata.

Le valvole di bilanciamento risultano particolarmente importanti in un impianto sperimentale come quello in esame, caratterizzato dalla presenza di numerose diramazioni e configurazioni operative variabili. Esse permettono infatti di:

- stabilizzare il funzionamento idraulico del sistema;
- riprodurre condizioni di prova controllate e ripetibili;
- ottimizzare le prestazioni complessive del circuito.

L'obiettivo principale delle valvole di bilanciamento è quello di garantire un corretto equilibrio idraulico del circuito, assicurando che tutti i rami presentino perdite di carico comparabili, in particolare rispetto al ramo più sfavorito. La regolazione avviene mediante l'azione sulla manopola della valvola, la cui rotazione determina lo spostamento dell'otturatore interno. Tale movimento modifica la sezione di passaggio del fluido, variando di conseguenza la perdita di carico introdotta nel ramo. A monte di ciascuna valvola sono installati due punti di presa per la misura della pressione, che consentono di determinare la portata volumetrica circolante nel ramo attraverso la seguente relazione:

$$V = k \times v \times \sqrt{Dp}$$

dove:

- kv rappresenta il coefficiente caratteristico della valvola, legato alle perdite di carico;
- D_p è la differenza di pressione misurata tra i due punti di presa.

Le valvole prodotte da Caleffi sono realizzate in lega resistente alla dezincificazione, con otturatore in acciaio inox, e sono progettate per operare con perdite di carico ridotte quando completamente aperte. Per garantire misure affidabili, è necessario rispettare specifiche condizioni di installazione, in particolare la presenza di tratti rettilinei di tubazione a monte e a valle della valvola: tipicamente pari a cinque diametri nominali in ingresso e due diametri nominali in uscita. L'incertezza associata alla determinazione della portata mediante queste valvole è dell'ordine del $\pm 10\%$. La valvola fornita da Watts presenta caratteristiche costruttive analoghe, ma offre una maggiore precisione, con un'incertezza ridotta fino a circa $\pm 3\%$.

3.2.12 Valvole di sicurezza

Per la protezione del sistema da eventuali condizioni di sovrappressione, l'impianto è dotato di valvole di sicurezza installate sulla sommità sia dell'accumulo caldo sia dell'accumulo freddo. Questi dispositivi sono costituiti da un corpo in ottone e da un sistema elastico a molla, generalmente realizzato in acciaio Ni-Cr, che mantiene l'otturatore in posizione chiusa fino al raggiungimento della pressione di taratura. Quando la pressione del fluido supera il valore limite impostato, la forza esercitata dal fluido diventa sufficiente a vincere la resistenza della molla, determinando l'apertura della valvola e la conseguente fuoriuscita di una parte del fluido. Questo meccanismo consente di riportare la pressione del sistema entro condizioni di sicurezza, prevenendo possibili danni ai componenti dell'impianto. Le valvole di sicurezza installate nell'impianto sono tarate per intervenire a una pressione nominale di circa 3 bar. A causa del fenomeno di isteresi, tuttavia, l'apertura completa si verifica solo quando la pressione supera di circa il 10% il valore di taratura, ovvero intorno a 3,3 bar. Questi dispositivi sono del tipo a riarmo automatico: una volta che la pressione del sistema diminuisce, la valvola tende a richiudersi progressivamente fino a tornare completamente in posizione di chiusura quando la pressione scende a circa il 20% al di sotto del valore di intervento, ossia intorno a 2,4 bar. Questo comportamento consente di evitare aperture e chiusure troppo frequenti, garantendo al contempo la sicurezza del sistema.

3.2.13 Valvola di sfogo

La presenza di aria all'interno del circuito, dovuta a imperfette condizioni di tenuta o alle operazioni di avviamento e regolazione dell'impianto, rende necessaria l'installazione di un dispositivo per lo sfiato automatico. A tale scopo, è stata installata una valvola automatica di sfogo aria fornita da Caleffi (Figura 45), posizionata nella parte superiore dell'accumulo caldo, zona in cui l'aria tende naturalmente ad accumularsi per effetto della sua minore densità rispetto all'acqua.



Figura 45. Valvola di sfogo Caleffi

Il funzionamento della valvola si basa sulla presenza di un galleggiante interno collegato al meccanismo di apertura. Quando nel corpo della valvola si accumula aria, il livello del liquido si abbassa e il galleggiante scende, provocando l'apertura dell'otturatore e la conseguente espulsione dell'aria. Una volta eliminata, il fluido riempie nuovamente il volume interno, il galleggiante risale e la valvola si richiude automaticamente. Il dispositivo è progettato per operare in condizioni di temperatura fino a 110 °C e per una pressione massima di esercizio pari a circa 2,5 bar.

3.2.14 Valvola di ritegno

Le valvole di ritegno, o valvole di non ritorno, hanno la funzione di garantire il flusso del fluido in un'unica direzione, impedendo fenomeni di riflusso all'interno del circuito.



Figura 46. Valvola di ritegno Enolgas

In condizioni standard, la valvola si mantiene chiusa e si apre soltanto quando la differenza di pressione tra ingresso e uscita supera una soglia minima, pari a circa 0,05 bar. Al di sotto di tale valore, oppure in presenza di un'inversione del gradiente di pressione, un sistema a molla richiude l'otturatore, evitando il ritorno del fluido. Questo comportamento è particolarmente importante per garantire il corretto funzionamento del circuito e prevenire interferenze tra i diversi rami, soprattutto in presenza di bypass e percorsi alternativi del fluido. Nell'impianto in esame sono installate quattro valvole di ritegno, fornite da Enolgas.

3.2.15 Vaso di espansione

Il vaso di espansione (Figura 47) ha la funzione di compensare le variazioni di pressione all'interno del circuito, dovute alla dilatazione termica dell'acqua al variare della temperatura.



Figura 47. Vaso di espansione Varem

Il componente installato è prodotto dalla Varem ed è caratterizzato da un volume nominale pari a 80 litri. Si tratta di un vaso di espansione a membrana, in cui una parete flessibile separa il fluido termovettore da un gas in pressione, generalmente aria o azoto. In condizioni iniziali, a impianto freddo, il volume occupato dall'acqua all'interno del vaso è minimo e la pressione corrisponde al valore di esercizio minimo del sistema.

Durante il funzionamento, l'aumento della temperatura comporta una dilatazione del fluido, che viene assorbita dal vaso attraverso la deformazione della membrana e la compressione del gas. Questo meccanismo consente di limitare le variazioni di pressione nel circuito, evitando sollecitazioni eccessive sui componenti. La pressione massima ammissibile del vaso è pari a circa 6 bar; tuttavia, in condizioni operative reali, tale valore non viene mai raggiunto grazie alla presenza delle valvole di sicurezza, che intervengono a pressioni inferiori, tipicamente intorno a 3,5 bar.

3.2.16 Gruppo di riempimento

Il gruppo di riempimento (Figura 48) è un dispositivo destinato al reintegro automatico del fluido termovettore all'interno del circuito.



Figura 48. Gruppo di riempimento

Esso è installato sulla linea di adduzione dell'acqua proveniente dall'acquedotto e ha il compito di mantenere la pressione del sistema entro un intervallo prestabilito. Quando la pressione scende al di sotto del valore di soglia impostato, il dispositivo consente l'immissione automatica di acqua nel circuito, ripristinando le condizioni operative corrette. Il gruppo permette la regolazione della pressione di reintegro in un intervallo tipicamente compreso tra 0,2 e 4 bar. La temperatura massima di esercizio è pari a circa 65 °C, valore compatibile con il funzionamento della linea di alimentazione.

Questo componente risulta particolarmente importante per garantire la continuità operativa dell'impianto, evitando condizioni di funzionamento a bassa pressione che potrebbero compromettere l'efficienza e la sicurezza del sistema.

Essendo, come detto, installato sulla linea di alimentazione dell'acqua proveniente dall'acquedotto, non è direttamente influenzato dalle condizioni termiche operative del circuito durante le fasi sperimentali. Questo aspetto rappresenta un vincolo applicativo, in quanto il dispositivo opera sempre in condizioni prossime alla temperatura ambiente.

I principali componenti che costituiscono il gruppo di riempimento sono:

- un riduttore di pressione, realizzato in ottone, che consente l'immissione dell'acqua nel circuito fino al raggiungimento del valore di pressione impostato;
- un filtro in acciaio inox, avente la funzione di trattenere eventuali impurità solide presenti nell'acqua di rete;

- una valvola di ritegno, che impedisce il riflusso del fluido dall'impianto verso l'acquedotto;
- un rubinetto di intercettazione, utilizzato per escludere il gruppo dal circuito;
- un manometro, che permette il monitoraggio diretto della pressione a valle del dispositivo.

3.2.17 Filtro a "Y"

Nel circuito sono installati due filtri a "Y" (Figura 49), forniti da Cimberio (modello DN32), con la funzione di rimuovere le impurità solide presenti nel fluido termovettore.



Figura 49. Filtro a Y Cimberio

La denominazione deriva dalla particolare configurazione del corpo valvola, che presenta una derivazione inclinata destinata alla raccolta delle particelle solide. Questa geometria consente di combinare la funzione di filtrazione con quella di accumulo delle impurità, facilitandone la successiva rimozione. L'elemento filtrante è costituito da un cestello in maglia metallica, con fori di diametro pari a circa 0,65 mm, in grado di trattenere le particelle solide trasportate dal fluido. Durante il funzionamento, le impurità si depositano nella sezione inclinata del filtro, riducendo il rischio di trascinamento lungo il circuito. Le operazioni di pulizia devono essere effettuate a impianto fermo e in assenza di pressione. Per consentire la manutenzione in sicurezza, il filtro è isolabile tramite valvole a sfera installate a monte e a valle. Il campo di temperatura operativa del dispositivo è compreso tra -10 °C e 180 °C, rendendolo idoneo alle condizioni di esercizio dell'impianto.

3.2.18 Defangatore

Nel circuito è installato un ulteriore dispositivo di filtrazione, denominato defangatore (Figura 50), fornito da Caleffi, progettato per la separazione e la raccolta delle impurità solide presenti nel fluido termovettore, in particolare fanghi e particelle ferrose.



Figura 50. Defangatore Caleffi

Il funzionamento del defangatore si basa sulla combinazione di una riduzione della velocità del fluido e dell'azione gravitazionale.

All'interno del dispositivo è presente un'ampia camera di raccolta, collocata nella parte inferiore, in cui le particelle solide tendono a depositarsi per effetto del loro peso. L'elemento interno è costituito da una struttura reticolare che favorisce l'intercettazione delle impurità attraverso fenomeni di impatto e successiva sedimentazione. Questo consente una separazione efficace delle particelle solide anche in presenza di flussi continui. La manutenzione del dispositivo può essere effettuata senza interrompere il funzionamento dell'impianto, mediante l'apertura del rubinetto di scarico posto nella parte inferiore, che consente l'espulsione dei sedimenti accumulati. Inoltre, la presenza di una valvola di sfogo nella parte superiore permette l'eliminazione dell'aria eventualmente presente nel circuito. Il defangatore è in grado di trattenere particelle con diametri fino a pochi micrometri (circa 5 μm), sebbene le prestazioni migliori si ottengano per particelle di dimensioni superiori a 100 μm . Il campo di temperatura operativa del dispositivo è compreso tra 0 °C e 110 °C, risultando compatibile con le condizioni di esercizio dell'impianto.

3.2.19 Tubazioni e raccordi

A completamento della descrizione dei componenti dell'impianto, si riportano le principali caratteristiche delle tubazioni e dei raccordi impiegati. Le tubazioni, fornite dalla ditta Geberit, sono realizzate in acciaio non legato di tipo 1.0034 e sono dotate di zincatura esterna, finalizzata alla protezione dalla corrosione. Anche i raccordi, costruiti nello stesso materiale, presentano un trattamento superficiale analogo, ulteriormente migliorato mediante un rivestimento protettivo cromato. L'assemblaggio delle linee è realizzato mediante un sistema

di giunzione meccanica a pressare, che consente il collegamento tra tubazioni e raccordi tramite deformazione controllata del materiale mediante apposita attrezzatura. Questa soluzione garantisce rapidità di installazione e affidabilità della connessione. La tenuta idraulica e pneumatica è assicurata dalla presenza di guarnizioni interne, progettate per operare in un intervallo di temperatura compreso tra 30 °C e 120 °C, sia in presenza di acqua sia di aria compressa. Al fine di ridurre le dispersioni termiche, tutte le tubazioni sono state coibentate mediante un sistema isolante a doppio strato (Euroclass B1-S2d0), con spessore pari a 20 mm, contribuendo al miglioramento dell'efficienza complessiva del sistema.

3.3 Configurazioni di utilizzo nelle prove sperimentali

Dopo aver descritto in dettaglio la configurazione dell'impianto, si analizzano ora le modalità operative adottate durante le prove sperimentali. Il sistema è stato progettato per operare in modo flessibile, consentendo la simulazione di due principali condizioni di esercizio:

- la fase di carica dell'accumulo;
- la fase di scarica dell'accumulo, durante la quale viene simulata una richiesta di energia termica.

Le due configurazioni vengono rappresentate mediante schemi semplificati (Figura 51 per la carica e Figura 52 per la scarica), che evidenziano i principali rami del circuito e i componenti coinvolti durante le prove. In generale, la fase di carica consiste nell'immissione di acqua calda all'interno del serbatoio di accumulo fino al raggiungimento di una condizione termica prossima al setpoint prefissato. Al contrario, durante la fase di scarica, l'accumulo viene attraversato da acqua a temperatura inferiore, determinando un progressivo raffreddamento del sistema. Tra le due fasi è prevista una fase intermedia di regolazione, durante la quale, con l'accumulo isolato, viene stabilizzata la temperatura del fluido al valore desiderato per l'avvio delle prove di scarica. Una descrizione dettagliata delle procedure sperimentali e delle condizioni operative adottate sarà fornita nel capitolo successivo.

3.3.1 Configurazione di carica

Durante la fase di carica, il circuito utilizza la caldaia come generatore termico per il riscaldamento del fluido. L'acqua viene inizialmente prelevata dalla rete idrica e immessa nel circuito attraverso il gruppo automatico di riempimento, che riduce la pressione da circa 4 bar a un valore di esercizio pari a circa 1,5 bar. Successivamente, il fluido viene riscaldato

all'interno della caldaia e inviato verso l'accumulo mediante la pompa di circolazione, dando avvio al processo di carica del serbatoio. Per garantire il corretto ritorno del fluido verso la caldaia, risulta necessario escludere il passaggio attraverso l'aerotermo, realizzando un by-pass mediante la valvola a tre vie modulante C5 (schema riportato in Figura 34). Inoltre, al fine di evitare l'ingresso nel circuito della corrente proveniente dall'accumulo freddo, tale linea viene esclusa agendo sulla valvola miscelatrice a tre vie C3, alla quale viene inviato un segnale di comando pari a 10 V. In questa configurazione, la valvola risulta completamente chiusa verso il ramo freddo, garantendo che il fluido circoli esclusivamente nel circuito di carica.

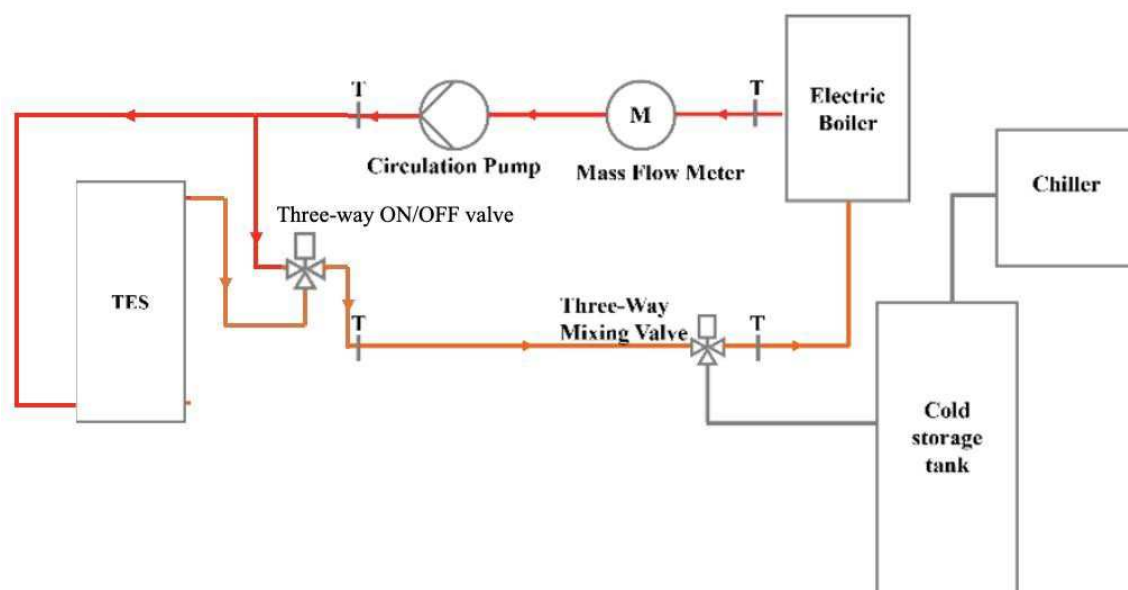


Figura 51. Schema semplificato dell'impianto utilizzato durante la fase di carica dell'accumulo

3.3.2 Configurazione di scarica

La configurazione di scarica dell'impianto è finalizzata alla rimozione dell'energia termica accumulata nel sistema, processo che viene interamente affidato al chiller. Anche in questa modalità operativa, l'aerotermo esterno viene escluso dal circuito. Durante la fase di scarica, il fluido termovettore viene prelevato dall'accumulo caldo e convogliato verso il serbatoio freddo. Successivamente, l'acqua viene raffreddata mediante il chiller e reimpressa nel circuito, confluendo nel ramo inferiore che alimenta la valvola miscelatrice a tre vie C3. Il controllo della temperatura durante questa fase è affidato proprio alla valvola C3, la quale riceve un segnale di comando variabile compreso tra 0 e 10 V. In funzione del valore del segnale, la valvola modula il grado di apertura dei rami, regolando la quantità di fluido freddo immesso nel circuito e consentendo così di ottenere la temperatura desiderata all'interno dell'accumulo.

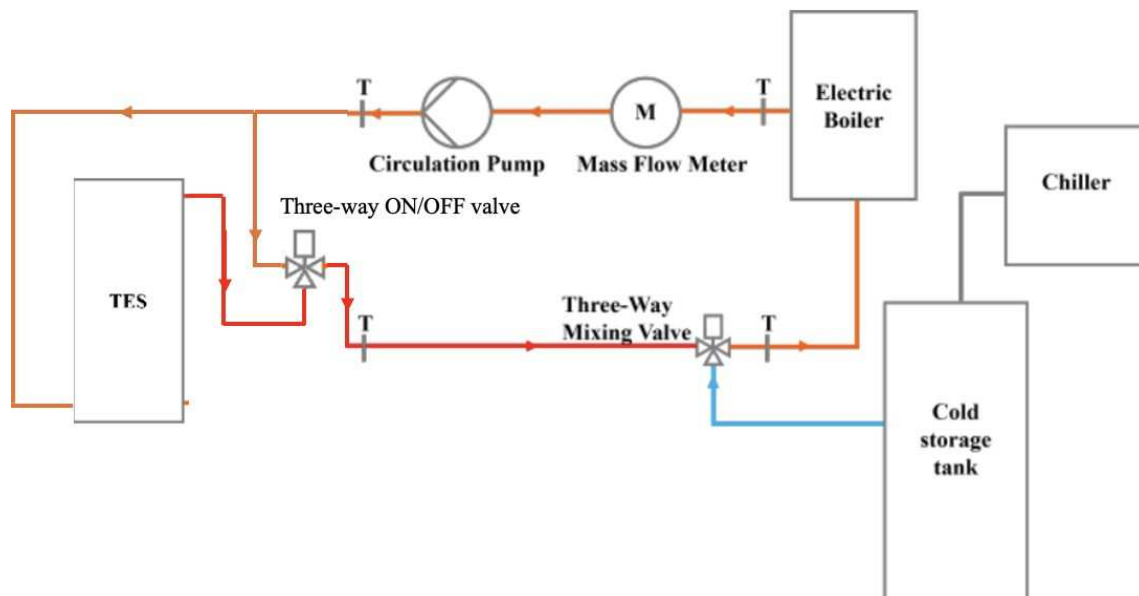


Figura 52. Schema semplificato dell'impianto utilizzato durante la fase di scarica dell'accumulo

4. METODOLOGIA DELLE PROVE SPERIMENTALI

In questo capitolo vengono illustrate in maniera approfondita le procedure operative adottate per la realizzazione delle prove sperimentali. In una prima fase viene presentato il materiale a cambiamento di fase utilizzato, descrivendone le principali caratteristiche fisiche e le modalità con cui è stato integrato all'interno del sistema di accumulo. Successivamente, l'attenzione è rivolta ai sistemi di misura e acquisizione dei dati: vengono infatti analizzati nel dettaglio sia il posizionamento dei sensori di temperatura nei punti più significativi del circuito, sia la strumentazione utilizzata per il monitoraggio delle grandezze termiche. Infine, viene descritto l'ambiente di controllo sviluppato tramite LabVIEW, utilizzato per la gestione dell'impianto idronico e per l'esecuzione delle prove sperimentali.

4.1 Caratteristiche del PCM macro-incapsulato

Il materiale a cambiamento di fase impiegato nelle prove sperimentali è un PCM di natura inorganica appartenente alla categoria dei sali idrati, identificato commercialmente come ATS 31 e prodotto dall'azienda tedesca Axiotherm GmbH [22]. Questo materiale è contenuto all'interno di un sistema innovativo di macro-incapsulamento realizzato in polipropilene, noto come HeatStixx L, sviluppato e commercializzato dall'azienda kraftBoxx GmbH [23].

A differenza delle configurazioni piane macro-incapsulate comunemente utilizzate in letteratura, nel presente studio il PCM è contenuto all'interno di capsule cilindriche in materiale plastico, come mostrato in Figura 53.

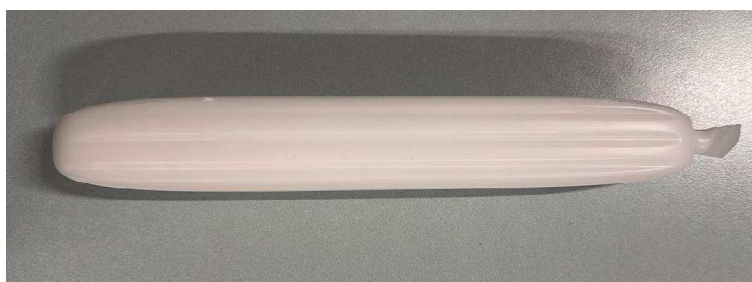


Figura 53. ATS 31.

Tali capsule presentano una geometria assimilabile a quella di un cilindro, con superficie esterna caratterizzata da piccole scanalature e sezione circolare, e sono sigillate alle estremità per garantire la tenuta del materiale durante i cicli di fusione e solidificazione. Questa configurazione geometrica comporta alcune implicazioni dal punto di vista termo-

fluidodinamico. In particolare, la forma cilindrica consente una distribuzione più uniforme del fluido termovettore attorno alla superficie della capsula, favorendo lo scambio termico per convezione. Tuttavia, rispetto a soluzioni con elevata superficie specifica, questo tipo di capsula presenta un minore rapporto superficie di scambio esterna/volume di PCM, e ciò consegue in coefficienti di scambio termico ridotti che rallentano il processo di cambiamento di fase. Le principali proprietà termofisiche del materiale fornite dal produttore sono riportate nella tabella di seguito:

Tabella 10. Proprietà termofisiche ATS31. [21]

Temperatura di fusione (°C)	30-34
Temperatura di solidificazione (°C)	29-32
Capacità di accumulo termico (kJ/kg)	230
Calore specifico (kJ/kg*K)	2
Densità (liquido) (kg/l)	1.3
Conducibilità termica (W/m*K)	0.6
Espansione volumetrica (%)	>6
Temperatura massima di esercizio (°C)	50
Punto di infiammabilità (°C)	Non infiammabile
Corrosività	Effetti corrosive sui metalli

Il PCM è progettato per operare in un intervallo di temperatura compatibile con applicazioni di accumulo termico a bassa e media temperatura, rendendolo idoneo per sistemi di accumulo termico latente.

È opportuno evidenziare che il materiale ATS31 presenta un comportamento corrosivo nei confronti dei metalli. Di conseguenza, eventuali perdite o fuoriuscite del PCM potrebbero causare danni ai componenti dell'accumulo e compromettere il corretto funzionamento dell'intero sistema. Oltre ai dati presenti in tabella 10, il produttore fornisce anche un'analisi più dettagliata del comportamento termico del materiale attraverso la curva di entalpia, riportata in Figura 54.

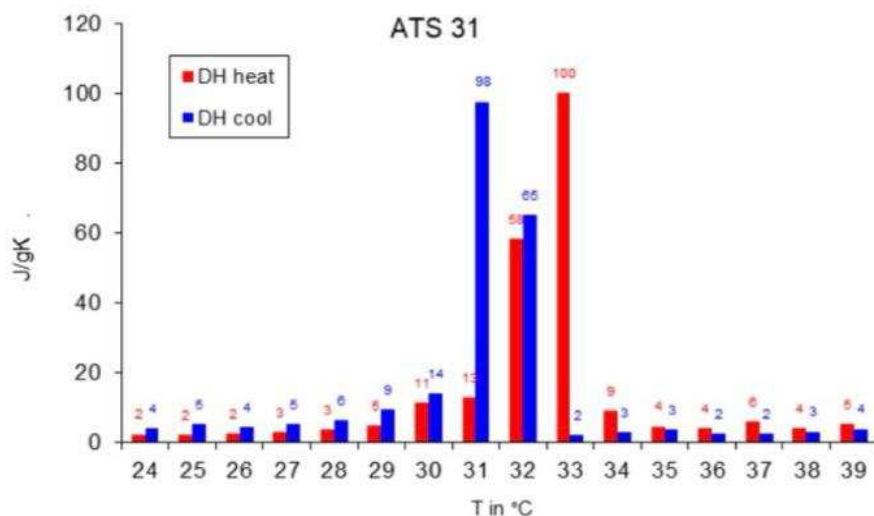


Figura 54. Curva dell'entalpia dell'ATS31 fornita dalla Axiotherm GmbH. [21]

Tale rappresentazione mostra la distribuzione dell'energia accumulata e rilasciata dal materiale durante il processo di fusione e solidificazione, evidenziando come l'entalpia vari in funzione della temperatura. Come anticipato nei capitoli precedenti, il fenomeno di accumulo e rilascio del calore latente non avviene a una temperatura puntuale, ma si sviluppa all'interno di un intervallo di temperatura. All'interno di questo intervallo si individua un valore caratteristico, generalmente associato alla temperatura di cambiamento di fase, in corrispondenza del quale si registra il massimo contributo energetico. Nel caso specifico dell'ATS31, dall'analisi della curva di entalpia si osserva che il rilascio di energia non è concentrato esclusivamente attorno ai 31 °C, ma risulta distribuito su un intervallo più ampio, compreso indicativamente tra 29 °C e 32 °C. Questo comportamento è tipico di molti materiali a cambiamento di fase reali, nei quali la transizione non avviene in modo ideale ma su un range di temperature.

4.1.1 Disposizione dei PCM nell'accumulo

La configurazione dell'accumulo è stata definita sulla base delle caratteristiche geometriche e fisiche dei moduli PCM impiegati, al fine di quantificare in modo accurato la quantità di materiale attivo effettivamente contenuta nel sistema e il grado di riempimento del serbatoio. Nel caso in esame, l'accumulo presenta un volume complessivo pari a 146 litri ed è stato riempito con 200 moduli HeatStixx L contenenti PCM di tipo ATS31. Ciascun modulo è caratterizzato da un volume interno pari a 0,18 litri e da un volume esterno pari a 0,222 litri,

mentre la massa del materiale a cambiamento di fase contenuto è pari a circa 230 g, a cui si aggiunge una massa dell'involucro di circa 40 g. I singoli HeatStixx L sono inoltre caratterizzati da un'altezza pari a 260 mm e un diametro di 35 mm. I moduli sono stati collocati all'interno del serbatoio seguendo una disposizione ordinata, disponendoli orizzontalmente e organizzandoli su più livelli sovrapposti. Per garantire una corretta stabilità e mantenere una distanza adeguata tra i vari elementi, sono state utilizzate tre griglie distanziatrici metalliche. Nella seguente figura viene mostrata la disposizione adottata dei PCM nell'accumulo.



Figura 55. Disposizione dei moduli di ATS31 all'interno dell'accumulo

Tale configurazione è stata adottata con un duplice obiettivo: da un lato, massimizzare il numero di moduli inseribili all'interno del volume disponibile; dall'altro, evitare movimenti eccessivi durante il funzionamento dell'impianto, che potrebbero causare urti tra i moduli e le superfici interne del serbatoio, con conseguente rischio di danneggiamento.

Sulla base di tali dati, la massa totale netta di materiale inserita all'interno dell'accumulo risulta pari a:

$$m_{\text{PCM,tot}} = 200 \times 0,230 = 46,0 \text{ kg}$$

Parallelamente, la massa complessiva degli involucri dei moduli è pari a:

$$m_{\text{tara,tot}} = 200 \times 0,040 = 8,0 \text{ kg}$$

Ne consegue che la massa totale dei moduli macro-incapsulati introdotti nel serbatoio è pari a 54,0 kg. Facendo riferimento alla sola massa di PCM, è possibile valutare la frazione di riempimento in massa dell'accumulo, definita come il rapporto tra la massa totale di materiale e il volume nominale del serbatoio. Tale grandezza risulta pari a:

$$\frac{46,0}{146} = 0,315 \rightarrow 31,5\%$$

Dal punto di vista volumetrico, considerando il volume esterno dei moduli, il volume complessivamente occupato all'interno dell'accumulo risulta:

$$V_{\text{tot}} = 200 \times 0,222 = 44,4 \text{ l}$$

Da cui si ricava una frazione di riempimento volumetrica pari a:

$$\frac{44,4}{146} = 0,304 \rightarrow 30,4\%$$

I risultati ottenuti evidenziano come circa il 30% del volume totale dell'accumulo sia effettivamente occupato dai moduli PCM macro-incapsulati, mentre la restante parte sia disponibile per il fluido termovettore, che svolge un ruolo fondamentale nello scambio termico con il materiale a cambiamento di fase. Tale configurazione rappresenta un compromesso tra la massimizzazione della quantità di materiale a cambiamento di fase immagazzinato e la necessità di mantenere sufficienti spazi per la circolazione del fluido, condizione essenziale per assicurare buone prestazioni termiche del sistema.

4.2 Strumenti per la misura e acquisizione delle temperature

4.2.1 Sensori RTD a 4 fili

Per il monitoraggio delle temperature durante le prove sperimentali sono stati impiegati sensori di tipo RTD a quattro fili, basati su elementi in platino (Pt100), prodotti dall'azienda Tersid. Il principio di funzionamento di questi sensori si fonda sulla variazione della resistenza elettrica del platino al variare della temperatura. Tale variazione viene rilevata da un sistema di acquisizione e convertita in un valore di temperatura attraverso opportune relazioni di calibrazione. I sensori utilizzati sono dotati di una protezione meccanica (corazzatura), che li rende più resistenti alle sollecitazioni esterne. Sebbene questa soluzione comporti un leggero peggioramento della precisione e un aumento del tempo di risposta, garantisce una maggiore

robustezza, risultando particolarmente adatta in un contesto sperimentale in cui i sensori vengono frequentemente inseriti, rimossi e riposizionati. È importante ricordare che, alla temperatura di riferimento di 0 °C, un sensore Pt100 presenta una resistenza nominale pari a 100 Ω, caratteristica da cui deriva la denominazione stessa del dispositivo. Il coefficiente che descrive la variazione della resistenza elettrica del sensore in funzione della temperatura è pari a 0,385 Ω/°C nel range compreso tra 0 °C e 100 °C. I sensori utilizzati appartengono alla classe di precisione A, secondo quanto stabilito dalla normativa EN 60751. Ciò implica una tolleranza sulla misura esprimibile come: $\pm (0,15 + 0,002 \cdot |T|)$ °C.



Figura 56. RTD a 4 fili “Pt100” della Tersid

4.2.2 Sistema di acquisizione Agilent

Per la raccolta e la memorizzazione dei dati sperimentali è stato impiegato il sistema di acquisizione Agilent 34970A (Figura 57), prodotto da Keysight Technologies [24].



Figura 57. Sistema di acquisizione Agilent 34970A

Questo strumento si distingue per la sua versatilità, in quanto è in grado di interfacciarsi con diverse tipologie di sensori, tra cui RTD, termocoppie e altri dispositivi di misura, consentendo anche la rilevazione di grandezze elettriche quali tensione, corrente, frequenza e periodo.

Le principali caratteristiche del sistema possono essere riassunte nei seguenti punti:

- Multimetro digitale integrato con risoluzione di 6½ cifre;
- Possibilità di effettuare misure a basse temperature grazie alla presenza di un giunto di riferimento interno per le termocoppie;
- Funzioni interne di linearizzazione per termocoppie, termoresistenze e RTD, conformi allo standard ITS-90;
- Compensazione automatica dell'offset per misure con configurazione a quattro fili (RTD);
- Memoria non volatile in grado di memorizzare fino a 50.000 campioni, permettendo l'utilizzo del sistema anche in modalità autonoma (stand-alone).

Il dispositivo è dotato di un'interfaccia frontale con display e comandi che consentono la configurazione manuale delle misure senza l'ausilio di un computer. Sul lato posteriore sono presenti tre slot per l'alloggiamento delle schede di acquisizione, ciascuna delle quali può gestire un numero di canali compreso tra 12 e 40. Complessivamente, il sistema può arrivare a monitorare fino a 120 canali indipendenti, configurabili singolarmente anche per sensori di diversa tipologia.

Per quanto riguarda il salvataggio dei dati acquisiti, il sistema consente due modalità operative: è possibile registrare direttamente i dati su un dispositivo USB collegato allo strumento, oppure effettuare l'acquisizione tramite computer, utilizzando software dedicati che permettono anche il controllo remoto dei canali di misura. Nel caso in esame, è stato utilizzato il software LabVIEW [25], che consente sia la gestione dell'acquisizione sia il monitoraggio in tempo reale delle grandezze misurate. Le interfacce sviluppate per questa applicazione sono riportate nelle Figure 58 e 59.

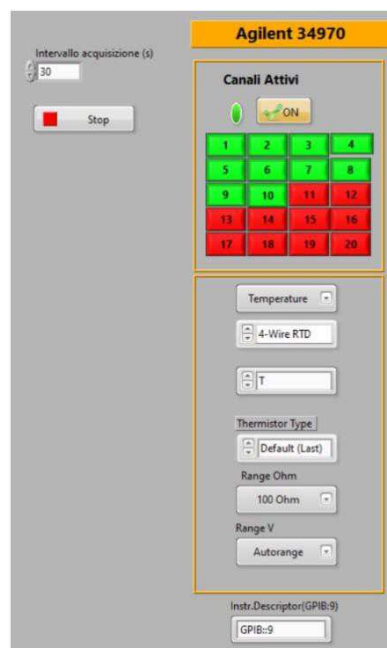


Figura 58. Schermata 'Setting' LabVIEW

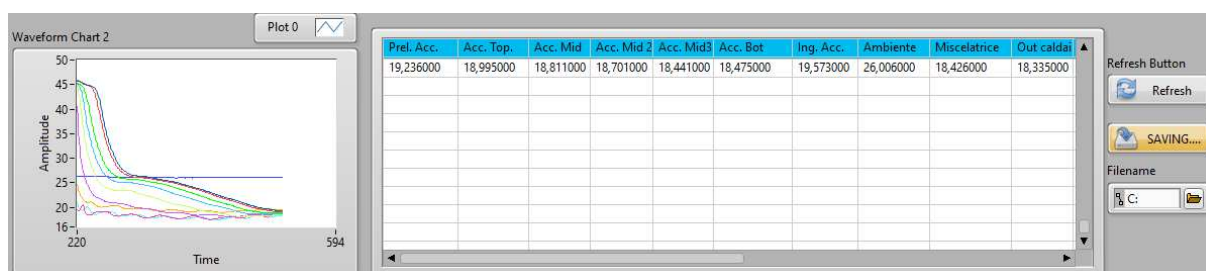


Figura 59. Schermata 'Measure' LabVIEW

La schermata mostrata in Figura 58, denominata “*Setting*”, è dedicata alla configurazione dei canali di acquisizione. Nella parte superiore è presente un pannello numerato che consente di attivare o disattivare i singoli canali: quelli evidenziati in verde rappresentano i canali attivi, che nel caso specifico sono dieci, corrispondenti ai sensori effettivamente utilizzati durante le prove. Attraverso i menu a tendina è possibile selezionare la tipologia di sensore (in questo caso RTD a quattro fili) e impostare i parametri caratteristici, come il valore di resistenza a 0 °C (100 Ω per i sensori Pt100). Nella sezione in alto a sinistra viene invece definito il periodo di acquisizione dei dati, che nelle prove sperimentali è stato fissato a 30 secondi. La Figura 59 mostra invece la schermata denominata “*Measure*”, che permette di visualizzare in tempo reale sia i valori numerici delle temperature acquisite, sia la loro evoluzione nel tempo tramite rappresentazioni grafiche. I dati acquisiti vengono successivamente salvati in un file di testo. Il percorso del file è indicato nel campo “*Filename*”, mentre l’operazione di salvataggio viene

avviata manualmente tramite il comando “Save”. Infine, in Figura 60 è riportato un esempio di file di output generato dal sistema. Il file è strutturato in undici colonne: le prime dieci contengono le temperature misurate dai sensori, mentre l’ultima colonna riporta le informazioni temporali, ovvero data e ora di acquisizione.

39,498000	40,005000	39,647000	39,620000	39,171000	39,072000	38,468000	19,633000	23,718000	25,846000	26/01/2026 13:10
39,521000	39,987000	39,624000	39,572000	39,132000	39,026000	38,412000	19,637000	22,986000	24,914000	26/01/2026 13:10
39,707000	39,957000	39,610000	39,531000	39,094000	38,984000	37,895000	19,643000	22,759000	24,632000	26/01/2026 13:11
39,819000	39,980000	39,580000	39,488000	39,049000	38,941000	34,879000	19,637000	22,771000	24,529000	26/01/2026 13:11
39,909000	39,952000	39,549000	39,437000	38,996000	38,874000	31,801000	19,621000	22,806000	24,392000	26/01/2026 13:12
39,940000	39,958000	39,492000	39,381000	38,940000	38,796000	29,476000	19,606000	22,989000	24,157000	26/01/2026 13:12
39,961000	39,949000	39,433000	39,320000	38,881000	38,716000	27,942000	19,604000	23,000000	23,857000	26/01/2026 13:13
39,961000	39,953000	39,379000	39,251000	38,820000	38,643000	26,985000	19,596000	22,776000	23,592000	26/01/2026 13:13
39,957000	39,919000	39,324000	39,190000	38,767000	38,514000	26,357000	19,586000	22,681000	23,404000	26/01/2026 13:14
39,932000	39,885000	39,257000	39,127000	38,707000	38,252000	25,876000	19,598000	23,152000	23,301000	26/01/2026 13:14
39,906000	39,845000	39,199000	39,068000	38,647000	37,786000	25,449000	19,620000	24,113000	23,249000	26/01/2026 13:15
39,884000	39,803000	39,142000	39,006000	38,581000	37,060000	25,056000	19,611000	24,652000	23,179000	26/01/2026 13:15
39,841000	39,771000	39,085000	38,943000	38,510000	36,110000	24,703000	19,609000	24,412000	23,103000	26/01/2026 13:16
39,800000	39,708000	39,013000	38,862000	38,430000	35,056000	24,146000	19,591000	24,147000	23,129000	26/01/2026 13:16
39,751000	39,641000	38,953000	38,818000	38,340000	33,998000	24,211000	19,603000	24,052000	23,321000	26/01/2026 13:17
39,712000	39,560000	38,898000	38,760000	38,238000	33,063000	24,081000	19,629000	24,282000	23,575000	26/01/2026 13:17
39,684000	39,486000	38,835000	38,705000	38,129000	32,283000	24,003000	19,641000	24,929000	23,758000	26/01/2026 13:18
39,652000	39,465000	38,789000	38,654000	38,008000	31,640000	23,939000	19,642000	25,552000	23,906000	26/01/2026 13:18
39,614000	39,388000	38,741000	38,603000	37,869000	31,099000	23,879000	19,658000	25,856000	24,006000	26/01/2026 13:19
39,576000	39,341000	38,694000	38,553000	37,715000	30,648000	23,819000	19,648000	25,801000	24,065000	26/01/2026 13:19
39,541000	39,276000	38,642000	38,499000	37,534000	30,268000	23,762000	19,661000	25,361000	24,102000	26/01/2026 13:20
39,511000	39,223000	38,602000	38,443000	37,323000	29,949000	23,709000	19,665000	24,910000	24,127000	26/01/2026 13:20
39,481000	39,181000	38,578000	38,387000	37,090000	29,678000	23,673000	19,652000	24,630000	24,137000	26/01/2026 13:21
39,447000	39,130000	38,539000	38,328000	36,830000	29,452000	23,658000	19,656000	24,314000	24,144000	26/01/2026 13:21
39,419000	39,091000	38,502000	38,263000	36,549000	29,256000	23,671000	19,631000	24,014000	24,215000	26/01/2026 13:22
39,368000	39,053000	38,472000	38,195000	36,249000	29,086000	23,709000	19,610000	23,910000	24,331000	26/01/2026 13:22
39,328000	39,017000	38,418000	38,117000	35,939000	28,931000	23,765000	19,598000	24,086000	24,412000	26/01/2026 13:23
39,285000	38,982000	38,381000	38,032000	35,619000	28,785000	23,837000	19,604000	24,397000	24,478000	26/01/2026 13:23
39,251000	38,946000	38,344000	37,938000	35,307000	28,655000	23,910000	19,597000	24,776000	24,514000	26/01/2026 13:24
39,205000	38,926000	38,281000	37,833000	34,996000	28,528000	23,977000	19,581000	24,953000	24,537000	26/01/2026 13:24
39,173000	38,882000	38,242000	37,714000	34,696000	28,412000	24,044000	19,557000	24,858000	24,557000	26/01/2026 13:25
39,129000	38,857000	38,180000	37,584000	34,411000	28,297000	24,098000	19,542000	24,695000	24,553000	26/01/2026 13:25

Figura 60. Esempio di file di output dell’applicativo LabVIEW per l’Agilent

4.2.3 Posizionamento dei sensori

L’impianto sperimentale è dotato di appositi pozzetti per l’alloggiamento dei sensori di temperatura (Figura 61), installati sia lungo la superficie laterale del serbatoio di accumulo sia lungo le tubazioni del circuito idraulico.



Figura 61. Pozzetto per inserire il sensore di temperatura

All’interno di questi pozzetti, i sensori non sono immersi in aria, bensì in acqua. Questa scelta progettuale consente di migliorare significativamente lo scambio termico tra sensore e fluido, aumentando così l’accuratezza della misura. Infatti, la conducibilità termica dell’acqua è

sensibilmente superiore rispetto a quella dell'aria, permettendo una risposta più rappresentativa delle condizioni reali del sistema.

Nel corso delle prove sperimentali sono stati impiegati complessivamente 10 sensori di temperatura, tutti collegati al sistema di acquisizione Agilent 34970A. Tra questi, uno è stato dedicato esclusivamente alla misura della temperatura ambiente del laboratorio.

Sebbene questo parametro non venga utilizzato direttamente nell'analisi delle prestazioni dell'impianto, esso risulta utile come riferimento per verificare che le condizioni ambientali esterne siano comparabili tra le diverse prove. Ciò consente di garantire maggiore coerenza e affidabilità ai dati raccolti.

Dei restanti nove sensori, tre sono stati installati lungo il circuito idraulico esterno (circuito a parete), mentre gli altri sette sono stati collocati all'interno dell'accumulo e all'ingresso e all'uscita di esso.

Come illustrato in Figura 62, i sensori posizionati sul circuito a parete svolgono funzioni specifiche:

- Sensore "Out caldaia": installato in corrispondenza dell'uscita della caldaia, consente di monitorare la temperatura dell'acqua durante la fase di carica dell'accumulo. Questo parametro è fondamentale per regolare correttamente la potenza della caldaia e assicurare il raggiungimento e il mantenimento del setpoint desiderato;
- Sensore "Rientro mix": installato a valle della valvola miscelatrice a tre vie C3 (Figura 29), consente di monitorare la temperatura del fluido che entra nel serbatoio durante la fase di scarica. In questa fase operativa è fondamentale mantenere costante la temperatura di ingresso all'accumulo, ottenuta miscelando il fluido caldo di ritorno con acqua fredda a circa 14 °C proveniente dall'accumulo freddo presente nell'apparato sperimentale.
- Sensore "T_ambiente": installato in prossimità del banco prova, è stato utilizzato per monitorare le condizioni termiche dell'ambiente circostante durante l'esecuzione delle prove sperimentali. La misura della temperatura ambiente ci permette di verificare l'eventuale influenza delle condizioni esterne sul comportamento dell'accumulo. Sebbene tale grandezza non intervenga direttamente nel controllo del sistema, la sua

acquisizione risulta utile per garantire una corretta interpretazione dei risultati ottenuti.

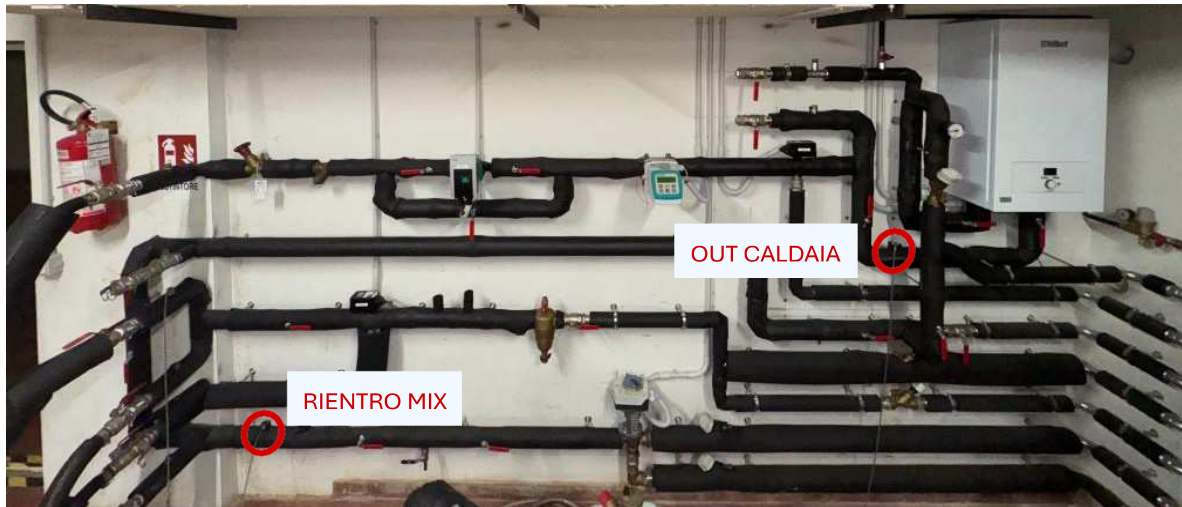


Figura 62. Posizionamento dei 2 sensori di temperatura sul circuito a parete

I restanti sette sensori, rappresentati nello schema dell'accumulo in Figura 63, sono distribuiti come segue:

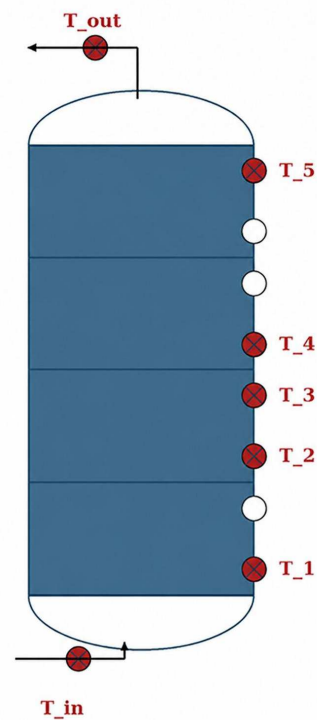
- Sensore ' T_{In} ': misura la temperatura del fluido immediatamente prima dell'ingresso nel serbatoio. Questo valore è utile per confrontare la temperatura impostata con quella effettiva, consentendo di valutare la correttezza della regolazione della valvola miscelatrice a tre vie C3;
- Sensore ' T_{Out} ': rileva la temperatura del fluido in uscita dall'accumulo. Questo parametro è particolarmente importante poiché la conclusione della prova viene definita quando la temperatura in uscita raggiunge quella in ingresso;
- Sensori ' T_1 ', ' T_2 ', ' T_3 ', ' T_4 ' e ' T_5 ': cinque sonde sono state posizionate lungo la superficie laterale del serbatoio a diverse altezze dalla base.

Questi sensori hanno il compito di monitorare l'andamento della temperatura all'interno del serbatoio di accumulo, consentendo di:

- Analizzare il grado di stratificazione termica durante le diverse fasi operative;
- Valutare gli effetti del cambiamento di fase del PCM sulla temperatura del fluido termovettore, ovvero l'acqua, nella configurazione di accumulo latente (LTES).



a)



b)

Figura 63. Immagine reale dell'accumulo termico (a) e schematizzazione dell'accumulo con la posizione dei 7 sensori di temperatura (b)

4.3 Svolgimento delle prove e applicativo LABVIEW

4.3.1 Applicativo LABVIEW e moduli National Instruments

Per rendere più efficiente la gestione dell'apparato sperimentale è stato sviluppato un applicativo dedicato mediante il software LabVIEW. Come evidenziato nei capitoli precedenti, il circuito analizzato presenta una certa complessità e richiede il monitoraggio simultaneo di diverse grandezze operative, tra cui in particolare la portata e la temperatura in più punti del sistema. Il controllo accurato di questi parametri è fondamentale per garantire il corretto svolgimento delle prove e la qualità dei risultati ottenuti.

Nella configurazione iniziale, precedente a questo elaborato di tesi, l'interazione con i componenti dell'impianto avveniva esclusivamente in modo manuale. Ciò comportava la necessità di un monitoraggio continuo da parte dell'operatore e frequenti interventi diretti per modificare le condizioni operative. Per superare queste limitazioni, è stato sviluppato un applicativo in ambiente LabVIEW con l'obiettivo di centralizzare e semplificare la gestione del

sistema, migliorare la precisione nella regolazione dei parametri e ridurre al minimo gli interventi manuali sull'impianto.

L'applicativo realizzato consente un controllo remoto parziale dell'impianto. Pur non trattandosi di un sistema completamente automatizzato, molte operazioni possono essere gestite direttamente da interfaccia software. In particolare:

- è possibile comandare da PC le valvole C1 e C2 (a tre vie ON/OFF) e la valvola miscelatrice C3;
- è possibile acquisire in tempo reale i dati provenienti dal misuratore di portata, visualizzandoli direttamente a schermo.

Questa soluzione ha permesso di migliorare significativamente la gestione delle prove sperimentali, aumentando il livello di controllo e riducendo la possibilità di errori operativi.

Al fine di inquadrare meglio il ruolo del software all'interno del presente lavoro, si riporta di seguito una breve descrizione del funzionamento e della struttura di LabVIEW.

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) è un ambiente di sviluppo grafico realizzato da National Instruments, progettato per applicazioni di acquisizione dati, controllo strumentale e automazione di test. A differenza dei linguaggi di programmazione tradizionali, basati su codice testuale, LabVIEW utilizza il linguaggio grafico G, nel quale la logica del programma viene costruita attraverso diagrammi a blocchi e collegamenti tra nodi funzionali tramite linee di flusso, denominate *wire*. L'architettura di un programma LabVIEW si basa principalmente su due componenti fondamentali:

- Front Panel: rappresenta l'interfaccia utente grafica, attraverso la quale è possibile inserire comandi, visualizzare dati e monitorare in tempo reale l'andamento delle variabili;
- Block Diagram: costituisce il cuore logico dell'applicazione, contenente i nodi funzionali, le strutture di controllo e il flusso dei dati.

Per rendere operativo il sistema sviluppato, sono stati utilizzati tre moduli hardware della National Instruments: NI-9264, NI-9208 e NI-9482, tutti installati all'interno dello chassis cDAQ-9185. Lo chassis rappresenta l'elemento centrale del sistema, fungendo da interfaccia tra i moduli di acquisizione e il computer tramite connessione Ethernet ad alta velocità. Esso è

in grado di ospitare fino a quattro moduli e consente una gestione sincronizzata e precisa dei segnali, grazie al supporto per funzionalità avanzate di temporizzazione.

Nel dettaglio:

- il modulo NI-9264 è utilizzato per la generazione di segnali analogici in tensione, impiegati nel controllo della valvola miscelatrice a tre vie;
- il modulo NI-9208 acquisisce segnali in corrente provenienti da sensori analogici, come ad esempio il misuratore di portata;
- il modulo NI-9482, dotato di relè elettromeccanici, viene utilizzato per la gestione di segnali digitali ON/OFF, come nel caso dell'attivazione delle valvole ausiliarie.

Prima della messa in esercizio del sistema è stata necessaria una fase preliminare di configurazione tramite il software NI-MAX, che consente il riconoscimento automatico dei dispositivi e la verifica del loro corretto funzionamento. Come illustrato in figura 64, i moduli sono stati installati negli slot dello chassis secondo la seguente disposizione: slot 1 per il NI-9264, slot 2 per il NI-9208 e slot 3 per il NI-9482.

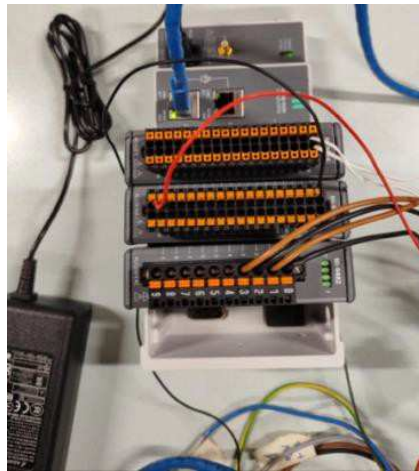


Figura 64. Collegamento dei moduli National Instruments al chassis

Una volta definita e implementata la configurazione hardware, si è proceduto allo sviluppo dei singoli blocchi funzionali all'interno dell'ambiente LabVIEW, ciascuno progettato per il controllo o l'acquisizione di uno specifico componente dell'impianto. Considerato che l'obiettivo principale del presente lavoro non è l'analisi approfondita del linguaggio LabVIEW né degli aspetti di programmazione, si è scelto di non entrare nel dettaglio del codice sorgente o delle logiche implementative. Al contrario, si è ritenuto più utile fornire una rappresentazione complessiva dell'applicativo sviluppato. A tal fine, in Figura 65 è mostrato il

block diagram completo del programma, che evidenzia l'interconnessione tra i diversi moduli funzionali, mentre in Figura 67 viene presentata l'interfaccia utente finale (front panel), attraverso la quale è possibile gestire e monitorare il sistema.

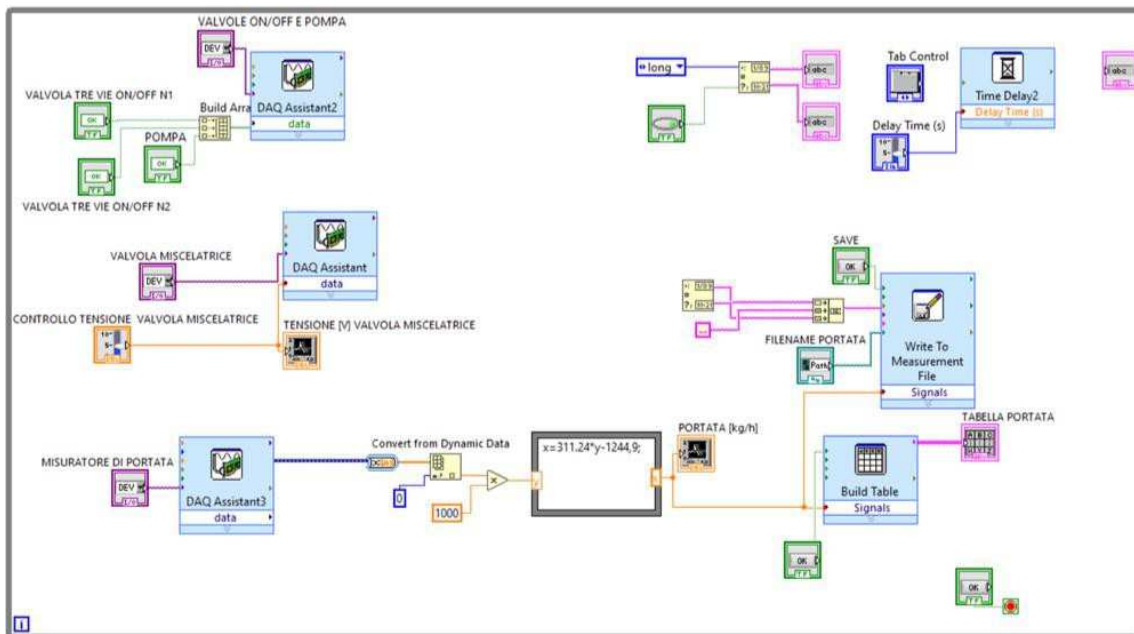


Figura 65. Block Diagram dell'applicativo completo

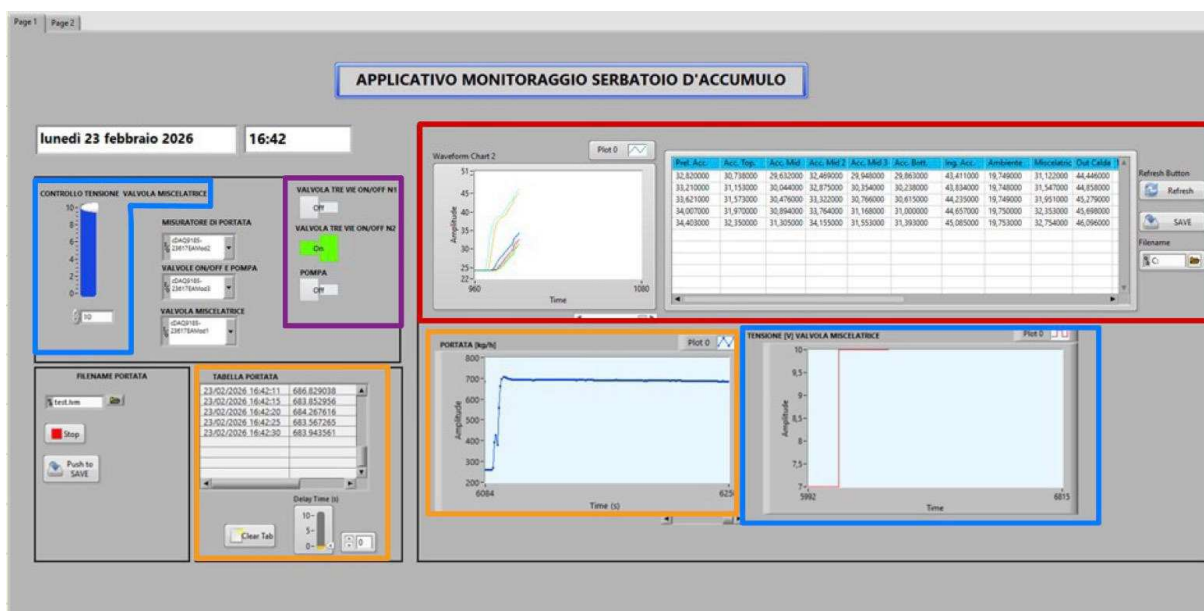


Figura 66. Front Panel dell'applicativo completo

Nel Front Panel dell'applicativo sono state evidenziate, mediante riquadri colorati, le principali aree funzionali del programma, ciascuna associata a una specifica operazione di controllo o acquisizione:

- Riquadro rosso: identifica la sezione dedicata all'acquisizione delle temperature rilevate dai sensori, i cui dati vengono raccolti tramite il sistema Agilent descritto in precedenza;
- Riquadro arancione: rappresenta l'area relativa alla misura della portata. In particolare, il riquadro numerico mostra i valori aggiornati con frequenza di 5 secondi, mentre il grafico adiacente ne visualizza l'andamento temporale;
- Riquadro blu: è associato al controllo della tensione applicata alla valvola miscelatrice a tre vie C3, includendo anche la rappresentazione grafica del segnale inviato;
- Riquadro viola: comprende i comandi digitali per l'attivazione e la disattivazione (ON/OFF) delle due valvole a tre vie C1 e C2.

Al di sotto del riquadro viola è inoltre presente un ulteriore comando virtuale, attualmente non utilizzato, predisposto per un possibile sviluppo futuro. Esso potrà essere impiegato per il controllo della pompa di circolazione, che allo stato attuale viene invece attivata manualmente direttamente sull'impianto.

4.3.2 Fasi di svolgimento delle prove

Ciascuna prova sperimentale è stata condotta seguendo una procedura articolata in tre fasi principali: fase di carica, fase di regolazione e fase di scarica. La maggior parte delle operazioni è stata eseguita attraverso l'interfaccia sviluppata in LabVIEW, i cui screenshot rappresentativi sono riportati nelle Figure 67, 68 e 69.

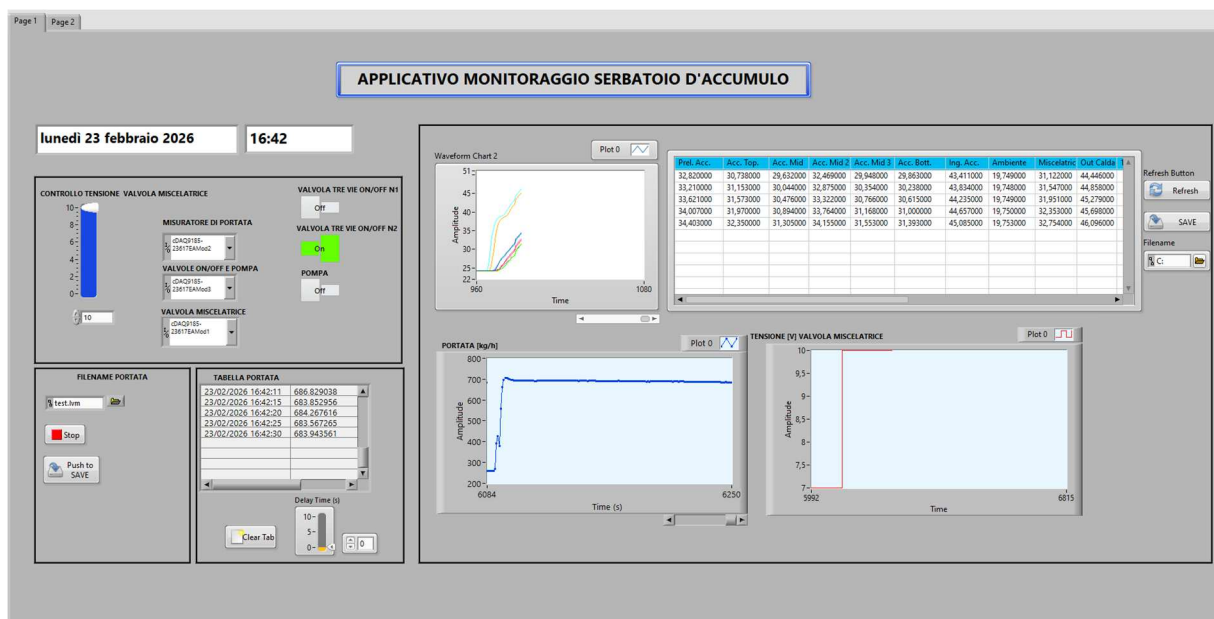


Figura 67. Screenshot del setting dell'applicativo LabVIEW durante la fase di carica

Durante la fase di carica (Figura 67), l'obiettivo è quello di portare l'acqua contenuta nel serbatoio di accumulo alla temperatura desiderata per la prova. A tal fine, viene attivata la valvola C1 (segnale ON), consentendo il flusso dell'acqua verso la pompa, mentre la valvola miscelatrice viene regolata tramite l'impostazione di un segnale di tensione pari a 10 V in modo da escludere il contributo del ramo proveniente dall'accumulo freddo. Successivamente, si procede con l'avviamento della caldaia, impostando il valore di temperatura desiderato (setpoint). In questa fase la portata non rappresenta un parametro critico ai fini dell'analisi sperimentale; pertanto, per ridurre i tempi complessivi, la pompa viene fatta operare alla massima velocità, garantendo una portata indicativa compresa tra 600 e 650 kg/h. Una volta raggiunta la temperatura target all'interno del serbatoio di accumulo, la caldaia viene spenta e si passa alla fase successiva.

Nella fase di regolazione (Figura 68), si procede innanzitutto all'isolamento dell'accumulo mediante l'apertura della valvola C2 (segnale ON). In questa configurazione, l'acqua proveniente dall'accumulo freddo viene miscelata con quella calda circolante nel circuito a parete attraverso la valvola miscelatrice C3. L'obiettivo principale di questa fase è stabilizzare la temperatura del fluido in ingresso all'accumulo al valore desiderato. La regolazione avviene intervenendo sul segnale di tensione applicato alla valvola C3, che modula l'apertura della valvola e quindi il passaggio di acqua proveniente dall'accumulo caldo e dall'accumulo freddo fino al raggiungimento della temperatura impostata. Un aspetto rilevante riguarda le prove

condotte sull'accumulo con materiale a cambiamento di fase (PCM). In questo caso, prima di avviare la fase di regolazione, è necessario attendere la completa fusione del materiale, così da garantire un corretto sfruttamento della capacità di accumulo latente.

A tale scopo sono stati eseguiti test preliminari in bagno termostatico, partendo da una temperatura iniziale di circa 25 °C, rappresentativa delle condizioni iniziali dell'acqua nel serbatoio. Dai risultati si è stimato che, con una temperatura di carica pari a 44 °C, il tempo necessario per la completa fusione è di circa 1.45h, mentre a 39 °C tale tempo diminuisce fino a circa 1.30h.

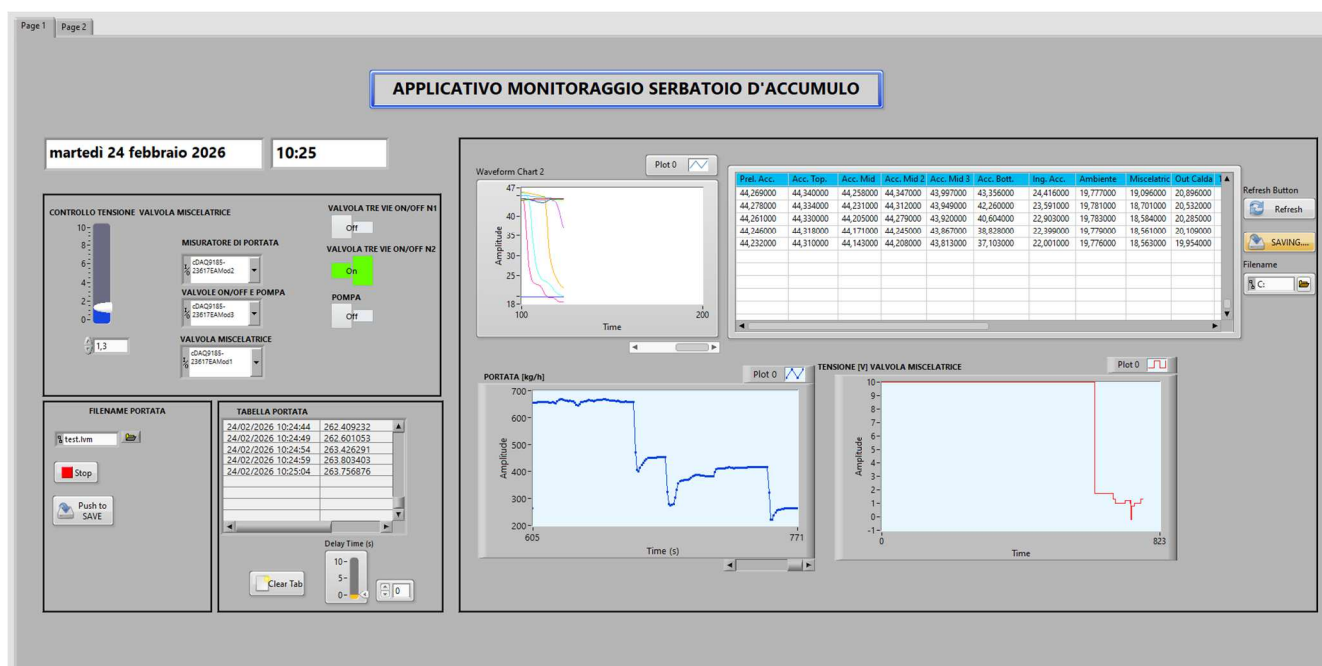


Figura 68. Screenshot del setting dell'applicativo LabVIEW durante la fase di regolazione

Una volta raggiunta e mantenuta stabile la temperatura desiderata all'ingresso dell'accumulo, si passa alla fase di scarica (Figura 69). In questa fase viene inizialmente creato il file di output destinato a contenere i dati di temperatura acquisiti e viene avviata la procedura di salvataggio sull'applicativo. Successivamente, si interviene sulla valvola di bilanciamento per impostare la portata in massa dell'acqua al valore desiderato nella specifica prova sperimentale. Una volta stabilizzata la portata, si ripristina il collegamento con il serbatoio di accumulo chiudendo la valvola C2 (segnale OFF). Con questa operazione ha inizio la prova vera e propria. È importante evidenziare che, al momento della riapertura del collegamento con l'accumulo, la portata subisce una variazione, rendendo necessaria una nuova regolazione tramite la valvola di

bilanciamento. Durante l'intera durata della prova è fondamentale mantenere sotto controllo la temperatura del fluido di trasferimento del calore in ingresso all'accumulo. Tale controllo viene effettuato indirettamente monitorando la temperatura rilevata dal sensore "rientro mix", posizionato a valle della valvola miscelatrice C3. Per garantire condizioni operative stabili, è necessario regolare in modo dinamico l'apertura della valvola C3. Questo perché la stabilità termica del sistema è influenzata principalmente da due fenomeni:

- Effetto transitorio iniziale: all'apertura del collegamento con l'accumulo, l'acqua calda impiega un certo intervallo di tempo (dipendente dalla portata) per raggiungere la valvola C3. Ciò comporta un temporaneo aumento della temperatura nel ramo caldo in ingresso alla valvola. Per compensare questo effetto, è opportuno adottare inizialmente un'apertura della valvola leggermente maggiore rispetto a quella teoricamente richiesta;
- Progressivo raffreddamento durante la scarica: con il progredire della fase di scarica, la temperatura dell'acqua in uscita dall'accumulo (T_{out}) diminuisce gradualmente. Per contrastare tale variazione e mantenere costante la temperatura in ingresso all'accumulo durante tutta la durata della prova sperimentale è necessario incrementare progressivamente il segnale di tensione applicato alla valvola C3, riducendo il contributo proveniente dall'accumulo freddo. Al termine della prova, il ramo freddo risulta completamente escluso, corrispondente a un segnale pari a 10 V.

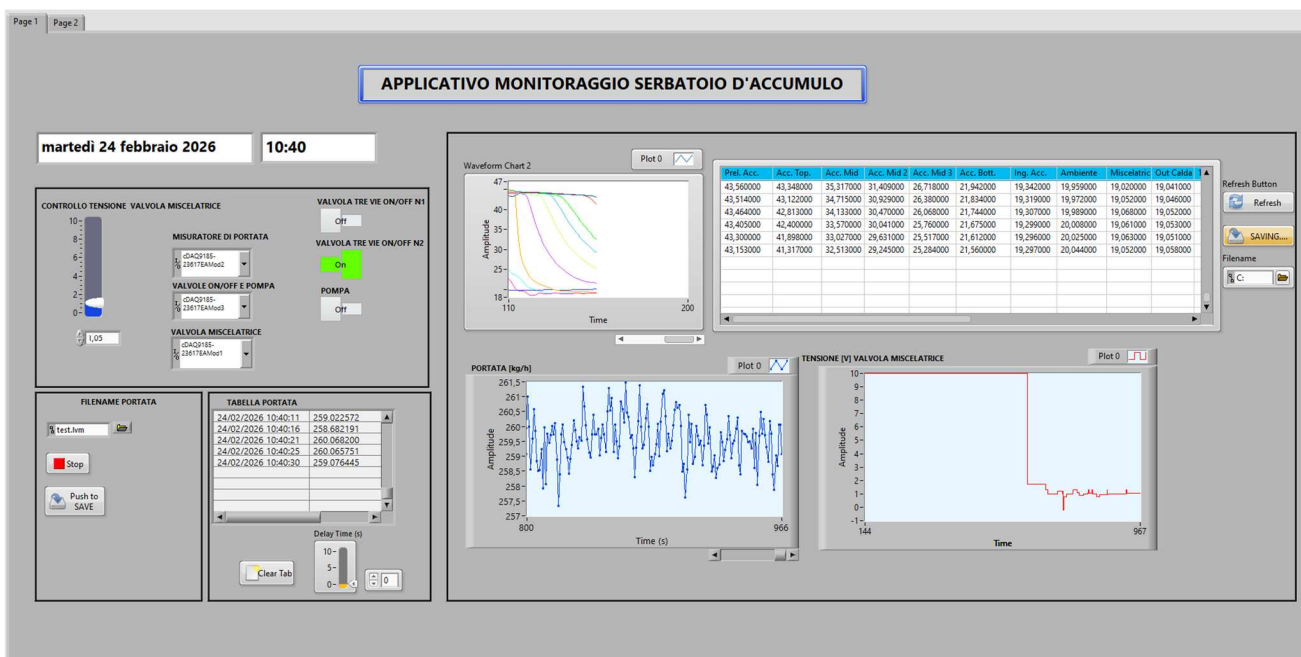


Figura 69. Screenshot del setting dell'applicativo LabVIEW durante la fase di scarica

È opportuno evidenziare che, nelle fasi iniziali della prova, immediatamente successive all'apertura della valvola C2, le temperature rilevate dalle sonde T_{out} (uscita accumulo) e T_{in} (ingresso accumulo) possono non rappresentare fedelmente le condizioni reali del sistema. Questo comportamento è dovuto al fatto che, durante la fase di regolazione precedente, l'accumulo risulta isolato e i tratti di tubazione in cui sono installate le sonde non sono attraversati dal flusso. Di conseguenza, al momento della riattivazione del circuito, si verifica un periodo transitorio iniziale, la cui durata dipende dalla portata di acqua circolante nella specifica prova, durante il quale le misure non riflettono ancora lo stato termico effettivo dell'impianto. Sebbene la prova venga formalmente avviata in questo istante, tale intervallo iniziale non viene considerato valido ai fini dell'analisi energetica; pertanto, esso viene escluso dal tempo utile della prova.

Un ulteriore aspetto da considerare riguarda le dispersioni termiche lungo il circuito. In condizioni di portata ridotta, il fluido impiega più tempo a raggiungere l'ingresso dell'accumulo, aumentando le dissipazioni lungo il percorso. Questo comporta la necessità di mantenere un valore più elevato della temperatura misurata al sensore "Miscelatrice", al fine di garantire che la temperatura effettiva in ingresso all'accumulo sia quella desiderata.

La prova sperimentale di scarica si considera conclusa nel momento in cui la temperatura dell'acqua misurata dai sensori posti in tutti i punti interni al serbatoio di accumulo e in uscita da esso eguaglia la temperatura dell'acqua in ingresso. In tale condizione, infatti, non è più possibile estrarre ulteriore energia utile dal sistema di accumulo. Al termine delle prove, i dati acquisiti vengono esportati in formato Excel e successivamente utilizzati per le elaborazioni e le analisi dei risultati.

5. RISULTATI DELLE PROVE

In questo capitolo vengono presentati e discussi i risultati ottenuti nel corso delle prove sperimentali. Dopo una prima descrizione delle condizioni operative adottate, vengono presentati gli andamenti delle grandezze misurate e successivamente confrontate le prestazioni del sistema nelle configurazioni con e senza materiale a cambiamento di fase (PCM). L'analisi è finalizzata a mettere in evidenza il contributo del PCM in termini di capacità di accumulo e comportamento termico del sistema. Il capitolo si conclude con una sintesi dei principali risultati emersi.

5.1 Svolgimento delle prove

Le prove sperimentali sono state organizzate in due set distinti, ciascuno caratterizzato da una diversa temperatura iniziale dell'accumulo e da una differente temperatura del fluido in ingresso:

- Il primo set di prove è stato condotto con temperatura iniziale dell'accumulo, T_0 , pari a 44 °C e temperatura di ingresso, T_{in} , di 19 °C;
- Il secondo set di prove è stato condotto con temperatura iniziale dell'accumulo, T_0 , pari a 39 °C e temperatura di ingresso, T_{in} , di 24 °C.

La scelta di queste condizioni operative è strettamente legata alle caratteristiche del materiale a cambiamento di fase utilizzato (ATS31). In particolare, le temperature sono state selezionate in modo da far lavorare il PCM in prossimità dell'intervallo di transizione di fase, così da sfruttare in maniera efficace il contributo del calore latente. Come indicato nella scheda tecnica del produttore in figura 56, il PCM ATS31 presenta un intervallo di fusione tra 32-34 °C e un intervallo di solidificazione tra 29-32 °C. Il valore della temperatura iniziale dell'accumulo T_0 è stato definito come la somma del valore superiore dell'intervallo di cambiamento di fase (fusione) del PCM, ovvero 34 °C, e un valore costante ΔT . In egual maniera, il valore della temperatura di ingresso T_{in} è stato definito come la differenza tra il valore inferiore dell'intervallo di cambiamento di fase (solidificazione) del PCM, ovvero 29 °C, e lo stesso valore costante ΔT . Per le simulazioni effettuate sono stati considerati due ΔT diversi per valutare l'influenza della temperatura dell'HTF sulle prestazioni del sistema di accumulo. Sulla base di questi due valori costanti di ΔT , ovvero 5 °C e 10 °C, si distinguono i due set di prove:

- SET 1: con $\Delta T = 10^\circ\text{C} \rightarrow T_0 = 44^\circ\text{C}$, $T_{\text{in}} = 19^\circ\text{C}$;
- SET 2: con $\Delta T = 5^\circ\text{C} \rightarrow T_0 = 39^\circ\text{C}$, $T_{\text{in}} = 24^\circ\text{C}$.

Per ciascuna delle condizioni considerate, sono state eseguite più prove variando la portata del fluido termovettore, ovvero l'acqua, al fine di valutare l'influenza della portata stessa sulla dinamica di scarica e sulle prestazioni dell'accumulo. Le portate impostate nelle varie simulazioni sono state: 65 kg/h, 130 kg/h e 260 kg/h. Considerando un volume dell'accumulo completo pari a 146 l, le portate adottate corrispondono rispettivamente a circa: 0.44 vol/h, 0,89 vol/h e 1,78 vol/h.

Per ogni valore di portata sono state effettuate due tipologie di prova:

- una in configurazione di accumulo sensibile, con serbatoio riempito esclusivamente con acqua;
- una in configurazione latente, con l'aggiunta dei moduli di PCM all'interno del serbatoio.

Questo ha permesso di effettuare un confronto diretto tra le due configurazioni, evidenziando il ruolo del PCM nel miglioramento delle prestazioni del sistema di accumulo.

5.2 Primo set di prove $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

Il primo set di prove è stato condotto con una temperatura iniziale dell'accumulo pari a 44°C e una temperatura del fluido termovettore in ingresso pari a 19°C . Questa configurazione consente di analizzare il comportamento del sistema in presenza di un gradiente termico significativo, condizione particolarmente interessante per valutare l'efficacia dello scambio termico e il contributo del materiale a cambiamento di fase.

Durante lo svolgimento delle prove è emersa una delle principali criticità legate al sistema di regolazione della temperatura del fluido in ingresso. Il controllo della temperatura è infatti affidato alla valvola miscelatrice a tre vie C3, il cui funzionamento non risulta perfettamente lineare. In particolare, la regolazione della posizione della valvola (più o meno aperta) non produce un effetto immediato sulla temperatura desiderata rendendo complesso il mantenimento di un valore di ingresso costante. Questo comportamento ha causato inevitabili oscillazioni della temperatura in ingresso del fluido termovettore durante lo svolgimento delle prove.

A questo si aggiunge un ulteriore aspetto legato alla dinamica complessiva dell'impianto. Il sistema è stato progettato per operare a portate più elevate rispetto a quelle utilizzate in queste prove; di conseguenza, qualsiasi intervento sulla valvola C3 si traduce in una variazione delle condizioni operative con un certo ritardo temporale. Tale effetto risulta particolarmente evidente alle portate più basse, dove il tempo di risposta del sistema aumenta e la regolazione diventa meno precisa.

Un'altra criticità, tra le più significative, è stata riscontrata nel comportamento della caldaia utilizzata per il riscaldamento dell'accumulo. In alcune condizioni operative, la caldaia non è stata in grado di mantenere in modo stabile il setpoint impostato, mostrando fenomeni di modulazione non ottimale o, in alcuni casi, spegnimenti anticipati. Questo ha reso più complesso il mantenimento della temperatura iniziale dell'accumulo al valore desiderato, T_0 , soprattutto nelle prove in configurazione LTES, dove è fondamentale garantire condizioni termiche adeguate a consentire il completo cambiamento di fase del PCM.

Ulteriori deviazioni rispetto alle condizioni ideali sono imputabili alle dispersioni termiche verso l'ambiente esterno. L'isolamento del serbatoio, realizzato mediante applicazione manuale di lana di vetro, non risulta perfettamente uniforme e presenta alcune discontinuità (figura 73).



Figura 73. Sistema di accumulo con isolamento in lana di vetro

Questo comporta perdite di calore non trascurabili, che tendono a diventare più evidenti nelle prove di durata maggiore, contribuendo a una riduzione della temperatura dell'accumulo rispetto al valore di riferimento.

Nonostante queste criticità, si è cercato di mantenere le condizioni operative il più possibile controllate, garantendo una buona ripetibilità complessiva delle prove e permettendo un confronto affidabile tra le diverse configurazioni analizzate. Infine, per tutte le prove considerate, la fase di scarica è stata ritenuta conclusa nel momento in cui la temperatura del fluido in uscita dal sistema ha raggiunto circa il valore della temperatura di ingresso. Questo criterio è stato adottato come riferimento per determinare la durata del processo di scarica e consentire il confronto tra le diverse condizioni operative.

Oltre all'analisi degli andamenti di temperatura, per ciascuna prova sono stati determinati alcuni parametri significativi utili al confronto tra le configurazioni di accumulo sensibile (STES) e latente (LTES). In particolare, sono stati valutati l'energia termica erogata durante la fase di scarica e la potenza media fornita dal sistema. Come già evidenziato in precedenza, all'avvio di ogni prova si osserva un breve transitorio iniziale, durante il quale i valori misurati non risultano rappresentativi del comportamento reale del sistema. Questo fenomeno, più evidente alle portate inferiori, è stato escluso dalle elaborazioni, considerando nei calcoli esclusivamente la fase effettiva di scarica. L'energia termica totale erogata è stata determinata integrando nel tempo la potenza termica istantanea. In forma discreta, tale grandezza può essere espressa come:

$$Q_{TOT} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} \times Dt = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m} c_p \Delta T \times Dt \quad (5.1)$$

dove:

- $\dot{Q}$ rappresenta la potenza termica istantanea, espressa in kW;
- $\dot{m}$ è la portata massica del fluido termovettore, espressa in kg/s;
- c_p è il calore specifico dell'acqua, espresso in kJ/(kg·K);
- $\Delta T = (T_{out} - T_{in})$ è la differenza di temperatura tra uscita e ingresso dell'accumulo;
- t_1 e t_2 rappresentano rispettivamente l'inizio e la fine della fase di scarica considerata.

Una volta determinata l'energia totale, è stata calcolata la potenza media associata alla prova, definita come:

$$\dot{Q}_{media} = \frac{Q_{tot}}{t_{prova}} \quad (5.2)$$

dove:

- Q_{tot} è l'energia totale erogata durante la prova, espressa in kJ;
- t_{prova} è la durata effettiva della fase di scarica, espressa in secondi, al netto del transitorio iniziale.

5.2.1 Prove di scarica a 65 kg/h (0,44 vol/h)

Prima dell'avvio di ciascuna prova di scarica, è stata effettuata la fase di carica dell'accumulo fino al raggiungimento della temperatura iniziale T_0 pari a 44 °C. Successivamente, è stata

eseguita una fase di regolazione necessaria a portare la temperatura del fluido in ingresso T_{in} al valore desiderato, pari a 19 °C.

Una volta stabilizzate le condizioni operative, ha avuto inizio la fase di scarica vera e propria, durante la quale sono stati acquisiti i dati di temperatura nei diversi punti dell'accumulo e calcolate le grandezze energetiche descritte in precedenza. Nella configurazione STES è possibile avviare la fase di regolazione immediatamente dopo la carica, mentre nel caso LTES è necessario attendere un intervallo di tempo aggiuntivo affinché il PCM completi il processo di fusione all'interno dei moduli. Questo aspetto è fondamentale, poiché una fusione incompleta comprometterebbe la capacità del sistema di sfruttare il contributo del calore latente durante la fase di scarica. Di seguito, in Figura 74, è riportato il grafico relativo alla prova di scarica del sistema STES con portata di 65 kg/h (0.44 vol/h) e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$.

Mentre in Figura 75 è riportato il grafico relativo alla corrispondente prova di scarica del sistema LTES.

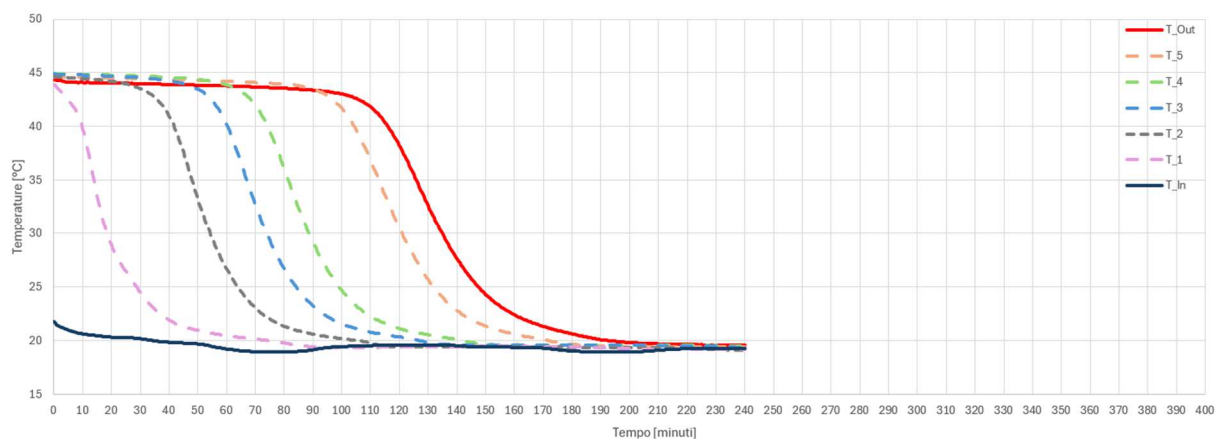


Figura 74. Prova di scarica del sistema STES con portata 65 kg/h (0.44 vol/h) e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

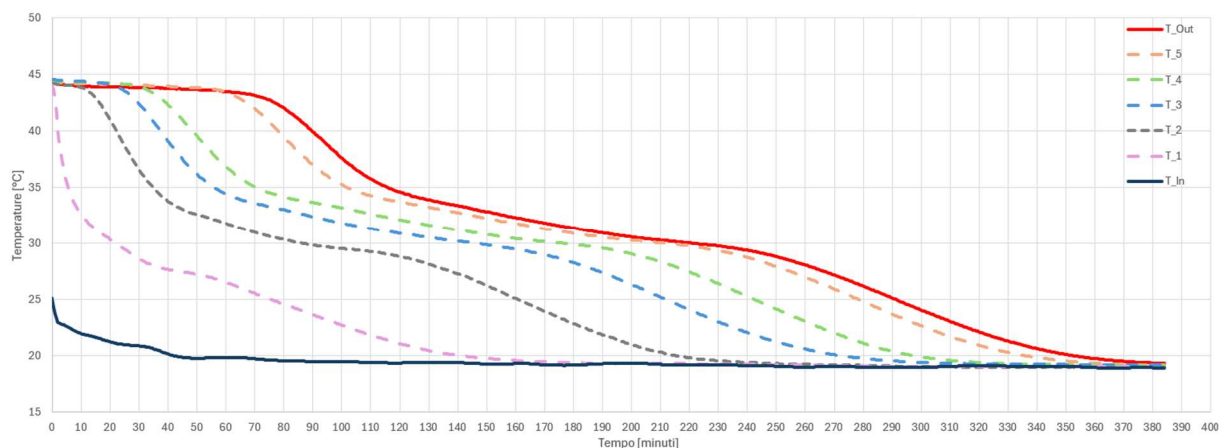


Figura 75. Prova di scarica del sistema LTES con portata 65 kg/h (0.44 vol/h) e $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dal confronto tra le prove di scarica del sistema STES e del sistema LTES con portata pari a 65 kg/h e $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, è possibile evidenziare le principali analogie e differenze tra i due comportamenti:

- si osserva come, in entrambe le configurazioni, l'accumulo presenti una chiara stratificazione termica, evidenziata dal fatto che il calo di temperatura nei vari sensori avviene con un ritardo progressivo lungo l'altezza del serbatoio. In particolare, il primo sensore a registrare la diminuzione della temperatura è quello posto nella parte inferiore dell'accumulo ("T_1"), seguito dai sensori intermedi fino ad arrivare alla temperatura in uscita ("T_Out");
- l'andamento della temperatura in ingresso ("T_in") risulta pressoché analogo in entrambe le prove, mantenendosi su valori simili durante tutta la scarica, a conferma che le condizioni operative imposte sono coerenti tra i due test;
- nella configurazione STES, la temperatura in testa all'accumulo ("T_Out") rimane elevata, intorno ai 44 °C, per un intervallo temporale iniziale più lungo, per poi diminuire in maniera relativamente rapida. Ciò è tipico degli accumuli sensibili, nei quali il raffreddamento avviene in modo continuo e senza contributi energetici aggiuntivi;
- nella prova LTES, invece, la temperatura in testa all'accumulo ("T_Out") si mantiene intorno ai 44 °C per un tempo inferiore rispetto alla prova STES. Questo comportamento è dovuto al fatto che, nel sistema con PCM, una parte significativa del volume interno del serbatoio è occupata dai moduli contenenti ATS 31 e, di conseguenza, la quantità di acqua presente è inferiore rispetto al caso STES. Il tasso di

ricambio dell'acqua all'interno dell'accumulo risulta quindi maggiore e l'acqua inizialmente contenuta nel serbatoio viene sostituita più rapidamente, anticipando il momento in cui iniziano a manifestarsi gli effetti dello scambio termico latente con il PCM;

- un aspetto particolarmente significativo, visibile nei grafici relativi al sistema LTES, è l'appiattimento delle curve di temperatura in un determinato intervallo, che corrisponde al range di cambiamento di fase dell'ATS 31. In questa fase, l'energia viene rilasciata sotto forma di calore latente, mantenendo la temperatura quasi costante e rappresentando uno dei principali vantaggi del sistema LTES rispetto allo STES. Tuttavia, tale effetto non si manifesta in modo uniforme lungo tutto il volume dell'accumulo. Nella parte inferiore ("T_1"), il fluido in ingresso, a circa 19–20 °C, incontra inizialmente un ambiente a temperatura più elevata (circa 44 °C), generando un ΔT molto elevato. Ciò comporta un trasferimento termico intenso, che accelera il raffreddamento locale e induce una solidificazione rapida del PCM; di conseguenza, l'effetto di appiattimento della curva in questa zona risulta meno evidente e di durata più limitata. Man mano che il fluido risale verso le zone superiori dell'accumulo, la differenza di temperatura si riduce e il processo di scambio termico diventa più graduale: in queste condizioni, la solidificazione dell'ATS 31 avviene più lentamente, rendendo più evidente e prolungato l'effetto dell'isoterma associata al rilascio di calore latente, in particolare nei sensori intermedi e superiori;
- si osserva inoltre come, nella configurazione LTES, il raffreddamento dei sensori intermedi avvenga in modo progressivo rispetto al sistema STES. Il contributo del calore latente rilasciato dal PCM riduce la velocità di variazione della temperatura, determinando una propagazione più lenta del fronte termico.;
- infine, la prova LTES evidenzia una maggiore durata complessiva della fase di scarica rispetto allo STES. Infatti, mentre nel sistema sensibile la temperatura in uscita si avvicina più rapidamente a quella di ingresso, nel sistema con PCM il processo risulta più lento e prolungato nel tempo, grazie all'energia aggiuntiva accumulata e rilasciata durante il cambiamento di fase.

In tabella 12 e 13, sono riportati i parametri ricavati dall'analisi dei dati rispettivamente della

prova di scarica del sistema STES e del sistema LTES. In tabella 14, invece, è riportato un riepilogo delle variazioni ottenute grazie all'impiego del PCM rispetto al sistema STES.

Tabella 12. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema STES a 65 kg/h (0.44 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
19,498	246,5	14961,516	4,156	28,466	1011,597	6,929

Tabella 13. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema LTES a 65 kg/h (0.44 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
19,5	387,5	20970,034	5,825	39,897	901,937	6,177

Tabella 14. Parametri energetici ricavati dal confronto tra le prove a 65 kg/h (0.44 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

Variazione della durata [%]	Variazione dell'energia [%]	Variazione della potenza [%]
+57,2%	+40,2%	-10,8%

Questi risultati, sia grafici che analitici, evidenziano chiaramente il contributo positivo dell'ATS 31 in termini di energia erogata e durata della fase di scarica, a fronte di una riduzione della potenza media. In particolare, si osserva un incremento significativo della durata della prova, pari a circa il 57.2%, accompagnato da un aumento dell'energia rilasciata pari a circa il 40.2%. Al contrario, la potenza media subisce una riduzione di circa il 10.8%. Tale comportamento è attribuibile alla presenza del materiale a cambiamento di fase, che, durante la solidificazione, rilascia calore latente contribuendo a prolungare nel tempo il processo di scambio termico. Di conseguenza, pur essendo maggiore la quantità totale di energia erogata rispetto al sistema STES, questa viene distribuita su un intervallo temporale più ampio. Questo comporta un aumento della durata della scarica e di conseguenza una diminuzione della potenza media.

5.2.2 Prove di scarica a 130 kg/h (0,89 vol/h)

Di seguito, in Figura 76, è riportato il grafico relativo alla prova di scarica del sistema STES

con portata di 130 kg/h (0.89 vol/h) e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$. Mentre in Figura 77 è riportato il grafico relativo alla corrispondente prova di scarica del sistema LTES.

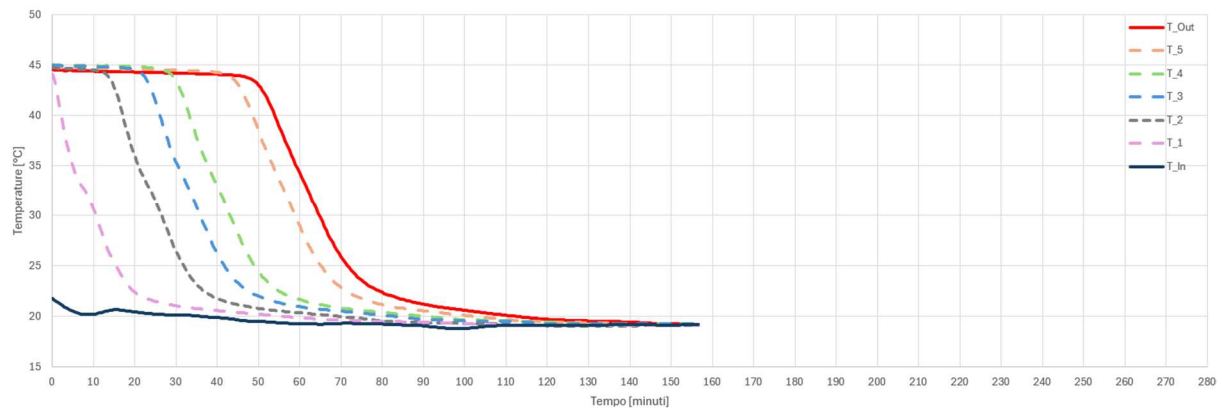


Figura 76. Prova di scarica del sistema STES con portata 130 kg/h (0.89 vol/h) e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

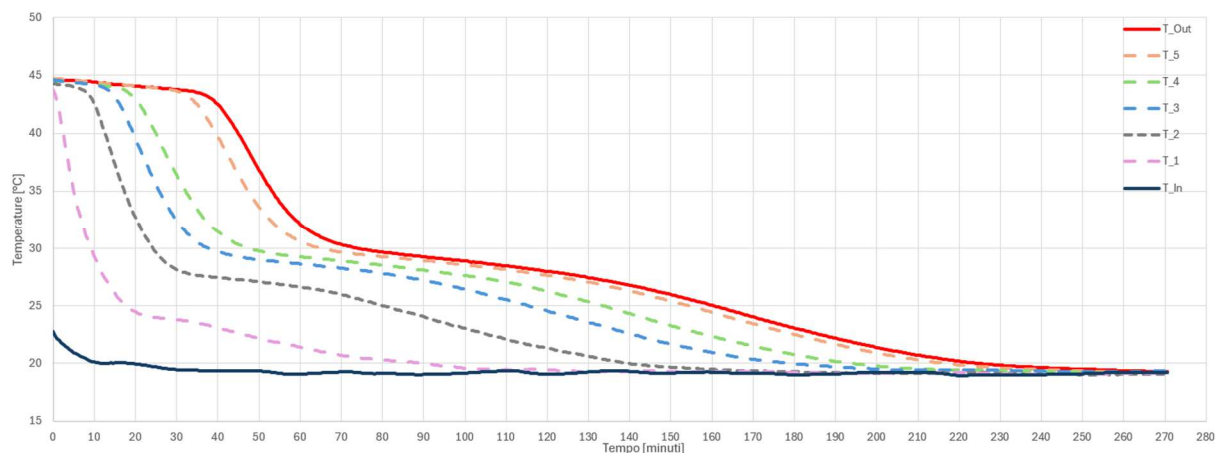


Figura 77. Prova di scarica del sistema LTES con portata 130 kg/h (0.89 vol/h) e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

Dal confronto tra le prove di scarica del sistema STES e del sistema LTES con portata pari a 130 kg/h e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, si evidenziano alcune differenze rispetto ai casi analizzati a portata inferiore. In primo luogo, l'aumento della portata comporta un'intensificazione dello scambio termico convettivo, che si traduce in una riduzione dei tempi caratteristici di scarica per entrambi i sistemi. Nel caso STES, ciò si manifesta con un abbassamento più rapido della temperatura in testa all'accumulo ("T_Out") e una diminuzione complessiva della durata della prova. Nel sistema LTES, pur mantenendosi il contributo del materiale a cambiamento di fase (ATS 31), l'effetto del calore latente risulta meno marcato rispetto ai casi a portata inferiore. Inoltre, la maggiore portata determina un incremento del tasso di ricambio del fluido all'interno dell'accumulo, rendendo più rapido l'avanzamento del fronte freddo. Di conseguenza, la differenza di comportamento tra STES e LTES tende a ridursi all'aumentare della portata. Per

quanto riguarda gli altri aspetti, quali la stratificazione termica lungo il serbatoio, la sequenza di risposta dei sensori e il comportamento globale del sistema, si osservano andamenti del tutto analoghi a quelli già descritti per le prove a portata inferiore.

In tabella 15 e 16, sono riportati i parametri ricavati dall'analisi dei dati rispettivamente della prova di scarica del sistema STES e del sistema LTES. In tabella 17, invece, è riportato un riepilogo delle variazioni ottenute grazie all'impiego del PCM rispetto al sistema STES.

Tabella 15. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema STES a 130 kg/h (0.89 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
19,485	160,5	14775,542	4,104	28,112	1534,324	10,509

Tabella 16. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema LTES a 130 kg/h (0.89 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
19,295	274,5	22213,252	6,170	42,263	1348,710	9,238

Tabella 17. Parametri energetici ricavati dal confronto tra le prove a 130 kg/h (0.89 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

Variazione della durata [%]	Variazione dell'energia [%]	Variazione della potenza [%]
+71,0%	+50,3%	-12,1%

Questi risultati, sia grafici che analitici, evidenziano chiaramente il contributo positivo dell'ATS 31 in termini di energia erogata e durata della fase di scarica, a fronte di una riduzione della potenza media. In particolare, si osserva un incremento significativo della durata della prova, pari a circa il 71.0%, accompagnato da un aumento dell'energia complessivamente rilasciata pari a circa il 50.3%. Al contrario, la potenza media subisce una riduzione di circa il 12.1%. Tale comportamento è attribuibile alla presenza del materiale a cambiamento di fase, che durante la solidificazione rilascia calore latente contribuendo a prolungare nel tempo il processo di scambio termico. Di conseguenza, pur essendo maggiore la quantità totale di energia erogata

rispetto al sistema STES, questa viene distribuita su un intervallo temporale più ampio. Tuttavia, rispetto ai casi a portata inferiore, si osserva come l'aumento della portata comporti una maggiore intensità dello scambio termico convettivo, che tende a ridurre l'efficacia del contributo del PCM. In conclusione, l'impiego del sistema LTES con ATS 31 consente di ottenere prestazioni superiori rispetto al sistema sensibile, in termini di energia erogata e durata della scarica, anche in condizioni di elevata portata, sebbene con una riduzione della potenza media e un effetto del PCM meno marcato rispetto ai casi con portata inferiore.

5.2.3 Prove di scarica a 260 kg/h (1,78 vol/h)

Di seguito, in Figura 78, è riportato il grafico relativo alla prova di scarica del sistema STES con portata di 130 kg/h (1.78 vol/h) e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$. Mentre in Figura 79 è riportato il grafico relativo alla corrispondente prova di scarica del sistema LTES.

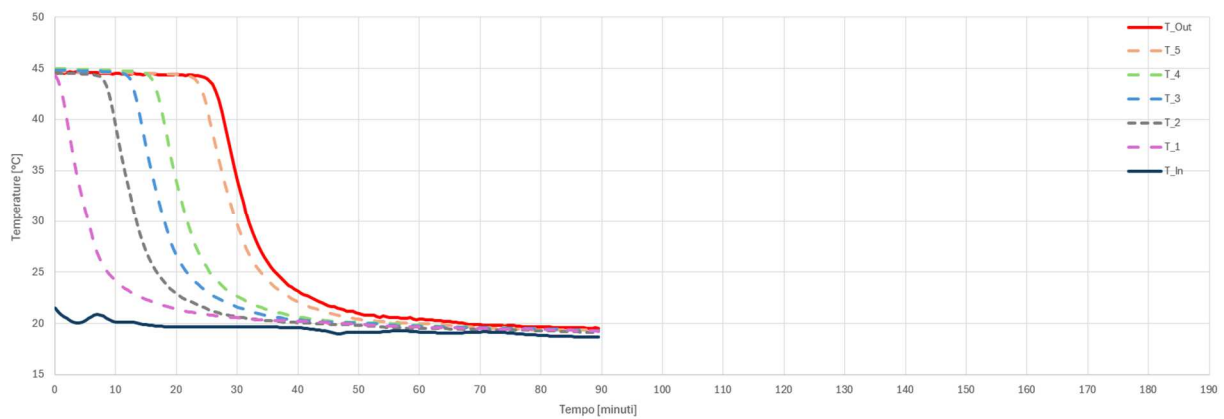


Figura 78. Prova di scarica del sistema STES con portata 260 kg/h (1.78 vol/h) e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

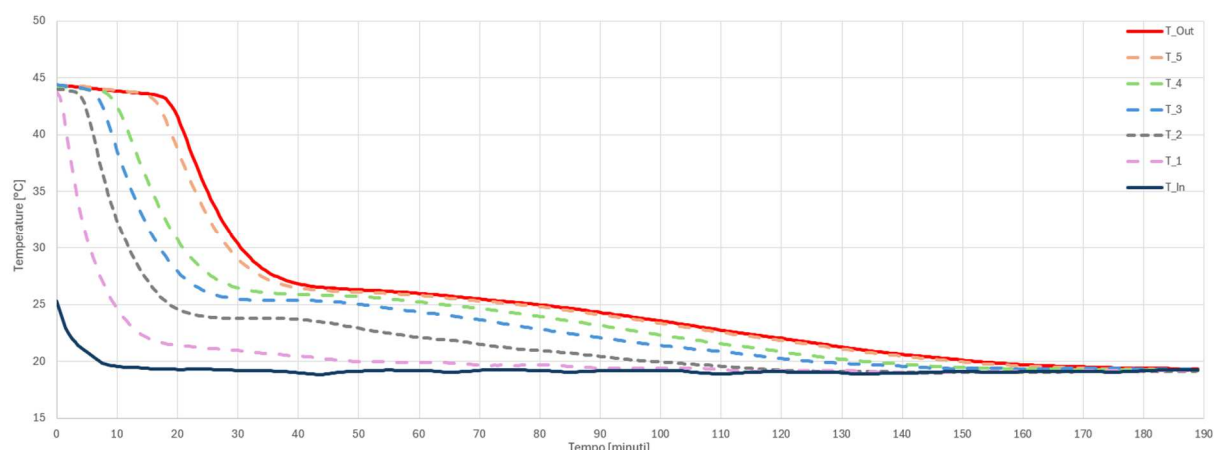


Figura 79. Prova di scarica del sistema LTES con portata 260 kg/h (1.78 vol/h) e $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dal confronto tra le prove di scarica del sistema STES e del sistema LTES con portata pari a 260 kg/h e $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, si osservano andamenti analoghi a quelli già descritti per le portate inferiori, ma con alcune differenze legate all'aumento della portata. In particolare, l'elevata portata determina un ulteriore incremento dello scambio termico convettivo e, di conseguenza, una riduzione dei tempi caratteristici della scarica. Nel sistema STES il fronte freddo attraversa l'accumulo molto rapidamente: la temperatura in testa all'accumulo ("T_Out") rimane inizialmente intorno ai 44–45 °C, ma inizia poi a diminuire in tempi molto più brevi rispetto alle prove a 65 e 130 kg/h. Anche nel sistema LTES la scarica risulta più rapida rispetto ai casi precedenti; tuttavia, la presenza dell'ATS 31 continua a modificare il comportamento dell'accumulo. Dopo una prima diminuzione rapida delle temperature, si nota infatti un tratto più graduale delle curve, riconducibile al rilascio di calore latente durante la solidificazione del PCM. L'appiattimento delle curve, associato al range di cambiamento di fase dell'ATS 31, risulta però meno marcato e meno esteso rispetto alle prove a portata inferiore, poiché l'elevata portata accelera lo scambio termico e riduce il tempo disponibile per osservare una fase quasi isoterma. Un altro aspetto evidente è che, nella prova LTES, la temperatura in testa all'accumulo si mantiene elevata per un tempo inferiore rispetto alla prova STES. Anche in questo caso, ciò è dovuto al fatto che una parte del volume del serbatoio è occupata dai moduli contenenti PCM, riducendo la quantità di acqua presente e aumentando il tasso di ricambio del fluido all'interno dell'accumulo. Di conseguenza, il fronte freddo raggiunge più rapidamente le zone superiori del serbatoio. Restano invece analoghi ai casi precedenti la stratificazione termica lungo l'altezza dell'accumulo, la sequenza di risposta dei sensori, con il raffreddamento che parte dalla zona inferiore ("T_1") e procede verso la parte superiore, e il

comportamento globale del sistema LTES, che mostra una scarica più prolungata rispetto al sistema STES grazie al contributo del calore latente.

In sintesi, alla portata di 260 kg/h il contributo dell'ATS 31 è ancora presente, ma risulta meno evidente dal punto di vista dell'appiattimento delle curve per l'elevata portata di fluido termovettore.

In tabella 18 e 19, sono riportati i parametri ricavati dall'analisi dei dati rispettivamente della prova di scarica del sistema STES e del sistema LTES. In tabella 20, invece, è riportato un riepilogo delle variazioni ottenute grazie all'impiego del PCM rispetto al sistema STES.

Tabella 18. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema STES a 260 kg/h (1.78 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
19,46	94	15510,993	4,309	29,511	2750,176	18,837

Tabella 19. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema LTES a 260 kg/h (1.78 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
19,24	192	22622,281	6,284	43,041	1963,740	13,450

Tabella 20. Parametri energetici ricavati dal confronto tra le prove a 260 kg/h (1.78 vol/h) con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

Variazione della durata [%]	Variazione dell'energia [%]	Variazione della potenza [%]
+104,3%	+45,8%	-28,6%

Questi risultati, sia grafici che analitici, evidenziano il contributo positivo dell'ATS 31 in termini di energia erogata e durata della fase di scarica anche nel caso di portata pari a 260 kg/h. In particolare, si osserva un incremento molto significativo della durata della prova, pari a circa il 104.3%, e una conseguente riduzione della potenza media di circa il 28.6%, un effetto chiaramente negativo che rappresenta la relativa lentezza del PCM nel rilasciare calore nella fase di scarica. Ciononostante, l'energia termica rilasciata dal serbatoio aumenta del 45.8% rispetto all'equivalente accumulo sensibile. Al contrario, la potenza

media subisce una riduzione di circa il 28.6%. Tale comportamento è attribuibile alla presenza del materiale a cambiamento di fase, che durante la solidificazione rilascia calore latente contribuendo a prolungare il processo di scarica. Si osserva inoltre come, all'aumentare della portata, il contributo del PCM tenda a distribuirsi su un intervallo temporale più ampio, determinando una diminuzione della potenza media. Questo effetto risulta particolarmente evidente nel caso a 260 kg/h, dove la forte intensità dello scambio termico accelera il raffreddamento dell'accumulo e rende meno marcato l'effetto di appiattimento delle curve associato al cambiamento di fase dell'ATS 31.

In conclusione, anche nelle condizioni di portata più elevate, il sistema LTES conferma l'efficacia dell'impiego del PCM nell'incrementare la capacità di accumulo termico rispetto al sistema sensibile. Tuttavia, la riduzione della potenza media risulta più marcata.

5.3 Secondo set di prove $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$

Il secondo set di prove è stato eseguito mantenendo una configurazione caratterizzata da $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$. Le prove sono state svolte utilizzando tre differenti portate massiche pari a 65, 130 e 260 kg/h, corrispondenti rispettivamente a circa 0.44, 0.89 e 1.78 vol/h. Per ciascun valore di portata è stata effettuata una prova in configurazione sensibile (STES) e una in configurazione latente (LTES), al fine di confrontare il comportamento dei due sistemi ed evidenziare il contributo del PCM ATS 31 sulle prestazioni dell'accumulo termico. In questo secondo set sperimentale, la temperatura iniziale dell'accumulo T_0 è stata fissata pari a 39°C , mentre la temperatura di ingresso T_{in} è stata mantenuta pari a 24°C . Le modalità operative adottate durante le prove rimangono analoghe a quelle descritte nel primo set sperimentale. In particolare, sono stati mantenuti gli stessi criteri per la regolazione della portata, il controllo della temperatura di ingresso e il calcolo dei parametri energetici caratteristici. Le prove sono state condotte in condizioni stazionarie controllate, così da garantire la confrontabilità dei risultati ottenuti nelle diverse configurazioni.

5.3.1 Prove di scarica a 65 kg/h (0.44 vol/h)

Come descritto in precedenza, prima dell'esecuzione della prova di scarica è necessario effettuare la fase di carica dell'accumulo fino al raggiungimento della temperatura iniziale prefissata T_0 , pari a 39°C . Successivamente viene eseguita una fase di regolazione finalizzata

a portare la temperatura di ingresso T_{in} al valore desiderato, pari a 24 °C, corrispondente alla configurazione con $\Delta T = 5$ °C. Nel caso della configurazione STES, la prova può essere avviata immediatamente al termine della fase di carica. Diversamente, nella configurazione LTES è necessario attendere un opportuno intervallo di tempo per consentire la completa fusione del PCM contenuto nei moduli HeatSel. In Figura 80 è riportato il grafico relativo alla prova di scarica del sistema STES con portata pari a 65 kg/h (0.44 vol/h) e $\Delta T = 5$ °C, mentre in Figura 81 è mostrato il grafico relativo alla corrispondente prova di scarica del sistema LTES.

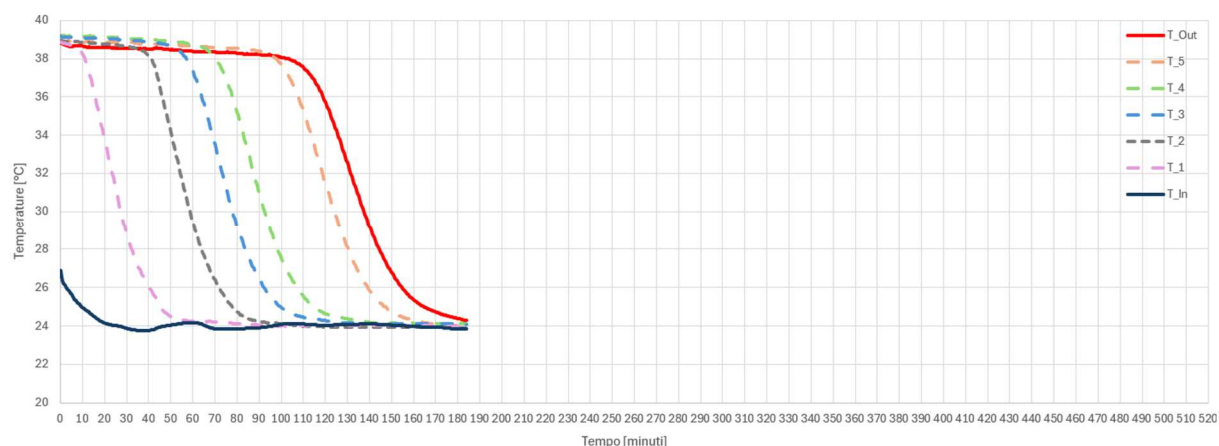


Figura 80. Prova di scarica del sistema STES con portata 65 kg/h (0.44 vol/h) e $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

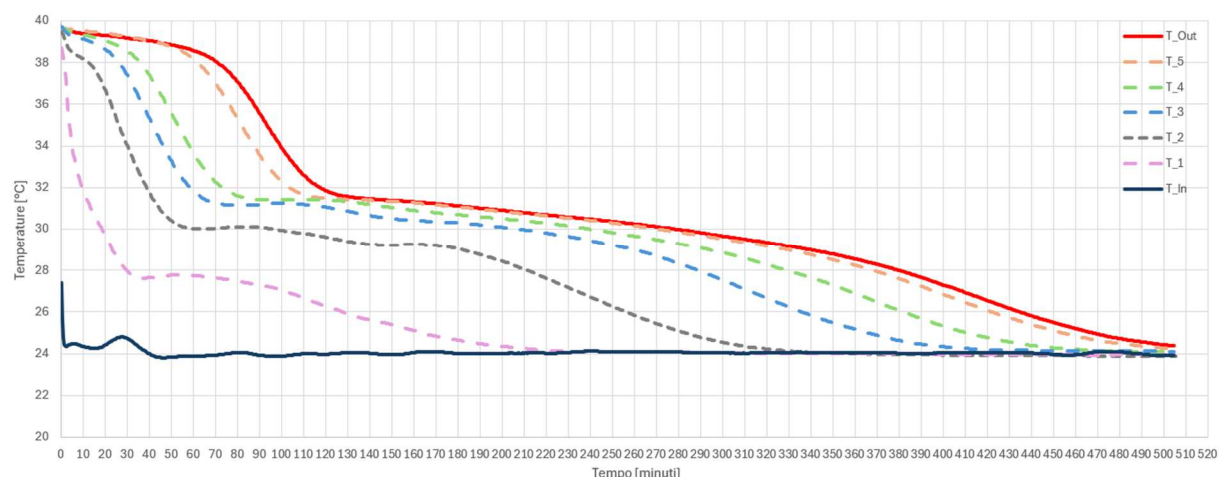


Figura 81. Prova di scarica del sistema LTES con portata 65 kg/h (0.44 vol/h) e $\Delta T = 5$ °C

Dal confronto tra le prove di scarica del sistema STES e del sistema LTES con portata pari a 65 kg/h (0.44 vol/h) e $\Delta T = 5$ °C, emergono alcune differenze significative legate alla presenza del PCM ATS 31 all'interno del sistema LTES:

- La differenza più evidente riguarda la durata complessiva della scarica, che nel sistema LTES risulta notevolmente superiore rispetto alla configurazione STES. Nel caso con PCM, infatti, il raffreddamento dell'accumulo avviene in maniera più graduale grazie al contributo del calore latente rilasciato durante la solidificazione dell'ATS 31;
- Nel sistema STES, le curve di temperatura presentano un andamento relativamente rapido e monotono: una volta raggiunto il fronte freddo, i sensori registrano un abbassamento della temperatura piuttosto marcato. Nel sistema LTES, invece, si osserva chiaramente un appiattimento delle curve di temperatura nell'intervallo associato al cambiamento di fase dell'ATS 31. Questo comportamento rappresenta il principale effetto del PCM ed è riconducibile al rilascio del calore latente durante la fase di solidificazione;
- Un'altra differenza significativa riguarda la propagazione del fronte termico all'interno dell'accumulo. Nel sistema LTES il raffreddamento procede in modo più lento e distribuito nel tempo. Tale effetto risulta particolarmente evidente nei sensori centrali e superiori dell'accumulo, dove il contributo del PCM prolunga sensibilmente la permanenza a temperature elevate;
- Anche in questo caso, tuttavia, l'effetto del PCM non si manifesta in modo uniforme lungo tutto il volume dell'accumulo. Nella parte inferiore del serbatoio ("T_1"), il fluido freddo in ingresso, a temperatura prossima ai 24 °C, incontra inizialmente il PCM a circa 39 °C, generando un salto termico elevato e quindi uno scambio termico molto intenso. Di conseguenza, la solidificazione del PCM avviene più rapidamente e il tratto isoterma risulta meno evidente nei sensori inferiori. Procedendo verso la parte alta dell'accumulo, il ΔT locale diminuisce e il rilascio del calore latente avviene in modo più graduale, rendendo maggiormente visibile l'appiattimento delle curve.

Infine, rispetto ai casi analizzati con $\Delta T = 10$ °C, si osserva come, nella configurazione con $\Delta T = 5$ °C, l'effetto del PCM risulti complessivamente più evidente e maggiormente distribuito nel tempo. Questo comportamento è legato principalmente alla minore differenza di temperatura tra il fluido in ingresso e il materiale a cambiamento di fase presente all'interno dell'accumulo. Nel caso con $\Delta T = 10$ °C, infatti, il fluido freddo in ingresso generava un salto termico più elevato rispetto alla temperatura iniziale del PCM, producendo uno scambio termico molto intenso

soprattutto nelle zone inferiori del serbatoio. Tale condizione accelerava la solidificazione dell'ATS 31 e comportava un rilascio del calore latente più rapido, rendendo l'appiattimento delle curve meno esteso nel tempo e maggiormente localizzato. Con $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, invece, il gradiente termico risulta inferiore: il fluido in ingresso, a circa $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, incontra un accumulo inizialmente a circa $39\text{ }^{\circ}\text{C}$, determinando uno scambio termico meno intenso rispetto ai casi precedenti. Di conseguenza, la solidificazione del PCM avviene in maniera più lenta e progressiva, permettendo al sistema LTES di mantenere più a lungo temperature quasi costanti nell'intervallo di cambiamento di fase dell'ATS 31. Questo fenomeno si traduce graficamente in curve di temperatura maggiormente appiattite e distribuite su intervalli temporali più estesi, soprattutto nei sensori intermedi e superiori dell'accumulo. In altre parole, il contributo del calore latente risulta più facilmente osservabile rispetto alle prove con $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, nelle quali lo scambio convettivo tendeva invece a dominare il comportamento termico del sistema. Si può quindi affermare che, nelle condizioni operative caratterizzate da ΔT più contenuti, il sistema LTES riesca a valorizzare maggiormente il contributo del PCM ATS 31.

In tabella 21 e 22, sono riportati i parametri ricavati dall'analisi dei dati rispettivamente della prova di scarica del sistema STES e del sistema LTES. In tabella 23, invece, è riportato un riepilogo delle variazioni ottenute grazie all'impiego del PCM rispetto al sistema STES.

Tabella 21. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema STES a 65 kg/h (0.44 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
24,11	187,5	8794,713	2,443	16,733	781,752	5,354

Tabella 22. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema LTES a 65 kg/h (0.44 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
24,05	506,5	15504,711	4,307	29,500	510,191	3,494

Tabella 23. Parametri energetici ricavati dal confronto tra le prove a 65 kg/h (0.44 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

Variazione della durata [%]	Variazione dell'energia [%]	Variazione della potenza [%]
+170,1%	+76,3%	-34,7%

Questi risultati, sia grafici che analitici, evidenziano in maniera molto marcata il contributo positivo dell'ATS 31 in termini di energia erogata e durata della fase di scarica rispetto al sistema sensibile. In particolare, si osserva un incremento molto significativo dell'aumento dell'energia termica rilasciata pari a circa il 76.3%. Al contrario, la potenza media subisce una riduzione di circa il 34.7% a causa di un incremento dei tempi di scarica pari a circa il 170%. Tale comportamento è attribuibile alla presenza del materiale a cambiamento di fase, che durante la solidificazione rilascia il calore latente accumulato, contribuendo a prolungare nel tempo il processo di scambio termico. Di conseguenza, pur essendo maggiore la quantità totale di energia erogata rispetto al caso con sola acqua, questa viene distribuita su un intervallo temporale molto più ampio. Nel caso con $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$, l'effetto del PCM risulta particolarmente evidente poiché il minore salto termico tra il fluido in ingresso e l'accumulo determina uno scambio termico meno intenso rispetto ai casi con $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$. Questo comporta una solidificazione più lenta e graduale dell'ATS 31, rendendo più marcato e prolungato il rilascio del calore latente.

5.3.2 Prove di scarica a 130 kg/h (0,89 vol/h)

Di seguito, in Figura 82, è riportato il grafico relativo alla prova di scarica del sistema STES con portata di 130 kg/h (0.89 vol/h) e $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$. Mentre in Figura 83 è riportato il grafico relativo alla corrispondente prova di scarica del sistema LTES.

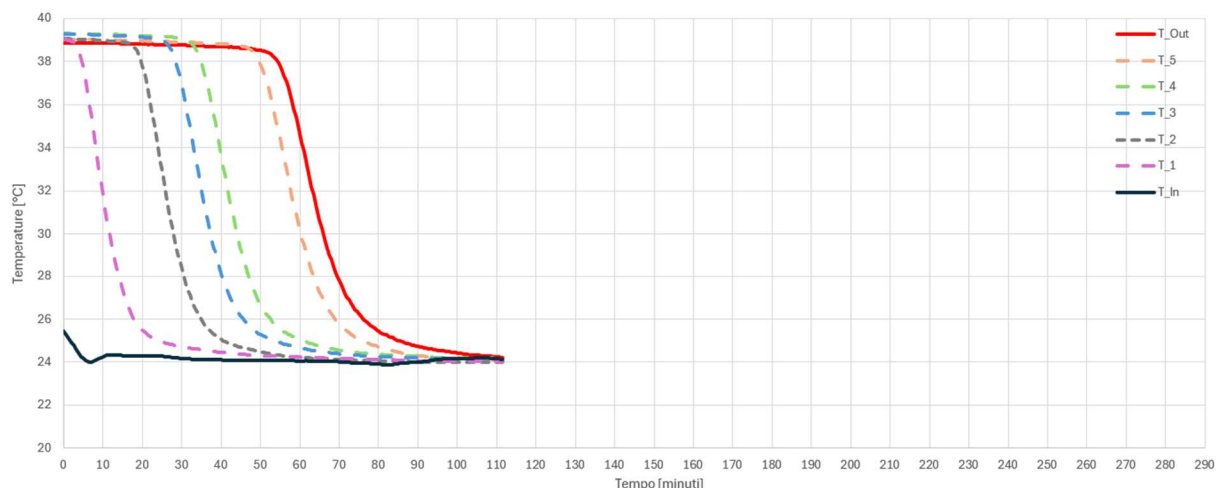


Figura 82. Prova di scarica del sistema STES con portata 130 kg/h (0.89 vol/h) e $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

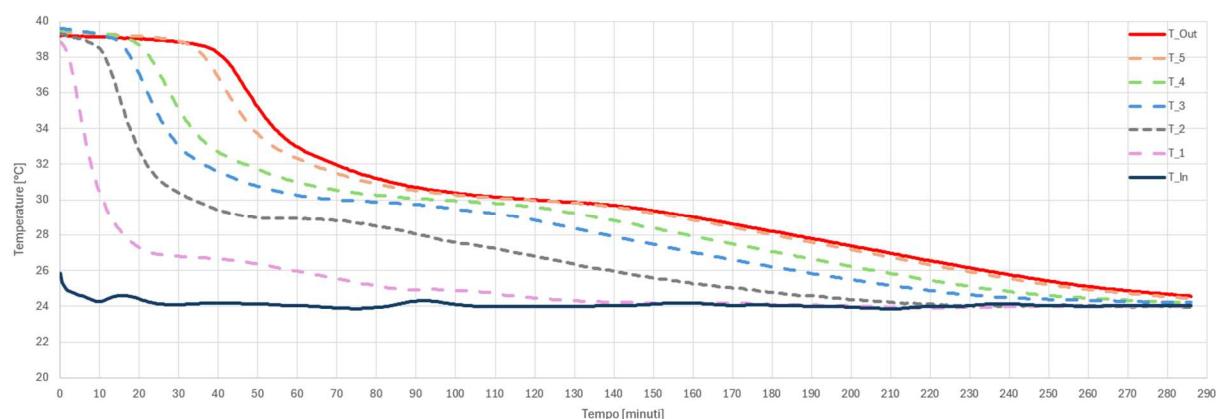


Figura 83. Prova di scarica del sistema LTES con portata 130 kg/h (0.89 vol/h) e $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

Dal confronto tra le prove di scarica del sistema STES e del sistema LTES con portata pari a 130 kg/h (0.89 vol/h) e $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, si osservano comportamenti nel complesso analoghi a quelli evidenziati nella prova a 65 kg/h, pur con alcune differenze legate all'aumento della portata. Anche in questo caso è chiaramente presente la stratificazione termica all'interno dell'accumulo e tale comportamento risulta simile sia nella configurazione STES sia nella configurazione LTES. Nel sistema LTES si osserva nuovamente il contributo del PCM ATS 31, evidenziato dall'appiattimento delle curve di temperatura nell'intervallo associato al cambiamento di fase.

Rispetto alla prova a 65 kg/h, tuttavia, l'effetto del PCM appare meno marcato. L'aumento della portata comporta infatti uno scambio termico convettivo più intenso, che accelera il raffreddamento dell'accumulo e riduce il tempo durante il quale il sistema permane nel tratto quasi isoterma associato al cambiamento di fase dell'ATS 31. Di conseguenza, l'appiattimento

delle curve risulta meno esteso temporalmente e il fronte freddo si propaga più rapidamente lungo l'accumulo.

Anche in questa configurazione, l'effetto del PCM non risulta uniforme lungo tutto il serbatoio. Nella zona inferiore ("T₁") a causa dell'elevato gradiente termico c'è una solidificazione più rapida del PCM rendendo meno evidente il tratto isoterma nei sensori inferiori. Rispetto alla prova a portata inferiore, si osserva inoltre una riduzione della durata complessiva della scarica sia nel sistema STES sia nel sistema LTES. Tuttavia, il sistema latente continua a mostrare una permanenza a temperature elevate significativamente più lunga rispetto al sistema sensibile, confermando il contributo positivo dell'ATS 31 anche in condizioni caratterizzate da portate maggiori.

In tabella 24 e 25, sono riportati i parametri ricavati dall'analisi dei dati rispettivamente della prova di scarica del sistema STES e del sistema LTES. In tabella 26, invece, è riportato un riepilogo delle variazioni ottenute grazie all'impiego del PCM rispetto al sistema STES.

Tabella 24. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema STES a 130 kg/h (0.89 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

T _{media} 'T _{in} ' [°C]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
24,14	118,5	8809,658	2,447	16,761	1239,052	8,487

Tabella 25. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema LTES a 130 kg/h (0.89 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

T _{media} 'T _{in} ' [°C]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
24,08	289	16022,184	4,451	30,484	924,001	6,329

Tabella 26. Parametri energetici ricavati dal confronto tra le prove a 130 kg/h (0.89 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

Variazione della durata [%]	Variazione dell'energia [%]	Variazione della potenza [%]
+143,9%	+81,9%	-25,4%

Dai risultati sperimentali si osserva un incremento significativo della durata della prova, pari a circa il 143.9%, accompagnato da un aumento dell'energia complessivamente rilasciata pari a circa l'81.9%. La potenza media subisce una riduzione di circa il 25.4%.

5.3.3 Prove di scarica a 260 kg/h (1,78 vol/h)

Di seguito, in Figura 84, è riportato il grafico relativo alla prova di scarica del sistema STES con portata di 130 kg/h (0.89 vol/h) e $\Delta T = 10^\circ\text{C}$. Mentre in Figura 85 è riportato il grafico relativo alla corrispondente prova di scarica del sistema LTES.

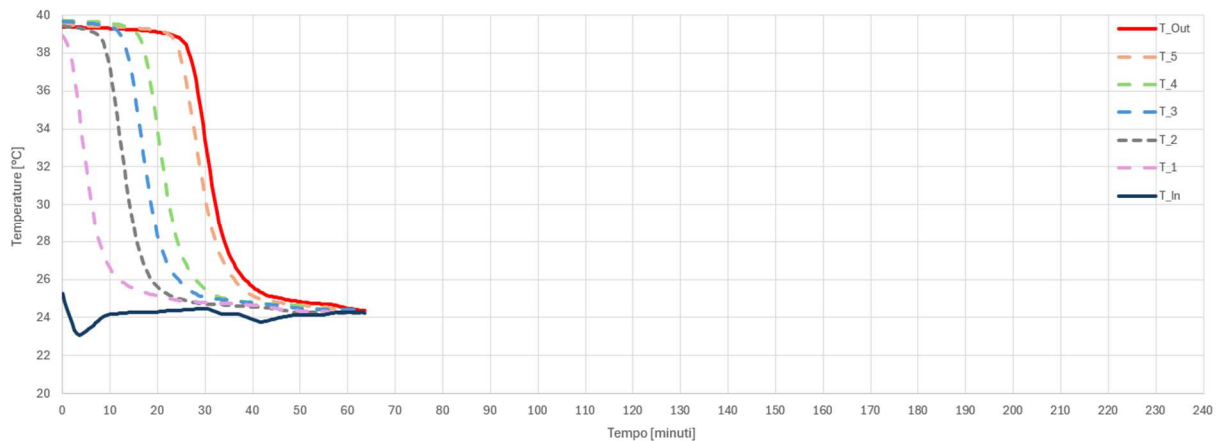


Figura 84. Prova di scarica del sistema STES con portata 260 kg/h (1.78 vol/h) e $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

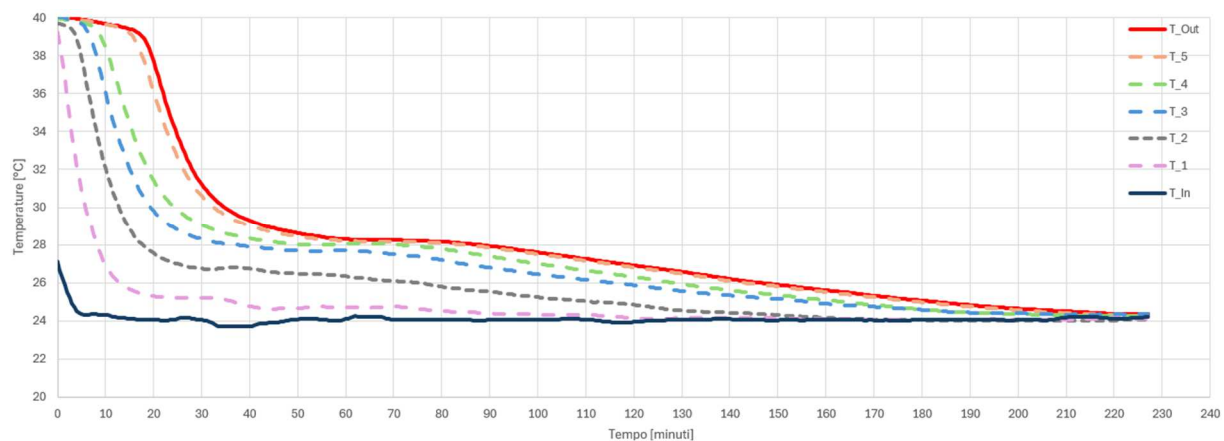


Figura 85. Prova di scarica del sistema LTES con portata 260 kg/h (1.78 vol/h) e $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

Dal confronto tra le prove di scarica del sistema STES e del sistema LTES con portata pari a 260 kg/h (1.78 vol/h) e $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, si osservano comportamenti analoghi a quelli già evidenziati nelle prove precedenti.

Anche in questo caso, in entrambe le configurazioni, è presente una chiara stratificazione termica dell'accumulo. Tuttavia, rispetto alle prove a 65 e 130 kg/h, la propagazione del fronte freddo avviene in tempi decisamente più brevi. L'appiattimento delle curve risulta visibile

nell'intervallo associato al cambiamento di fase dell'ATS 31, anche se meno marcato rispetto alle prove a 65 e 130 kg/h.

Nel confronto con la portata precedente, si può osservare che l'aumento da 130 kg/h a 260 kg/h riduce i tempi di scarica sia nello STES sia nel LTES e che l'aggiunta dei moduli di PCM contribuisce ad aumentare la capacità di accumulo termico del serbatoio.

In sintesi, alla portata di 260 kg/h, il comportamento del sistema è maggiormente dominato dallo scambio convettivo imposto dall'elevata circolazione del fluido. Nonostante ciò, il sistema LTES conserva un andamento più graduale rispetto allo STES e continua a mostrare il beneficio legato al rilascio del calore latente del PCM.

In tabella 27 e 28, sono riportati i parametri ricavati dall'analisi dei dati rispettivamente della prova di scarica del sistema STES e del sistema LTES. In tabella 29, invece, è riportato un riepilogo delle variazioni ottenute grazie all'impiego del PCM rispetto al sistema STES.

Tabella 27. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema STES a 260 kg/h (1.78 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [°C]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
24,24	67,5	9073,378	2,520	17,263	2240,340	15,345

Tabella 28. Parametri energetici ricavati dalla prova del sistema LTES a 260 kg/h (1.78 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

T_{media} ' T_{in} ' [°C]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
24,09	231	16692,425	4,637	31,759	1204,360	8,250

Tabella 29. Parametri energetici ricavati dal confronto tra le prove a 260 kg/h (1.78 vol/h) con $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$

Variazione della durata [%]	Variazione dell'energia [%]	Variazione della potenza [%]
+242,2%	+84,0%	-46,2%

Dai risultati si osserva un incremento molto significativo della durata della prova, pari a circa il 242.2%, un aumento dell'energia termica rilasciata pari a circa l'84.0% e una riduzione elevata della potenza media di circa il 46.2%.

L'energia accumulata viene rilasciata in maniera più graduale e distribuita nel tempo, garantendo una maggiore continuità nell'erogazione termica; tuttavia, il significativo aumento dei tempi di scarica determina una diminuzione della potenza media. Questo comportamento risulta particolarmente vantaggioso nelle applicazioni in cui è preferibile mantenere un rilascio energetico più stabile e prolungato piuttosto che elevate potenze concentrate in intervalli temporali ridotti.

In conclusione, anche nelle condizioni operative più gravose, caratterizzate da portate elevate, il sistema LTES con ATS 31 conferma prestazioni superiori rispetto al sistema sensibile in termini di capacità di accumulo.

5.3 Riepilogo delle prove

Nel seguito sono riportate delle tabelle riassuntive di tutti i parametri energetici calcolati per i due set di prove sperimentali con $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$.

Tabella 30. Riepilogo dei parametri delle prove STES $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$

	T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
STES $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$							
65kg/h	24,11	187,5	8794,713	2,443	16,733	781,752	5,354
130kg/h	24,14	118,5	8809,658	2,447	16,761	1239,052	8,487
260kg/h	24,24	67,5	9073,378	2,520	17,263	2240,340	15,345

Tabella 31. Riepilogo dei parametri delle prove LTES $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$

	T_{media} ' T_{in} ' [$^{\circ}\text{C}$]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m ³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m ³]
LTES $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$							
65kg/h	24,05	506,5	15504,712	4,30686432	29,500	510,191	3,494
130kg/h	24,08	289	16022,184	4,451	30,484	924,001	6,329
260kg/h	24,09	231	16692,425	4,637	31,758	1204,360	8,250

Tabella 32. Riepilogo dei parametri delle prove STES $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

	$T_{\text{media}} 'T_{\text{in}}'$ [°C]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m³]
STES $\Delta T = 10^\circ\text{C}$							
65kg/h	19,498	246,5	14961,517	4,156	28,465	1011,597	6,929
130kg/h	19,485	160,5	14775,542	4,104	28,112	1534,324	10,509
260kg/h	19,46	94	15510,993	4,309	29,511	2750,176	18,837

Tabella 33. Riepilogo dei parametri delle prove LTES $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

	$T_{\text{media}} 'T_{\text{in}}'$ [°C]	Durata prova [Min]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Densità di energia [kWh/m³]	Potenza [W]	Densità di potenza [KW/m³]
LTES $\Delta T = 10^\circ\text{C}$							
65kg/h	19,5	387,5	20970,034	5,825	39,897	901,937	6,178
130kg/h	19,295	274,5	22213,252	6,170	42,262	1348,710	9,238
260kg/h	19,24	192	22622,281	6,284	43,041	1963,740	13,450

Dopo aver analizzato nel dettaglio tutti i casi sperimentali, è possibile delineare un quadro complessivo del comportamento del sistema di accumulo termico nelle differenti condizioni operative, evidenziando in particolare l'influenza della portata massica e del ΔT imposto tra ingresso e uscita sulle prestazioni energetiche dell'accumulo.

Considerando innanzitutto l'effetto della portata, emergono le seguenti osservazioni:

- durata della prova: aumentando la portata massica si osserva, come prevedibile, una diminuzione della durata complessiva della scarica. Questo comportamento è dovuto al fatto che una maggiore quantità di fluido attraversa l'accumulo nell'unità di tempo, incrementando così la velocità con cui l'energia termica viene asportata dal sistema. Dal confronto tra le configurazioni STES e LTES è emerso che la presenza del PCM ATS 31 prolunghi sensibilmente la durata della scarica in tutte le condizioni analizzate. Il massimo incremento percentuale della durata si registra nella prova a 260 kg/h e $\Delta T =$

5 °C, dove il tempo di scarica passa da 67.5 minuti nel sistema STES a 231 minuti nel sistema LTES, corrispondenti a un aumento di circa il 242.2%;

- energia termica rilasciata: l'energia termica complessivamente restituita dal sistema aumenta al crescere della portata, sia nelle prove STES sia in quelle LTES. Il confronto tra le due configurazioni mette in evidenza il contributo fornito dal PCM, che consente al sistema LTES di accumulare e successivamente rilasciare quantità di energia termica superiori rispetto al sistema con sola acqua. A differenza di quanto osservato per la durata, l'incremento percentuale dell'energia rimane relativamente stabile al variare della portata. Il valore massimo si osserva nella prova a 260 kg/h con $\Delta T = 5\text{ °C}$, in cui l'energia erogata aumenta da circa 2.52 kWh nel sistema STES a circa 4.64 kWh nel sistema LTES, con un incremento pari a circa l'84%;
- potenza media: la potenza media della prova aumenta all'aumentare della portata, poiché il trasferimento termico avviene in modo più rapido e intenso. Tuttavia, confrontando le prove STES con quelle LTES, si osserva che il sistema contenente PCM presenta valori di potenza media inferiori. Tale comportamento è legato alla modalità con cui il PCM rilascia il calore accumulato: l'energia viene ceduta in maniera più graduale durante il processo di solidificazione, determinando un'erogazione più prolungata nel tempo. Questo effetto risulta particolarmente evidente alle portate più elevate. In particolare, nella prova a 260 kg/h e $\Delta T = 5\text{ °C}$ si registra il maggiore decremento percentuale della potenza media, che passa da circa 2240 W nel sistema STES a circa 1204 W nel sistema LTES, con una riduzione di circa il 46.2%;
- andamento dei profili termici: dal punto di vista qualitativo, i grafici mostrano come l'aumento della portata renda progressivamente meno evidente il contributo del calore latente del PCM. I tratti quasi isotermini associati al cambiamento di fase dell'ATS 31 tendono infatti a ridursi in durata e intensità, specialmente nella parte inferiore dell'accumulo. Questo fenomeno è riconducibile sia all'elevato gradiente termico iniziale tra il fluido freddo in ingresso e il PCM ancora caldo, sia alla riduzione del tempo di permanenza del fluido all'interno del serbatoio al crescere della portata. Di conseguenza, il processo di solidificazione avviene più rapidamente e l'effetto di appiattimento delle curve risulta meno pronunciato. Nonostante ciò, anche alle

portate maggiori, il sistema LTES continua a presentare curve di raffreddamento più graduali rispetto al sistema STES, a conferma dell'effetto benefico del calore latente nel prolungare il rilascio energetico dell'accumulo.

Considerando invece l'influenza del ΔT imposto tra ingresso e uscita, è possibile evidenziare le seguenti considerazioni:

- durata della prova: all'aumentare del ΔT si osserva, nelle prove STES, una riduzione della durata complessiva della scarica, dovuta al maggiore salto termico tra accumulo e fluido in ingresso che intensifica lo scambio termico e accelera il raffreddamento del sistema. Nelle prove LTES, invece, tale variazione risulta meno marcata grazie al contributo del calore latente del PCM ATS 31, che tende a smorzare gli effetti dell'aumento del ΔT . Confrontando STES e LTES si nota che l'aumento percentuale della durata della prova di scarica sia particolarmente evidente nelle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. In particolare, per $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'aumento percentuale della durata varia da circa il 143.9% fino al 242.2%, mentre per $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ il range risulta compreso tra circa il 57.2% e il 104.3%;
- energia termica erogata: in termini assoluti, le prove condotte con $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ restituiscono quantità di energia maggiori rispetto alle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, grazie al più elevato contenuto energetico disponibile all'interno dell'accumulo. Tuttavia, analizzando il confronto tra STES e LTES, si osserva che il vantaggio percentuale introdotto dal PCM tende ad essere più elevato nelle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Questo comportamento evidenzia come, in condizioni caratterizzate da salti termici più contenuti, il contributo del calore latente dell'ATS 31 incida maggiormente sulle prestazioni complessive del sistema. In particolare, nelle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'incremento percentuale dell'energia erogata varia da circa il 79% all'84%, mentre nelle prove a $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ il range risulta compreso tra circa il 40% e il 50%;
- potenza media: la potenza media risulta generalmente più elevata nelle prove con $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, poiché il maggiore gradiente termico favorisce scambi termici più intensi e quindi un rilascio energetico più rapido. Tuttavia, confrontando le configurazioni STES e LTES, si osserva che la riduzione percentuale della potenza media introdotta dal PCM è più marcata nel caso di $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. In particolare, nelle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ il decremento

percentuale della potenza varia da circa il 34.7% fino al 46.2%, mentre nelle prove a $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ la riduzione risulta compresa tra circa il 10.9% e il 28.6%. Questo comportamento conferma che, a ΔT inferiori, il sistema LTES consente una maggiore continuità temporale dell'erogazione termica piuttosto che elevate potenze;

- aspetti grafici: dal punto di vista qualitativo, le prove a $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ mostrano generalmente un effetto del PCM più evidente rispetto alle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. In particolare, nelle configurazioni con ΔT maggiore risultano maggiormente riconoscibili i tratti quasi isotermi associati al cambiamento di fase dell'ATS 31, soprattutto nelle zone superiori dell'accumulo dove il processo di solidificazione avviene in maniera più lenta e graduale. Nelle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, invece, l'effetto del PCM tende a manifestarsi prevalentemente come uno spostamento verso destra delle curve di temperatura, piuttosto che tramite veri e propri plateau isotermi. Questo comportamento è legato al minore gradiente termico disponibile, che rende meno netto il fenomeno di rilascio del calore latente durante la scarica.

Al fine di fornire una sintesi visiva immediata del salto prestazionale ottenuto con l'integrazione del PCM ATS 31, vengono di seguito riportati i confronti grafici relativi alla durata della scarica, all'energia erogata e alla potenza media per tutte le configurazioni sperimentali analizzate, che evidenziano i benefici ottenuti con il sistema LTES rispetto alla configurazione STES:

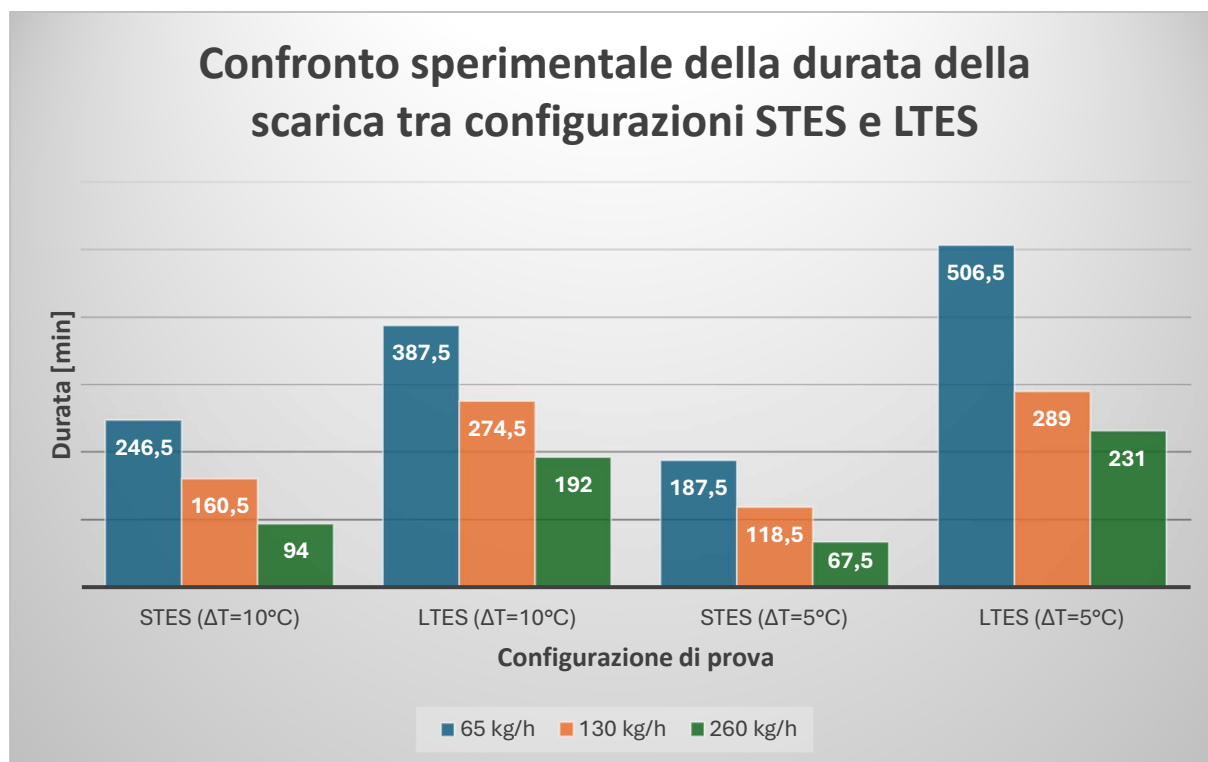


Figura 86. Confronto sperimentale della durata della scarica tra configurazioni STES e LTES.

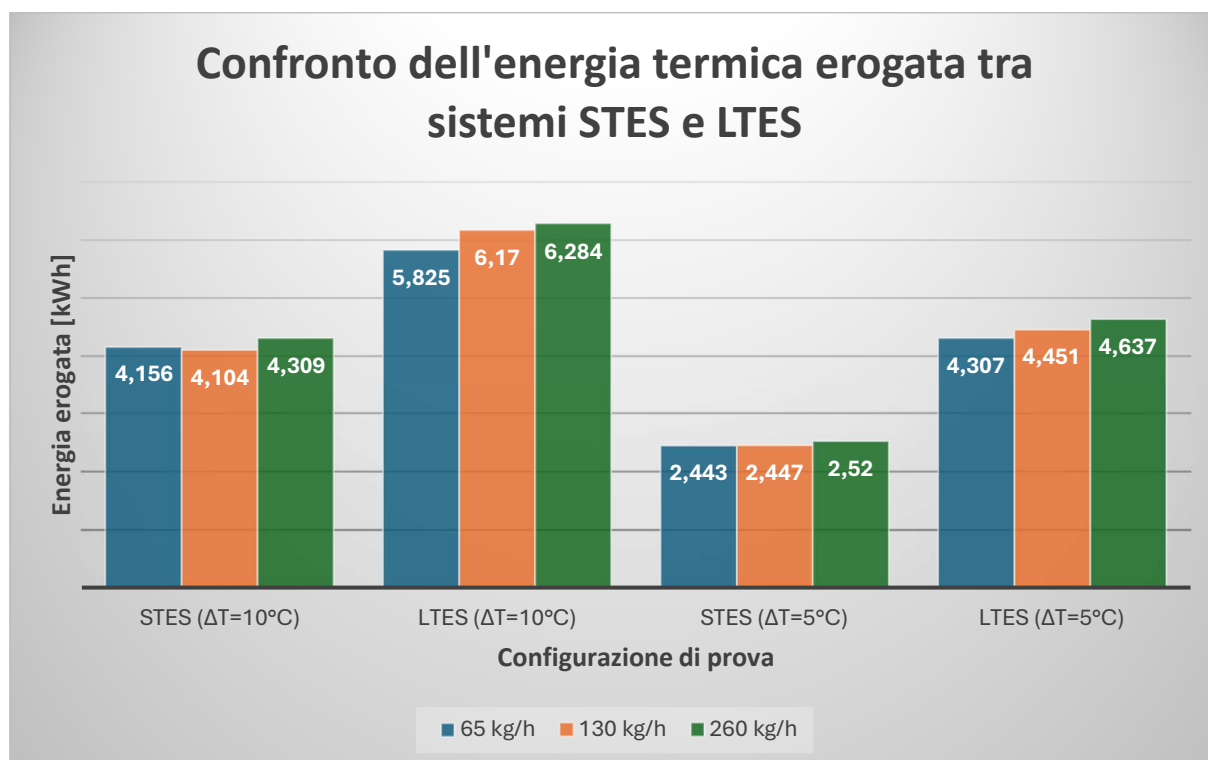


Figura 87. Confronto dell'energia termica erogata tra sistemi STES e LTES.

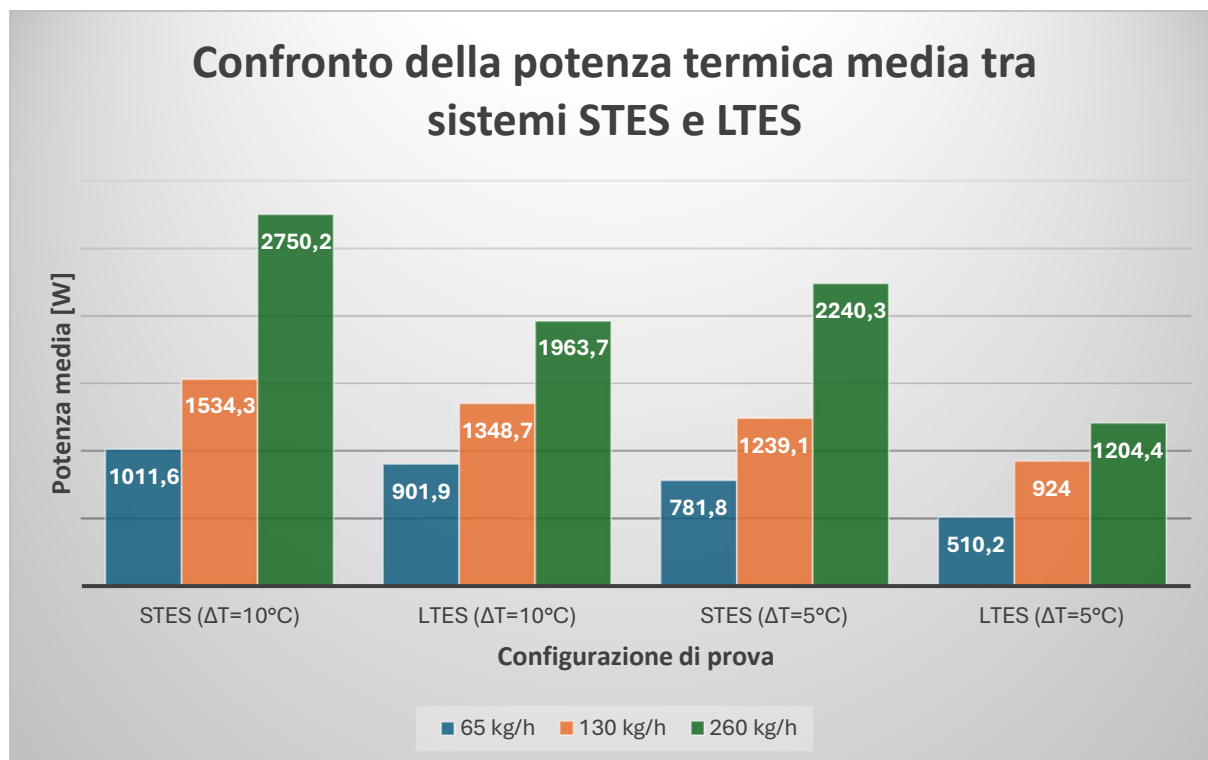


Figura 88. Confronto della potenza termica media tra sistemi STES e LTES.

Nel complesso, i risultati sperimentali confermano che l'impiego del PCM ATS31 migliora significativamente le prestazioni dell'accumulo termico rispetto alla configurazione sensibile tradizionale. In tutte le prove svolte, il sistema LTES ha mostrato un incremento dell'energia erogata e un rilascio di calore più stabile e prolungato durante la scarica grazie al contributo del calore latente durante il cambiamento di fase del PCM. L'analisi ha inoltre evidenziato come i benefici del PCM dipendano fortemente dalle condizioni operative. In particolare, alle basse portate e con ΔT ridotto, l'effetto del calore latente risulta maggiormente evidente, mentre all'aumentare della portata si osserva una progressiva riduzione della potenza media dovuta alla minore efficacia dello scambio termico tra fluido e PCM. Dal punto di vista qualitativo, i profili termici hanno mostrato il caratteristico appiattimento delle curve nelle prove LTES, associato al rilascio del calore latente dell'ATS31 durante la solidificazione.

I risultati ottenuti confermano quindi che l'utilizzo di PCM rappresenta una soluzione efficace per incrementare la capacità di accumulo energetico e migliorare l'autonomia termica del sistema, soprattutto nelle condizioni operative caratterizzate da basse portate e ridotti salti termici.

6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'attività sperimentale svolta ha permesso di analizzare il comportamento di un sistema di accumulo termico latente basato sull'impiego di materiali a cambiamento di fase, evidenziandone sia le potenzialità sia alcuni limiti operativi. I risultati ottenuti mostrano infatti come l'introduzione del PCM possa influenzare in maniera significativa le prestazioni dell'accumulo, soprattutto in termini di energia immagazzinata e durata della fase di scarica, ma allo stesso tempo mettono in evidenza la forte dipendenza del sistema dalle condizioni operative e dalle caratteristiche di scambio termico. Nel corso delle prove sono inoltre emersi diversi aspetti critici legati sia alla gestione dell'impianto sperimentale sia al comportamento del materiale durante le fasi di carica e scarica. Tali osservazioni hanno permesso non solo di interpretare in modo più completo i risultati sperimentali, ma anche di individuare possibili direzioni di sviluppo per il miglioramento del sistema e per future applicazioni dei materiali a cambiamento di fase nel settore dell'accumulo termico.

Nel presente capitolo viene quindi proposta un'analisi critica del lavoro svolto, seguita da alcune considerazioni sui possibili sviluppi futuri, sia dal punto di vista impiantistico sia in relazione all'evoluzione delle tecnologie PCM e alla loro integrazione nei sistemi energetici di nuova generazione.

6.1 Analisi critica del lavoro sperimentale

L'attività sperimentale svolta ha permesso di evidenziare diversi aspetti legati al comportamento dei sistemi di accumulo termico latente, mettendo in luce sia i benefici introdotti dal PCM sia alcune criticità che hanno influenzato l'andamento delle prove e l'interpretazione dei risultati ottenuti.

Uno degli aspetti più rilevanti emersi durante la sperimentazione riguarda la forte influenza delle condizioni operative sulle prestazioni del sistema. In particolare, la portata del fluido termovettore si è dimostrata un parametro determinante nel definire l'efficacia dello scambio termico tra acqua e materiale a cambiamento di fase. Alle portate più basse è stato possibile osservare in modo più evidente il contributo del calore latente, grazie a tempi di permanenza maggiori del fluido all'interno dell'accumulo. In queste condizioni, il PCM riesce infatti a completare in maniera più efficace i processi di fusione e solidificazione, prolungando la durata della fase di scarica e rendendo più graduale il rilascio dell'energia accumulata.

Al contrario, aumentando la portata, il comportamento del sistema tende progressivamente ad avvicinarsi a quello di un accumulo sensibile. La riduzione del tempo di permanenza del fluido limita infatti lo scambio termico con il PCM, rendendo meno efficace il contributo del calore latente. Questo aspetto risulta strettamente collegato a una delle principali limitazioni dei materiali a cambiamento di fase, ovvero la loro bassa conducibilità termica. Nonostante il PCM utilizzato abbia mostrato buone capacità di accumulo energetico, la velocità con cui tale energia può essere trasferita al fluido rimane limitata, soprattutto nelle condizioni caratterizzate da elevata intensità di scambio. Nel corso delle prove sono inoltre emerse alcune difficoltà legate alla gestione dell'impianto sperimentale. In particolare, il controllo della temperatura di ingresso all'accumulo ha richiesto una regolazione continua della valvola miscelatrice, soprattutto nelle prove a bassa portata, dove il sistema mostrava una risposta più lenta e soggetta a oscillazioni. Anche il mantenimento di condizioni termiche stabili durante la fase di carica si è rivelato un aspetto critico, a causa della difficoltà del generatore termico nel garantire una temperatura costante nel tempo. Tali variazioni hanno avuto un impatto maggiore nelle prove con PCM, nelle quali il corretto completamento della fase di fusione risulta fondamentale per ottenere condizioni iniziali coerenti tra una prova e l'altra.

Un ulteriore elemento emerso durante la sperimentazione riguarda le dispersioni termiche del sistema. Nonostante la presenza dell'isolamento esterno, nelle prove di durata maggiore si sono osservate perdite di calore non trascurabili, che hanno influenzato l'andamento delle temperature interne e, in alcuni casi, la stabilità della fase di regolazione. Questo aspetto evidenzia come, nello studio sperimentale dei sistemi di accumulo termico, anche elementi apparentemente secondari come la qualità dell'isolamento possano incidere in maniera significativa sull'affidabilità delle misure.

Nel complesso, le criticità osservate non compromettono i risultati ottenuti, ma anzi contribuiscono a evidenziare la complessità del comportamento dei sistemi di accumulo latente e la necessità di una corretta ottimizzazione sia delle condizioni operative sia della configurazione impiantistica. Proprio da queste osservazioni emergono alcune delle principali direzioni di sviluppo future, finalizzate a migliorare l'efficienza dello scambio termico, la stabilità del sistema e l'affidabilità delle prove sperimentali.

6.2 Prospettive di miglioramento del sistema sperimentale

L'attività sperimentale svolta ha evidenziato come le prestazioni del sistema di accumulo siano strettamente legate non solo alle caratteristiche del PCM, ma anche alla capacità dell'impianto di mantenere condizioni operative stabili e controllabili nel tempo. In quest'ottica, uno dei principali sviluppi futuri riguarda il miglioramento del sistema di regolazione e controllo dell'apparato sperimentale, con l'obiettivo di aumentare l'affidabilità e la ripetibilità delle prove. Nel corso della sperimentazione, il mantenimento della temperatura di ingresso all'accumulo ha richiesto frequenti interventi manuali sulla valvola miscelatrice, soprattutto nelle prove caratterizzate da basse portate, dove il sistema mostrava una risposta più lenta e soggetta a oscillazioni. L'introduzione di un controllo automatico della temperatura, ad esempio mediante regolatori PID, permetterebbe di rendere più stabile il funzionamento del circuito e di ridurre le variazioni delle condizioni operative durante le prove.

Un ulteriore miglioramento potrebbe riguardare la gestione della portata del fluido termovettore. L'impiego di pompe modulanti controllate da inverter consentirebbe infatti una regolazione più precisa del flusso d'acqua, permettendo sia di ampliare il numero di condizioni operative investigabili sia di migliorare il controllo delle fasi di carica e scarica dell'accumulo. Questo aspetto risulta particolarmente importante nei sistemi con PCM, nei quali anche variazioni relativamente contenute della portata possono influenzare in maniera significativa l'efficacia dello scambio termico. Dal punto di vista costruttivo, ulteriori sviluppi potrebbero riguardare il miglioramento dell'isolamento termico del serbatoio e delle tubazioni. Durante le prove più lunghe sono infatti emerse maggiori dispersioni termiche, che hanno influenzato l'andamento delle temperature e la stabilità complessiva del sistema. Un isolamento più uniforme ed efficace permetterebbe di ridurre tali effetti e di ottenere condizioni sperimentali maggiormente controllate.

Un altro possibile sviluppo riguarda l'ampliamento della strumentazione di misura. L'integrazione di ulteriori sensori di temperatura o di sistemi di acquisizione più avanzati consentirebbe di monitorare in maniera più dettagliata l'evoluzione termica all'interno dell'accumulo, migliorando la comprensione dei fenomeni di carica e scarica del PCM e permettendo un'analisi più accurata delle stratificazioni termiche interne.

Infine, un naturale proseguimento del lavoro potrebbe essere rappresentato dallo sviluppo di un modello numerico del sistema sperimentale, validato sui dati ottenuti durante le prove. Un approccio di questo tipo consentirebbe di analizzare il comportamento dell'accumulo in condizioni operative differenti rispetto a quelle investigate sperimentalmente, riducendo tempi e costi delle campagne sperimentali e fornendo uno strumento utile per future attività di ottimizzazione e progettazione.

6.3 Prospettive future dei PCM e applicazioni reali

Oltre al miglioramento dell'apparato sperimentale, lo sviluppo futuro dei sistemi di accumulo latente richiede una riflessione più ampia sull'evoluzione dei materiali a cambiamento di fase e sulla loro effettiva applicabilità su scala reale. Il passaggio da un prototipo di laboratorio a un sistema utilizzabile in ambito civile o industriale non dipende infatti soltanto dalle prestazioni energetiche misurate durante una singola prova, ma anche da aspetti quali durabilità, affidabilità nel tempo, sicurezza, costo e sostenibilità del materiale impiegato.

Un primo tema riguarda la stabilità del PCM dopo un numero elevato di cicli di fusione e solidificazione. In applicazioni reali, un accumulo termico è chiamato a funzionare per anni, spesso con cicli giornalieri o stagionali. Diventa quindi fondamentale verificare che il materiale mantenga nel tempo le proprie proprietà termofisiche, senza riduzione significativa del calore latente, variazioni della temperatura di transizione o fenomeni di degradazione. Allo stesso modo, assume grande importanza la resistenza del sistema di incapsulamento, che deve garantire il contenimento del materiale anche in presenza di dilatazioni volumetriche, sollecitazioni termiche ripetute e possibili fenomeni di corrosione o incompatibilità chimica.

Un secondo aspetto riguarda la sostenibilità complessiva dei materiali utilizzati. La ricerca più recente si sta orientando anche verso PCM di origine naturale o bio-based, con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale dei sistemi di accumulo e limitarne la dipendenza da materiali derivati dal petrolio. In questa prospettiva, non è sufficiente valutare solo la capacità di accumulo del materiale, ma diventa necessario considerare anche disponibilità delle materie prime, riciclabilità, sicurezza in fase di esercizio e impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita.

Un'ulteriore prospettiva interessante riguarda l'impiego di sistemi di accumulo ibridi, nei quali diverse tipologie di materiale a cambiamento di fase vengano integrati nella stessa

configurazione. Soluzioni di questo tipo permetterebbero di combinare la semplicità e l'affidabilità degli accumuli tradizionali ad acqua con la maggiore densità energetica offerta dai PCM. In questo modo sarebbe possibile ottenere sistemi più flessibili, capaci di lavorare in un intervallo di temperature più ampio e di adattarsi meglio a richieste termiche variabili.

Infine, per favorire una diffusione più ampia dei PCM, sarà necessario lavorare anche sugli aspetti economici e progettuali. La tecnologia, pur essendo promettente, deve risultare competitiva rispetto agli accumuli sensibili tradizionali, che rimangono più semplici, economici e consolidati. Per questo motivo, gli sviluppi futuri dovranno puntare non solo all'aumento delle prestazioni, ma anche alla semplificazione costruttiva, alla standardizzazione dei moduli e alla riduzione dei costi di produzione e manutenzione.

In questo senso, i PCM rappresentano una tecnologia con buone prospettive di sviluppo, ma il loro impiego su larga scala richiederà un approccio integrato, in grado di considerare contemporaneamente prestazioni termiche, affidabilità, sostenibilità e convenienza economica.

6.4 Conclusioni

Il lavoro presentato in questo elaborato di tesi ha avuto come obiettivo lo studio sperimentale delle potenzialità offerte dai materiali a cambiamento di fase (PCM) applicati ai sistemi di accumulo termico, con particolare attenzione all'incremento dell'energia termica accumulabile e alla variazione delle prestazioni del sistema rispetto a un accumulo sensibile tradizionale.

Le prove sperimentali sono state condotte su un accumulo termico da 146 litri equipaggiato con 200 moduli di PCM ATS31, caratterizzato da un intervallo di cambiamento di fase compatibile con le temperature operative investigate. L'analisi è stata sviluppata confrontando il comportamento del sistema in configurazione STES (solo accumulo sensibile ad acqua) e LTES (accumulo latente con PCM), variando sia la portata massica del fluido termovettore sia il salto termico imposto tra temperatura iniziale dell'accumulo e temperatura di ingresso.

Sono stati realizzati due distinti set di prove sperimentali di scarica dell'accumulo:

- un primo set con $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, caratterizzato da temperatura iniziale dell'accumulo pari a circa $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ e temperatura di ingresso prossima a $19\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- un secondo set con $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, con temperatura iniziale dell'accumulo di circa $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ e temperatura di ingresso prossima a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Per ciascun valore di ΔT sono state investigate tre portate differenti: 65, 130 e 260 kg/h, corrispondenti rispettivamente a circa 0.44, 0.89 e 1.78 vol/h. Per ogni condizione operativa sono state eseguite due prove, una in configurazione STES e una in configurazione LTES, per un totale complessivo di 12 prove sperimentali.

L'analisi dei risultati ha evidenziato in maniera chiara il contributo positivo del PCM ATS31 sulle prestazioni dell'accumulo termico. In tutte le configurazioni analizzate, il sistema LTES ha prodotto un incremento significativo dell'energia termica erogata. Per le prove a $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'aumento dell'energia totale restituita dal sistema LTES rispetto al sistema STES è risultato compreso tra circa +40% e +52%. Nel caso delle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, il beneficio energetico è stato ancora più marcato, con incrementi variabili tra circa +76% e +88%.

I valori di densità di energia hanno confermato lo stesso andamento, evidenziando come l'introduzione del PCM consenta di aumentare significativamente la quantità di energia accumulabile a parità di volume dell'accumulo.

Dal punto di vista della durata della scarica la configurazione LTES ha mostrato delle durate significativamente superiori rispetto a quelle dell'equivalente sistema STES. Nel caso delle prove a $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'incremento percentuale della durata della scarica è risultato compreso tra circa +52% e +104. Per le prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'effetto del PCM è risultato ancora più evidente, con incrementi della durata compresi tra circa +144% e +242%. In particolare, il massimo prolungamento temporale della scarica è stato osservato alla portata di 260 kg/h, dove la durata della prova è passata da circa 67.5 minuti nel caso STES a circa 231 minuti nel caso LTES. Per quanto riguarda la potenza media, i risultati hanno invece mostrato una riduzione progressiva nel passaggio da configurazione STES a configurazione LTES. Tale riduzione risulta contenuta alle basse portate e diventa più marcata all'aumentare della portata massica. Nelle prove a $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, il decremento della potenza media è risultato compreso tra circa -11% e -29%, mentre nelle prove a $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ la riduzione è variata tra circa -35% e -46%.

Questo comportamento è attribuibile alle caratteristiche intrinseche dello scambio termico con PCM: all'aumentare della portata, infatti, il fluido attraversa più rapidamente l'accumulo riducendo il tempo disponibile per il trasferimento termico. Considerando inoltre la limitata

conducibilità termica del PCM rispetto all'acqua, il rilascio del calore latente tende a distribuirsi su intervalli temporali più lunghi, determinando una diminuzione della potenza media ma un contestuale aumento della durata della scarica.

Dal punto di vista qualitativo, l'analisi dei profili termici ha evidenziato chiaramente la presenza del cambiamento di fase nelle prove LTES. In particolare, l'appiattimento delle curve di temperatura osservato in corrispondenza dell'intervallo di solidificazione del PCM rappresenta una manifestazione diretta del rilascio di calore latente da parte dell'ATS31. Nelle prove a $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, tale fenomeno è apparso più netto e localizzato, con plateau termici maggiormente evidenti soprattutto nelle zone intermedie e superiori dell'accumulo. Nelle prove a $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$, invece, l'effetto si è manifestato in modo più graduale, mostrando più frequentemente traslazioni delle curve verso destra piuttosto che veri e propri tratti isotermi. Questo comportamento è legato al minore salto termico tra fluido e PCM, che rende il processo di solidificazione più lento e distribuito nel tempo. È stato inoltre osservato che, all'aumentare della portata, gli effetti grafici associati al cambiamento di fase tendono progressivamente a ridursi. Alle portate elevate, infatti, il rapido attraversamento del fluido all'interno dell'accumulo produce scambi termici più intensi ma più brevi, causando un raffreddamento accelerato degli strati inferiori e una minore evidenza dei plateau isotermi.

Nel complesso, i risultati sperimentali confermano che l'impiego del PCM ATS31 migliora significativamente le prestazioni dell'accumulo termico, aumentando l'energia complessivamente erogata e consentendo un rilascio di calore più stabile e prolungato durante la scarica. I benefici risultano particolarmente evidenti nelle condizioni caratterizzate da basse portate e ridotti salti termici, dove il contributo del calore latente riesce a manifestarsi in modo più efficace e stabile nel tempo.

L'utilizzo di sistemi LTES rappresenta quindi una soluzione promettente per incrementare la capacità di accumulo termico e migliorare la gestione energetica degli impianti, soprattutto in applicazioni dove sia preferibile privilegiare continuità e autonomia termica rispetto a elevati picchi di potenza istantanea.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fleischer, Amy S." Thermal energy storage using phase change materials: fundamentals and applications. "Springer, 2015.
- [2] L. Gabriela Socaciu (2012) 'Thermal Energy Storage With Phase Change Materials'. Leonardo Electronic Journal Of Practices And Technologies.
- [3] K. Pielichowska, K. Pielichowski (2014) 'Phase Change Materials For Thermal Energy Storage'. Progress In Material Science.
- [4] https://it.wikipedia.org/wiki/Cloruro_di_calcio
- [5] https://it.wikipedia.org/wiki/Solfato_di_sodio
- [6] H. Zhang, J. Baeyens, G. Caceres, J. Degreve, Y. Lv (2016) 'Thermal Energy Storage: Recent Developments And Practical Aspects'. Progress In Energy And Combustion Science.
- [7] J. C. Hadorn (2008) 'Advanced storage concepts for active solar energy'. IEA SHC Task 32. In: Eurosun—1st 479 International Conference on Solar Heating Cooling and Buildings.
- [8] C. Prieto, L.F. Cabeza (2019), 'Thermal energy storage (TES) with phase change materials (PCM) in solar power plants (CSP). Concept and plant performance'. Applied Energy.
- [9] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, D. Quenard (2006), 'Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material'. Energy And Buildings.
- [10] <https://tecnologiaanzi.blogspot.com/2017/11/lenergia-solare.html>
- [11] A.M. Abdulateef, S. Mat, J. Abdulateef, K. Sopian, A.A. Al-Abidi (2018), 'Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review'. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [12] A. Trp, K. Lenic, B. Frankovic (2006), 'Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit'.
- [13] L. Pan, Q. Tao, S. Zhang, S. Wang. J. Zhang, S. Wang, Z. Wang, Z. Zhang (2012), 'Preparation, characterization and thermal properties of micro-encapsulated phase change materials'.
- [14] M. I. Khan, F. Asfand, S. G. Al-Ghamdi (2023), 'Progress in research and development of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar power'. Applied Thermal Engineering.

- [15] J. Kosny ,K. Biswas,W. Miller,S. Kriner(2012) 'Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink'. Solar Energy 86.
- [16] A. De Gracia, L. F. Cabeza (2015), 'Phase change materials and thermal energy storage for buildings'. Energy And Buildings.
- [17] M. C. Rodriguez-Hidalgo, P. A. Rodriguez-Aumente, A. Lecuona, M. Legrand, R. Ventas (2012), 'Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank'. Applied Energy.
- [18] A. H. Abedin, M. A. Rosen (2011), 'A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems'. The Open Renewable Energy Journal.
- [19] I. G. Goncalves, L. C. Simoes, M. Simoes, 'Legionella Pneumophila'.
- [20] <https://heatstixx.de>
- [21] <https://www.axiotherm.de/en/produkte/axiotherm-pcm/>
- [22] <https://www.axiotherm.de/en/produkte/axiotherm-pcm/>
- [23] <https://www.axiotherm.de/en/produkte/heatstixx%C2%AE/>
- [24] <https://www.keysight.com/it/en/home.html>
- [25] <https://www.ni.com/en.html>