

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Energetica

Corso di Laurea Magistrale
in Progettazione Termotecnica e Uso Razionale
dell'Energia

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Studio di fattibilità di un accumulo
termico con PCM in ambito
teleriscaldamento



Relatore

Prof. Vittorio Verda

Candidato

Marocco Daniele

Ottobre 2018

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Obiettivi della tesi	5
1.2	i-TES	7
2	TES - Accumulo termico	8
2.1	Benefici dell'accumulo termico	11
2.2	Tipologie di accumulo termico	12
2.2.1	In base alla durata	12
2.2.2	In base al meccanismo	16
2.2.3	In base al livello di temperatura	20
2.2.4	In base al ruolo dell'accumulo	21
2.3	Figure di merito per la scelta	23
2.4	Limitazioni	26
3	Phase Change Material	28
3.1	Classificazione	30
3.1.1	Composti Inorganici	30
3.1.2	Composti Organici	32
3.1.3	Eutettici	33
3.2	Caratteristiche	34
3.3	Tecniche di miglioramento dello scambio termico	38
3.3.1	Macroincapsulamento	38
3.3.2	Microincapsulamento	38
3.3.3	Incremento della conducibilità termica	39

4	Il teleriscaldamento come risorsa energetica	40
4.1	Struttura	42
4.2	Funzionamento	44
5	Descrizione dello studio	47
5.1	Analisi preliminare	47
5.2	Specifiche cliente	48
5.3	Dimensionamento su dati di targa	51
6	Attività di laboratorio	54
6.1	Descrizione della strumentazione	54
6.1.1	Componenti principali	55
6.1.2	Strumenti di controllo e regolazione	57
6.2	Descrizione del metodo	59
6.2.1	Circuito 1	59
6.2.2	Circuito 2	62
6.2.3	Circuito 3	63
6.3	Descrizione dell'analisi dei dati	66
6.3.1	Perdite al Serbatoio di accumulo	67
6.3.2	Perdite allo Scambiatore	68
6.3.3	Perdite al Radiatore	69
6.3.4	Conducibilità termica del PCM	70
6.3.5	Calore latente di fusione	72
6.3.6	Efficienza di scarica	73
6.4	Risultati ottenuti	74
6.4.1	Bilancio Energetico sul Circuito 1	74
6.4.2	Caratterizzazione del PCM72	76
6.4.3	Simulazione del sistema reale	78
7	Studio di fattibilità	84
7.1	Schema dell'impianto	84
7.2	Dimensionamento su dati di laboratorio	87
7.2.1	Soluzione con scambio diretto	88
7.2.2	Soluzione con incapsulamento	90

7.3	Controllo e regolazione	92
8	Conclusioni	94
	Lista dei simboli	95
	Bibliografia	97
	Sitografia	99

Elenco delle figure

1.1	Fonti di energia primaria	2
1.2	Produzione dell'energia in Italia	3
2.1	Articoli scientifici a tema PCM in Italia	8
2.2	Paesi con ricerche in ambito TES e PCM	9
2.3	Funzionamento TES	10
2.4	Tipologie TES	12
2.5	Stagno solare	13
2.6	Accumulo integrato in un impianto a collettori solari	15
2.7	Cattiva stratificazione in un accumulo	16
2.8	Metodi per il TES; (a) Sensibile (b) Latente (c) Chimico	17
2.9	Reazione di assorbimento	18
2.10	Configurazione in accumulo diretto	21
2.11	Configurazione in accumulo indiretto	23
2.12	Vaso di Dewar	27
3.1	Applicazione in ambito edilizio di un PCM	29
3.2	Classificazione PCM	30
3.3	Sottoraffreddamento in un sale idrato	31
3.4	Trasformazione di interesse per TES	34
3.5	Curva Flusso termico-Temperatura per DSC	36
3.6	Proprietà termiche di differenti PCM	37
3.7	Esempio di macroincapsulamento	39
3.8	Esempio di microincapsulamento	39
4.1	Risparmio di energia primaria	41

4.2	Riduzione delle emissioni di CO_2	41
4.3	Struttura ad albero	43
4.4	Struttura a maglia	43
4.5	Costi di pompaggio e investimento al variare della velocità nei tubi	46
5.1	Curva di carico ante e post accumulo	48
6.1	Componenti principali	56
6.2	Strumentazione di controllo e regolazione	58
6.3	Circuito 1	60
6.4	Profilo della temperatura media nel serbatoio	61
6.5	Circuito 2	63
6.6	Circuito 3	64
6.7	Misura della velocità dell'aria con anemometro	69
6.8	Sezione reale e sezione di studio	70
6.9	Bilancio energetico Circuito 1	75
6.10	Prove per calore latente PCM 72 °C	76
6.11	Prove per conducibilità PCM 72 °C	77
6.12	Curva delle temperature lato secondario	79
6.13	Riproduzione rampa di salita del 27/09	82
6.14	Riproduzione rampa di salita del 28/09	83
7.1	Schema di riferimento per la sottostazione	85
7.2	Schema della sottostazione con integrazione accumulo	86
7.3	Schema controllo e regolazione	92

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto figure di merito per TES sensibile, latente e termochimico . . .	25
3.1	Trasformazioni di fase per PCM	28
5.1	Risultato analisi PCM	50
5.2	Calcoli con PCM inorganico	52
5.3	Calcoli con PCM bio-organico	52
6.1	Componenti principali	55
6.2	Strumentazione di controllo e regolazione	57
6.3	Legenda simboli Circuito 3	66
6.4	Carica con resistenza e scarica forzata con radiatore sul Circuito 1 . . .	75
6.5	Efficienza di scarica	78
6.6	Potenza minima per riprodurre la rampa reale	80
6.7	Riproduzione della rampa di carica reale	81
7.1	Fattore moltiplicativo in modalità scambio diretto	88
7.2	Dimensionamento con scambio diretto	89
7.3	Fattore moltiplicativo in modalità incapsulamento	90
7.4	Dimensionamento con incapsulamento	91

Capitolo 1

Introduzione

L'energia è sempre stata una fonte imprescindibile per lo sviluppo e il progresso della società umana, a partire dalle piccole applicazioni ad uso personale fino ai grandi progetti coinvolgenti intere nazioni; ma l'energia, intesa come prodotto di un processo di combustione dei combustibili tradizionali, è anche una risorsa limitata: per questo motivo, consapevoli dell'importante aspetto dell'impatto ambientale che questi processi provocano, negli ultimi decenni si è passati da un comportamento poco attento alle limitazioni dei consumi e al giusto uso delle risorse energetiche a un atteggiamento più cauto e volto al risparmio, o quantomeno con l'obiettivo di massimizzare la risorsa estraibile dalla fonte primaria. Questi due concetti si traducono, in termini più concreti, rispettivamente in *meno sprechi* e *maggior efficienza*. Allo stesso modo essi sono sintomo di una minor richiesta di energia primaria, o, a parità di energia primaria consumata, di una maggior quantità di energia disponibile in uscita; il trend degli ultimi anni è proprio quest'ultimo e, come si nota in figura 1.1, il recente incremento di energia primaria deve essere considerato alla luce del continuo sviluppo al quale l'Italia va incontro. Nonostante la richiesta di energia sia in aumento, l'energia primaria utilizzata rimane agli stessi livelli degli anni precedenti, durante i quali però l'energia in uscita era minore; il tutto si traduce con il concetto di una migliorata efficienza.

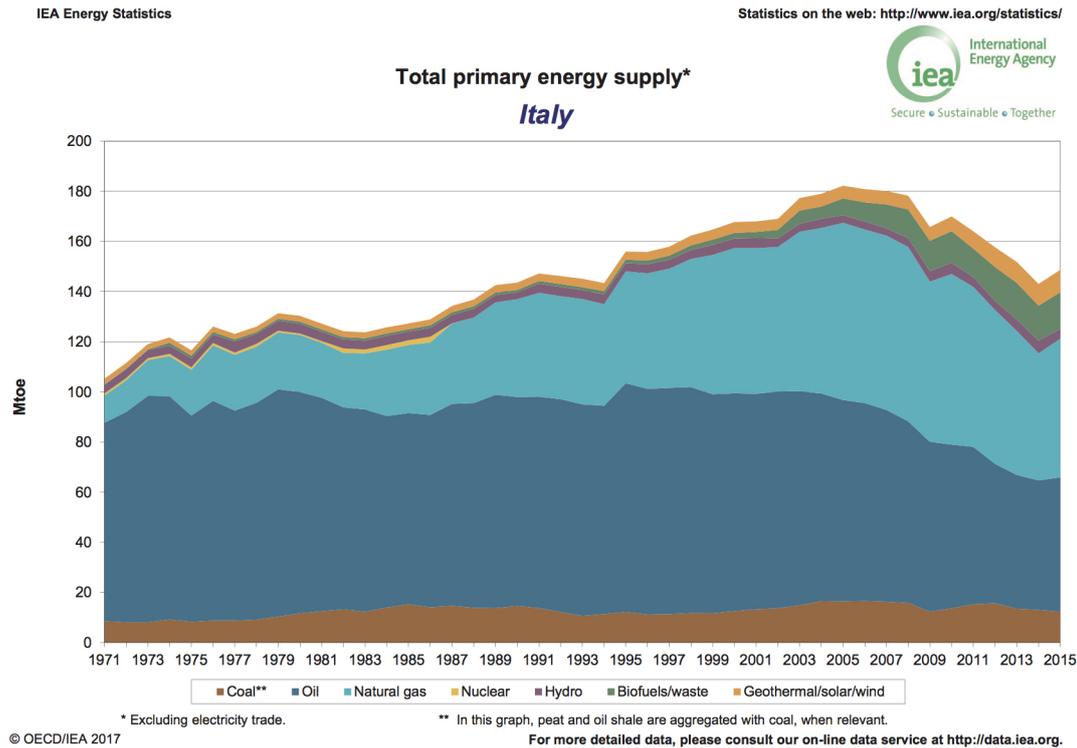


Figura 1.1: *Fonti di energia primaria [1, Sitografia]*

In parallelo si è pensato di sostituire la fonte primaria dell'energia con risorse che non avessero il problema dell'esaurimento, le cosiddette fonti rinnovabili. Esse sono definite così in quanto non derivano da processi che richiedono milioni di anni per dare il prodotto finale (contrariamente ai combustibili tradizionali, che sono il risultato di lunghe e complicate trasformazioni di elementi organici inerti) e che, per la scala temporale di interesse, sono considerabili "infinite". Le fonti rinnovabili di maggior interesse e diffusione, attualmente, prevedono l'utilizzo dell'energia solare (tramite pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica o pannelli solari per la produzione di acqua calda), dell'energia del vento e della biomassa. Quest'ultima è considerata una risorsa rinnovabile in quanto il bilancio dell'anidride carbonica che essa comporta è nullo: l'ipotesi di base è che il processo di combustione della biomassa immetta in ambiente una equivalente quantità di CO_2 che la stessa aveva precedentemente assorbito con il processo di fotosintesi.

Il mercato delle fonti rinnovabili ha conosciuto una forte espansione che, a sua volta, ha portato a un accessibile costo di acquisto e installazione di questi sistemi, in modo tale da renderli competitivi rispetto a quelli tradizionali. La forte espansione

del settore del rinnovabile è chiaramente visibile in figura 1.2, dove si osserva come la quota di produzione da energia rinnovabile abbia ormai superato quella derivante da gas naturale e combustibili liquidi.

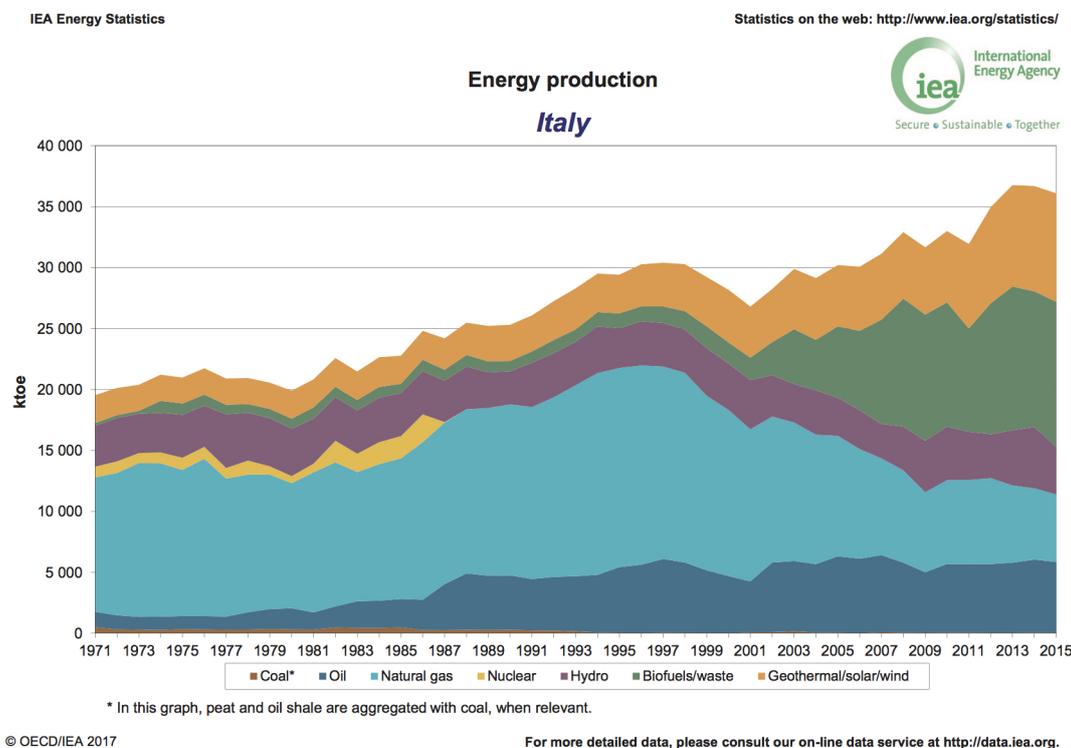


Figura 1.2: *Produzione dell'energia in Italia [2, Sitografia]*

Nonostante questo aspetto, che per l'avanzamento di una tecnologia è di fondamentale importanza, spesso le fonti rinnovabili sono caratterizzate da uno sfasamento tra il momento della disponibilità e il momento dell'utilizzo dell'energia, che comporta un parziale inutilizzo della risorsa disponibile, la quale deve quindi essere integrata da un sistema tradizionale; si è tornati pertanto al problema di partenza, ovvero la necessità di utilizzare fonti non rinnovabili. La soluzione ideale per sopperire a questo problema sta nell'accumulare l'energia quando questa è disponibile, conservarla minimizzando (o preferibilmente annullando) le perdite e rilasciarla nel momento di richiesta da parte dell'utenza. Quello appena descritto è il principio di funzionamento di un *accumulo termico*. Dal momento che lo scopo dell'accumulo è quello di immagazzinare energia termica, calda o fredda a seconda delle applicazioni e degli usi, esso si pone a un livello più in alto rispetto alla tecnologia che sta alla base della produzione dell'energia: una volta studiato il sistema più efficiente, questo potrà essere usato in qualsiasi tipo di

applicazione, purché compatibile con le caratteristiche dell'impianto in cui dovrà essere installato. Come riportato in [1, Bibliografia] pag.1, in Europa è stato stimato un risparmio di 1.4 GWh/anno e di 400 milioni di tonnellate di emissioni di CO_2 dovuto a un uso più estensivo dell'accumulo caldo e freddo sia nel settore residenziale sia in quello industriale. L'accumulo termico è un aspetto già molto conosciuto e studiato, di cui è presente una letteratura molto ampia; si cita ad esempio [2, Bibliografia], Ibrahim Dinçer, Marc A. Rosen - Thermal Energy Storage: systems and applications.

L'accumulo termico sfrutta la capacità dei materiali di assorbire e immagazzinare energia termica tramite due processi distinti e caratterizzati da livelli energetici molto diversi:

- *Accumulo sensibile*: è l'accumulo di energia termica che provoca un innalzamento della temperatura del materiale. La quantità accumulabile è funzione della massa m del materiale, del suo calore specifico c e del salto di temperatura ammissibile senza che avvenga cambiamento di fase ΔT_{sens} . Una volta noti tutti questi dati è possibile calcolare l'energia accumulata come

$$E_{sens} = \int_{T_i}^{T_f} mc dT = m\bar{c}\Delta T_{sens} \quad [J] \quad (1.1)$$

- *Accumulo latente*: è l'accumulo di energia termica che provoca il cambiamento di fase del materiale. La quantità accumulabile è funzione della massa m e del salto entalpico che è necessario fornire per far avvenire il cambiamento di fase $\Delta h_{fusione}$.

L'energia accumulata sotto forma di calore latente vale

$$E_{lat} = \int_{T_i}^{T_m} mc dT + mf\Delta h_{fusione} + \int_{T_m}^{T_f} mc dT \quad [J] \quad (1.2)$$

1.1 Obiettivi della tesi

Lo scopo del presente lavoro è quello di progettare un accumulo termico tramite materiale a cambiamento di fase (PCM) da utilizzare come backup e integrazione di energia termica derivante dal collegamento con una sottostazione del teleriscaldamento. Lo studio prevede la scelta del materiale che meglio si adatta alle specifiche richieste dal committente (vincoli sulle tempistiche di carica/scarica, temperatura, carichi d'incendio, capacità di accumulo) parallelamente alla disponibilità di mercato e ai risultati sperimentali ottenuti in laboratorio.

Di seguito si espone schematicamente il susseguirsi dei diversi capitoli sviluppati nell'elaborato completi di una breve spiegazione dei contenuti.

- *Accumulo termico*: benefici, tipologie, limitazioni. Una *overview* delle principali tecnologie che si occupano di soddisfare questo aspetto, dalle più conosciute e tradizionali a quelle innovative. Ragionando in termini di efficienza, l'accumulo termico è inevitabilmente associato a perdite, ovvero efficienza <1 . Una valida alternativa, ancora in fase di ricerca, è rappresentata dall'accumulo termochimico, il quale sfrutta reazioni chimiche per accumulare energia termica senza perdite, ad efficienza unitaria.
- *Accumulo tramite PCM*: trattazione più dettagliata della tecnologia che sarà utilizzata per lo studio successivo.
- *Teleriscaldamento*: in un'ottica di minor impatto ambientale e consumi contenuti, risulta essere una soluzione ottimale; sostituisce le unità di produzione delle singole abitazioni con una sola unità ad alta efficienza munita di sofisticati sistemi di abbattimento degli inquinanti.
- *Descrizione dello studio*: paragrafo dedicato alle specifiche richieste dall'utenza; il sistema sarà oggetto di un primo dimensionamento frutto dei dati di targa sia lato teleriscaldamento sia lato PCM.
- *Lavoro di laboratorio*: paragrafo dedicato all'esposizione dei risultati ottenuti presso il laboratorio di i-TES, in cui differenti PCM e tipologie di accumulo sono state testate al fine di stabilire i reali trend di funzionamento e definire la soluzione che garantisce la più alta performance.

- *Studio di fattibilità*: a fronte dei risultati ottenuti dalle prove sperimentali si propone un prototipo che possa essere utilizzato come base di partenza per test in condizioni di funzionamento reali.
- *Conclusioni*: in questo capitolo si riporta un breve riepilogo del lavoro svolto, al termine del quale si è in grado di chiudere il percorso logico che è stato alla base di tutti i ragionamenti proposti.

1.2 i-TES

Il lavoro di tesi magistrale condotto è stato svolto in collaborazione con i-TES, una società incubata presso il 2i3t (incubatore dell'Università di Torino) e con sede operativa nei laboratori della Facoltà di Chimica. La società i-TES, grazie alla sua ampia competenza in ambito della gestione dell'energia tramite *Phase Change Material* (PCM) è iscritta dal Marzo 2017 nel registro delle imprese delle *Start up* innovative, ed è anche una delle poche realtà italiane a occuparsi della materia in esame.

i-TES sviluppa e perfeziona impianti di accumulo termico innovativi realizzati attraverso l'utilizzo di materiali a cambio di fase, risultato frutto di un precedente approfondito studio sulle diverse possibilità che il problema pone, le quali vengono testate nel laboratorio presente in sede; laboratorio che permette di simulare cicli di carica/scarica dell'energia termica da cui è successivamente possibile risalire ai trend tipici del materiale scelto.

Capitolo 2

TES - Accumulo termico

L'accumulo termico, nonostante sia un argomento già molto conosciuto e sviluppato, desta ancora molto interesse, soprattutto alla luce di quanto detto nel capitolo introduttivo. I benefici che è in grado di apportare sia a livello economico sia ambientale hanno spinto la ricerca oltre i tradizionali sistemi ad acqua, e il trend di questi studi sta continuando a crescere. Come è possibile vedere dalla figura 2.1, il numero di documenti con parola chiave PCM, da quanto disponibile con il mezzo di ricerca SCOPUS, ha avuto un trend di crescita decisamente spiccato a partire dai primi anni del nuovo Millennio. L'interesse per l'argomento, nonostante negli ultimi anni (2016-2018) abbia presentato un calo rispetto agli anni precedenti, rimane comunque di alto livello, confermato dalla stesura di oltre 75 articoli che trattano la materia.



Figura 2.1: *Articoli scientifici a tema PCM in Italia*

La figura 2.2 rappresenta i Paesi che più si occupano degli argomenti trattati nel presente elaborato, ovvero TES e PCM. Si nota una netta predominanza della Spagna, seguita da Cina e Stati Uniti. L'Italia, anche se non ricopre un ruolo di primaria importanza, è comunque al di sopra di Paesi come Germania e Svezia, da sempre all'avanguardia con le nuove tecnologie. Un aspetto che si considera interessante far notare, è come l'argomento non sia limitato a una zona ristretta, ma anzi è uniformemente distribuito a livello globale: non a caso le prime 3 posizioni sono occupate da Paesi che rappresentano 3 diversi continenti (Europa, Asia, America).

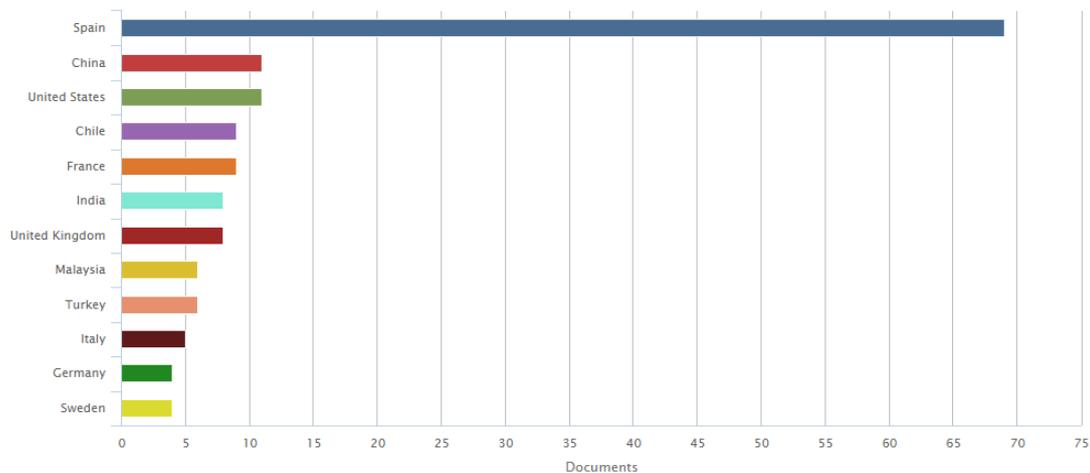


Figura 2.2: Paesi con ricerche in ambito TES e PCM

Il principio alla base del funzionamento di un accumulo termico è indipendente dalla tipologia di applicazione a cui deve essere collegato: il sistema in esame deve essere in grado di accumulare l'energia in eccesso derivante dal processo in analisi, conservarla minimizzando le perdite e rilasciarla nel momento in cui è richiesta. A livello schematico è possibile rappresentarlo come proposto in figura 2.3.

Dal momento che la quantità Q_I sta entrando nel sistema, l'esempio riportato è caratteristico di un accumulo freddo; lo stesso sistema potrebbe rappresentare un accumulo caldo nel momento in cui il verso del flusso termico esterno fosse rivolto in senso opposto, ovvero dall'accumulo verso l'ambiente. Come si rileva da questo semplice esempio, una delle caratteristiche più negative degli accumuli termici tradizionali è la presenza inevitabile di perdite. Lo scambio termico è infatti possibile tramite le tre ben note metodologie: conduzione, convezione e irraggiamento. Mentre i primi due contributi sono resi trascurabili applicando un buon isolamento termico, per il ter-

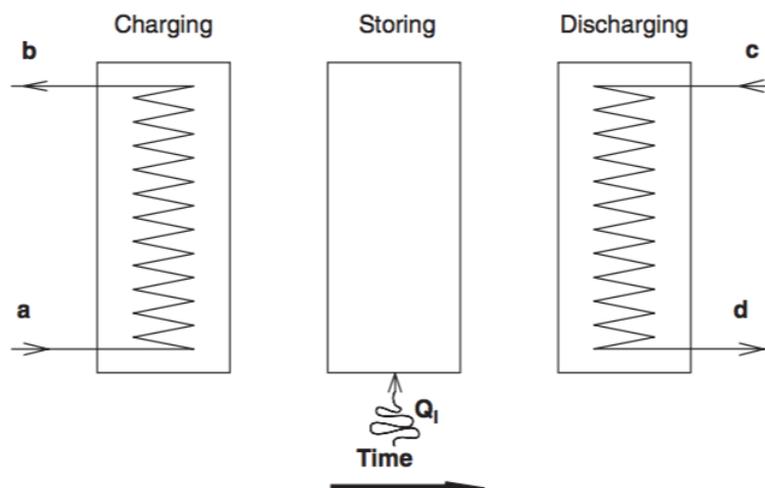


Figura 2.3: *Funzionamento TES [2, Bibliografia]*

zo l'unica soluzione possibile per annullarne il contributo è portare la temperatura del sistema allo 0 assoluto, fatto che non è considerabile come opzione. Nei successivi paragrafi si esporranno i principi di funzionamento delle diverse tipologie di TES disponibili sul mercato, si analizzeranno i pro e i contro di queste tecnologie nonché le principali figure di merito che un TES deve avere per poter garantire un corretto funzionamento.

Quando si parla di accumulo termico, tipicamente ci si riferisce al classico sistema ad acqua installato in serie alla caldaia per avere a disposizione sufficiente acqua calda per gli usi domestici. Questo sistema, però, oltre ad essere limitato alla sfera domestica (e quindi residenziale) è, per sua natura, caratterizzato da forti limitazioni. Prima tra tutte l'acqua stessa, la quale, a pressione ambiente, deve essere mantenuta al di sotto dei 100°C per evitarne l'ebollizione; ma l'accumulo termico mira a diventare un componente presente nella maggior parte dei processi che coinvolgono l'utilizzo di energia termica, anche laddove i livelli di temperatura superano di gran lunga il limite dei 100°C dell'acqua, soprattutto in ambito industriale. Il raggiungimento di questo obiettivo è subordinato all'affermazione di quelle tecnologie che utilizzano sostanze diverse dall'acqua.

2.1 Benefici dell'accumulo termico

Affinché una tecnologia possa espandersi e diventare una *baseline* di mercato, necessita di garantire al cliente finale, nonché soggetto investitore, determinati vantaggi che possano ripercuotersi in positivo sul bilancio economico del cliente stesso; se questa condizione è verificata, l'installazione di tale tecnologia comporta un risparmio economico al cliente. A seconda dell'entità del risparmio conseguito, l'investimento impiegherà più o meno tempo per essere completamente ammortizzato. Dal momento immediatamente successivo il cliente ha un risparmio netto, ovvero una quota di denaro che non deve essere più spesa ma che può essere resa disponibile per altri scopi. In termini estremamente semplificati, questo concetto - che prende il nome di *Pay-Back Time* (PBT) - può essere calcolato tramite la seguente formula:

$$PBT = \frac{\text{Investimento}}{\text{Risparmio}} \quad [\text{anni}] \quad (2.1)$$

Il risultato di questo calcolo è una grandezza espressa in anni, la quale rappresenta appunto il periodo necessario alla tecnologia installata di ripagare l'investimento iniziale tramite il risparmio dalla stessa introdotto. Per una valutazione più dettagliata e affidabile bisognerebbe tenere conto di altri aspetti come manutenzione, costi imprevisti, costi di gestione dell'impianto e del futuro smantellamento. L'accumulo termico è in grado di apportare i seguenti aspetti positivi:

- Incremento dell'efficienza globale del sistema
- Maggior disponibilità e flessibilità della risorsa
- Risparmio economico
- Riduzione delle emissioni di inquinanti in ambiente

Affinché un accumulo possa effettivamente portare ai benefici suddetti, deve essere studiato e progettato "ad hoc" per il sistema in cui lo stesso dovrà essere installato; se così non fosse, infatti, si avrebbe un componente che non solo non darebbe i risultati attesi, ma ha influito negativamente sul bilancio economico tramite il costo di acquisto e installazione.

2.2 Tipologie di accumulo termico

Poiché l'accumulo è un concetto molto vasto e vario, a seconda delle necessità dell'impianto in cui occorre installarlo si possono scegliere soluzioni differenti. In figura 2.4 è riportato uno schema dal quale è possibile risalire alle opzioni possibili: infatti la classificazione di un accumulo può essere ottenuta dalla combinazione delle classi riportate; ad esempio, si può avere un accumulo caldo, di durata giornaliera, basata su un processo termico. Ragionando in questo modo si è in grado di implementare la totale varietà di soluzioni.

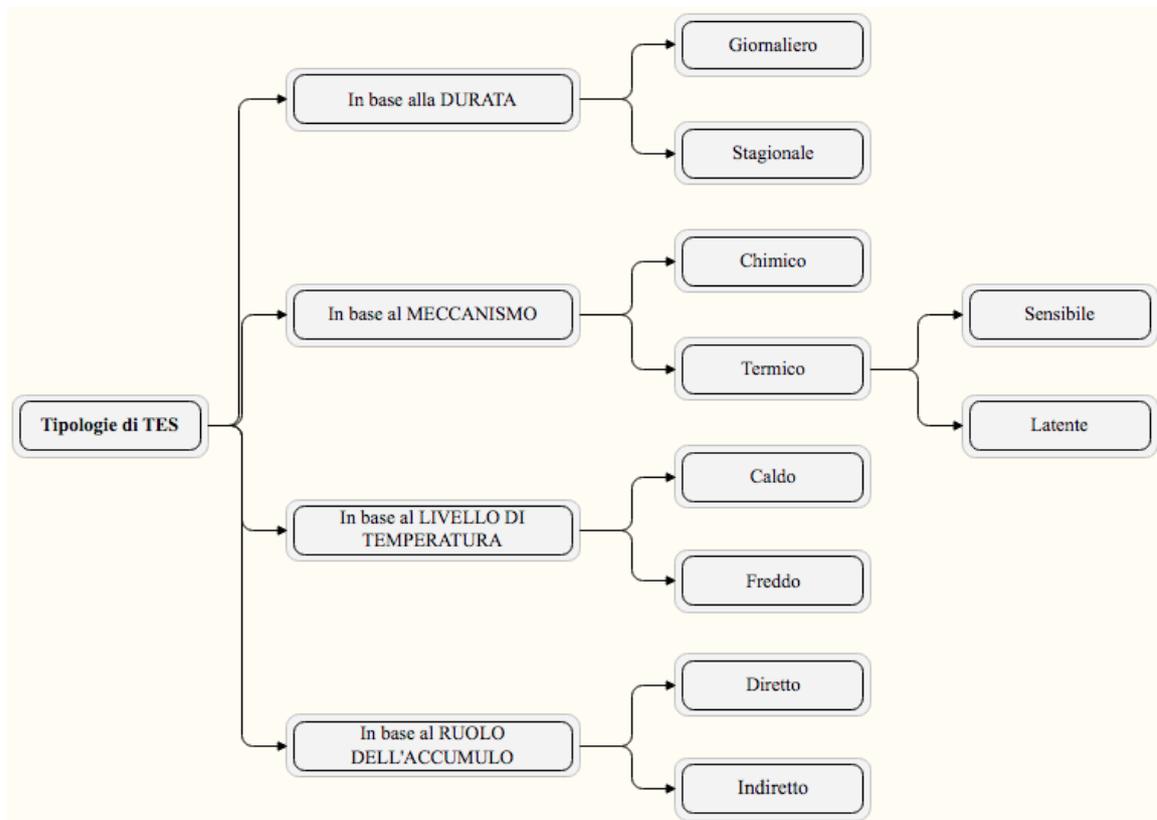


Figura 2.4: Tipologie TES

2.2.1 In base alla durata

Si parla di accumulo *giornaliero* se la carica e la scarica dell'accumulo avvengono con tempistiche brevi (di massimo un paio di giorni), o di accumulo *stagionale* se le due fasi avvengono a distanza di mesi. Quest'ultima tecnologia è riservata a poche e particolari applicazioni, in quanto le problematiche legate alle dispersioni termiche

non ne consentono ancora una diffusione su larga scala. A livello conoscitivo verranno esposte le principali e più conosciute soluzioni per entrambe le categorie.

Accumulo Stagionale

L'accumulo stagionale è progettato per contenere enormi quantità di energia, e di conseguenza anche le dimensioni dell'accumulo sono spesso proibitive; per questo motivo e per le problematiche legate alle dispersioni termiche solitamente i requisiti per un accumulo stagionale sono molto stringenti. Nonostante ciò, laddove siano soddisfatti entrambi questi requisiti, si ha la garanzia di una durata dell'impianto di oltre 20 anni. Tra le diverse tecnologie si cita la soluzione dello stagno solare, semplice ma esaustiva delle caratteristiche di questa categoria.

Stagno solare: questa tecnologia è nata in Israele ed è particolarmente adatta in quelle regioni in cui si ha una forte e continua irradiazione solare e una grande disponibilità di sale a basso costo. Il principio è semplice: la radiazione solare scalda l'acqua dello stagno, il quale presenta tre zone ben distinte a causa della diversa temperatura dell'acqua e del suo grado di salinità. Il sale ha il compito di rendere l'acqua più pesante per evitare che i fenomeni di galleggiamento portino l'acqua calda in superficie dove l'energia termica accumulata verrebbe dispersa per convezione. In figura 2.5 è riportato uno schema esemplificativo di uno stagno solare:

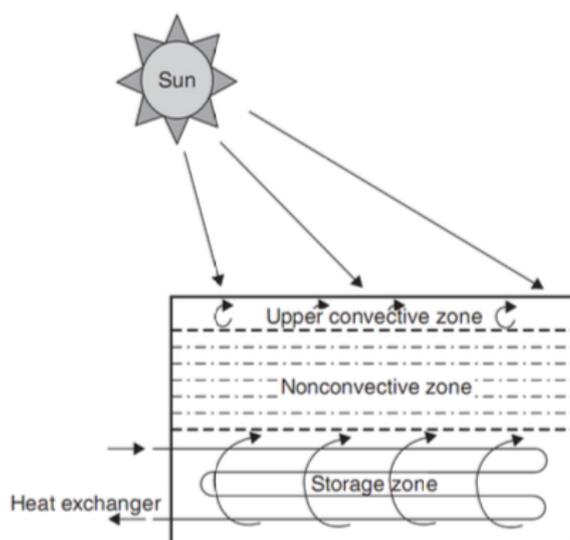


Figura 2.5: *Stagno solare con le tre zone caratteristiche [3, Bibliografia]*

Le tre fasce riportate in figura sono funzione del grado di salinità dell'acqua e hanno le seguenti funzioni:

Upper Convective Zone: è la fascia in cui l'acqua fresca e trasparente, con basso grado di salinità, garantisce il passaggio di una buona quantità di radiazione solare verso gli strati sottostanti.

Non-Convective Zone: è la fascia che permette il funzionamento dell'intero sistema; il suo grado di salinità, infatti, permette alla radiazione solare di attraversarla, impedendo però la fuoriuscita della radiazione infrarossa proveniente dalla fascia inferiore. Questo meccanismo permette il confinamento dell'energia termica calda allo strato inferiore.

Storage Zone: è la fascia con il più alto grado di salinità che controbilancia la diminuzione di densità dovuta all'incremento di temperatura. Questa è la zona in cui si effettua il vero e proprio accumulo termico.

Accumulo Giornaliero

La forma più tradizionale dell'accumulo termico prevede la possibilità di stoccare energia in quantità necessaria a soddisfare il fabbisogno energetico dell'utenza per 1 o 2 giorni al massimo. Le applicazioni per un accumulo giornaliero sono molto vaste, e per esplicitarne il funzionamento e l'integrazione con un impianto esistente, verrà esposto unicamente il caso di accumulo per un impianto solare termico. L'esempio ha il solo scopo di mettere in luce gli aspetti principali di un accumulo di queste dimensioni e i miglioramenti che possono essere apportati per ottimizzarlo. E' necessario ricordare però che, una volta condotta l'analisi su un'applicazione in particolare, i risultati da essa ottenuti possono essere generalizzati per qualsiasi altra applicazione. Lo schema dell'impianto di riferimento è rappresentato in figura 2.6:

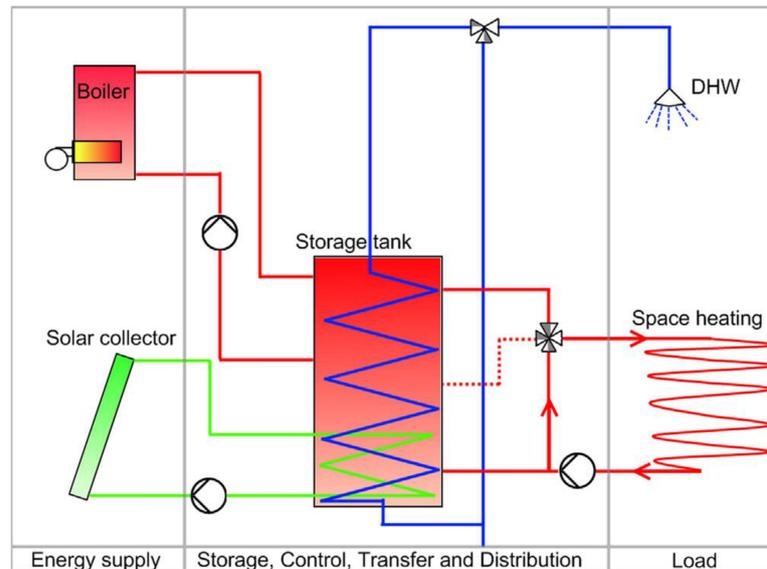


Figura 2.6: *Accumulo integrato in un impianto a collettori solari [1, Bibliografia]*

Nella figura sopra proposta è possibile rilevare la presenza di due sorgenti termiche che prevedono al riscaldamento dell'acqua: il circuito dei collettori solari e il circuito che porta all'integrazione tradizionale con caldaia a metano; quest'ultima è necessaria laddove il TES sia utilizzato anche per il riscaldamento di ambienti, in quanto il solare termico è una sorgente tipicamente a bassa temperatura. Il principio di funzionamento è il seguente: un sensore di temperatura è collocato nel circuito dei collettori solari, dal quale si misura T_1 , mentre un secondo sensore è posizionato all'interno della parte bassa del serbatoio, dal quale si misura T_2 . La centralina attiva la pompa di circolazione quando $T_1 - T_2$ supera i 5°C : a questo punto l'acqua dal serbatoio passa all'interno dei collettori solari e ne esce riscaldata. Sebbene la logica di funzionamento sia molto semplice, anche in questo caso esistono alcune problematiche che rendono difficile un efficiente uso dell'accumulo. Il problema principale per questo tipo di impianto è la cattiva stratificazione provocata dai moti convettivi innescati dall'acqua calda proveniente dai collettori solari; dal momento che un flusso di acqua calda entra in contatto con acqua più fredda, esiste un gradiente di densità che spinge l'acqua calda verso la parte alta dell'accumulo e attira verso il basso l'acqua più fredda. Nel momento in cui anche l'integrazione a caldaia è attiva, questi moti convettivi aiutano a uniformare la temperatura in tutto l'accumulo, annullando definitivamente la stratificazione. Una rappresentazione grafica è riportata in figura 2.7.

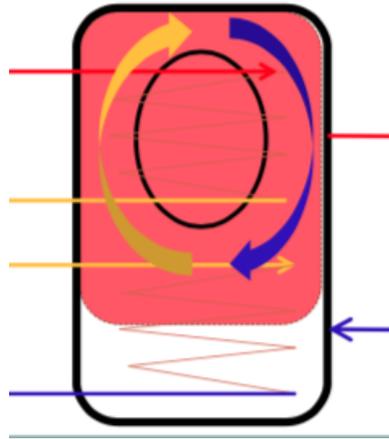


Figura 2.7: Cattiva stratificazione in un accumulatore [3, Bibliografia]

Una possibile soluzione è l'adozione del metodo con tubo a stratificazione: in questo caso l'acqua è immessa dal basso dell'accumulo tramite un tubo centrale ed è fatta salire verso la parte alta; questo tubo presenta dei fori che mettono in comunicazione l'acqua del serbatoio con l'acqua nel tubo. Nel momento in cui la densità (e quindi la temperatura) delle due arriva a coincidere, l'acqua del tubo passa nel serbatoio; se l'acqua in entrata risulta essere la più calda, risalirà tutto l'accumulo e verrà rilasciata nella parte più alta, creando un accumulatore perfettamente stratificato.

2.2.2 In base al meccanismo

Si parla di accumulatore *chimico* se le fasi di carica e scarica sono ottenute tramite reazioni chimiche, o di accumulatore *termico* se queste due fasi sono ottenute sfruttando le proprietà fisiche di un materiale. Quest'ultimo è ulteriormente suddiviso in *sensibile* laddove si sfrutta un incremento di temperatura del materiale o in *latente* quando invece si sfrutta il cambiamento di fase del materiale. Per esplicitare in maniera più chiara questi ultimi concetti si faccia riferimento alla figura 2.8.

In questa sezione si approfondirà brevemente l'aspetto dell'accumulo tramite meccanismi di tipo chimico o termico.

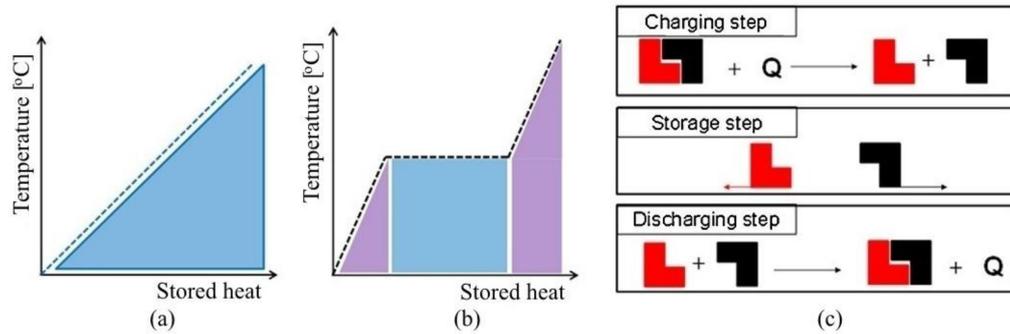


Figura 2.8: *Metodi per il TES [1, Bibliografia]; (a) Sensibile (b) Latente (c) Chimico*

Accumulo Chimico

Quando si parla di accumulo chimico è sottinteso che ciò che si vuole accumulare è sempre energia termica, ma la via per arrivarci sfrutta delle reazioni di tipo chimico tra due materiali. In generale le reazioni di interesse sono reazioni di assorbimento in cui la sostanza A (detta assorbente) e la sostanza B (detta sorbato) interagiscono tra loro grazie a legami fisici deboli, come le forze di Van der Waals o ponti a idrogeno. A seconda che il flusso termico sia in ingresso o in uscita dal sistema la reazione è detta endotermica o esotermica.

La reazione di assorbimento può essere schematizzata nel seguente modo



Lo stato fisico in cui si presentano le due sostanze è diverso a seconda delle applicazioni, ma la soluzione più standard prevede l'assorbente in forma solida e il sorbato (tipicamente acqua) che passa dallo stato liquido a quello vapore e viceversa. Questo tipo di reazioni è possibile in quanto il materiale scelto per l'assorbimento è microporoso, con delle cavità interne che permettono alle molecole del sorbato di depositarsi sulla loro superficie.

Un parametro di fondamentale importanza è la *temperatura di inversione* T^* , definita come la temperatura alla quale la reazione si trova all'equilibrio. In formule questa condizione si verifica nel momento in cui l'energia libera di Gibbs ΔG si annulla

$$\Delta G = \Delta H - T^* \Delta S = 0 \quad (2.2)$$

da cui ricaviamo

$$T^* = \frac{\Delta H}{\Delta S} \quad [K] \quad (2.3)$$

La temperatura di inversione è una grandezza necessaria per stabilire la temperatura minima alla quale deve essere fornita la risorsa calda: se questa è a temperatura minore la reazione non è in grado di avvenire; lo stesso ragionamento, ma a valori invertiti, è valido per la fase di scarica (vedi figura 2.9).

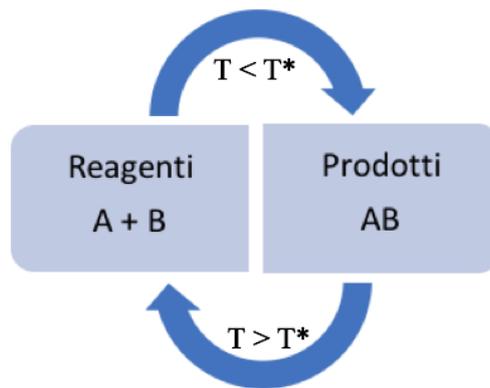


Figura 2.9: *Reazione di assorbimento*

Quando si parla di accumulo chimico tramite reazioni di assorbimento è inevitabile introdurre il concetto di ambiente: esso, infatti, è un componente necessario affinché un accumulo di questo tipo possa essere realizzato. La motivazione principale risiede nella natura della trasformazione, che associa a un flusso di energia termica un flusso di entropia, inevitabile e che, per poter massimizzare la quantità immagazzinabile, deve essere il maggiore possibile; questo aspetto è però in piena contraddizione con il concetto stesso di accumulo, il quale è pensato per essere un sistema ciclabile. L'ambiente è quindi inserito tra la risorsa termica e l'accumulo, al fine di ospitare tutti i flussi di entropia che, per ipotesi, si ritiene non ne alterino lo stato. Poiché questo sistema è di tipo indiretto, una spiegazione più dettagliata sarà fornita nel paragrafo dedicato a questo tipo di accumulo.

Accumulo Sensibile

Per accumulo sensibile si intende un accumulo che sfrutta le proprietà fisiche di un materiale per immagazzinare energia termica a scapito di un innalzamento di temperatura del materiale stesso. Questo tipo di accumulo è il più largamente usato nelle applicazioni più comuni e ha come elemento principale l'acqua: i motivi di questa scelta sono molteplici:

- Ottime proprietà di scambio termico
- Disponibilità a basso costo
- Non è tossica né infiammabile
- Non reagisce chimicamente con i contenitori in cui è inserita; il caso più delicato si ha in concomitanza con serbatoi in metallo, nei quali può avvenire un leggero fenomeno di corrosione

Accumulo Latente

L'accumulo latente è la seconda forma di accumulo che sfrutta le proprietà fisiche di un materiale per immagazzinare energia. A differenza dell'accumulo sensibile, però, tale accumulo non è focalizzato sull'incremento di temperatura, bensì mira a provocare un completo passaggio di fase (solido-liquido tipicamente) del materiale utilizzato. L'attrattiva principale di questo sistema consiste nella quantità di energia che tale processo richiede: paragonando una stessa quantità in massa di materiale per accumulo sensibile e latente, quest'ultimo è in grado di accumulare fino a $\frac{2}{3}$ in più rispetto al corrispettivo sensibile, generando grossi risparmi di volume dell'accumulo. Non meno importante è il fatto che il cambio di fase avviene a temperatura circa costante, aspetto che si rivela di grande importanza in tutte quelle applicazioni in cui è richiesta una sorgente termica poco variabile nel tempo. L'accumulo latente è possibile grazie alla presenza di molteplici sostanze che presentano una temperatura di fusione nel range di interesse per le applicazioni civili e industriali. Dal momento che il capitolo 3 sarà interamente dedicato ai PCM, si rimanda l'approfondimento in merito all'accumulo latente alla sezione successiva.

2.2.3 In base al livello di temperatura

La classificazione prevede l'accumulo *caldo* quando lo scopo finale dell'accumulo è fornire energia termica ad alta temperatura, ad esempio per riscaldamento degli ambienti, produzione di ACS o per usi industriali. Si parla invece di accumulo *freddo* laddove l'energia termica deve essere fornita a bassa temperatura, come in processi di conservazione alimentare, climatizzazione o processi industriali.

Accumulo Caldo

L'accumulo caldo è la forma più frequente di accumulo in quanto permette di essere inserita come supporto per molteplici applicazioni: riscaldamento degli edifici, produzione di acqua calda sanitaria, congiuntamente a pompe di calore e solare termico. Vista l'ampia gamma di opportunità che tale sistema è in grado di apportare, è di uso comune differenziare ulteriormente la categoria dell'accumulo caldo in due sottocategorie, a seconda della temperatura dell'accumulo:

- Ad alta temperatura, se $T > 120$ °C
- A bassa temperatura, se $T < 120$ °C

Il sistema che verrà studiato e analizzato nel seguito si tratta di un accumulo caldo a bassa temperatura, in quanto è stimato avere una temperatura di progetto di circa 75 °C.

Accumulo Freddo

L'accumulo del freddo (CTES) può essere ottenuto o dal raffreddamento o dalla solidificazione del materiale di accumulo; anche in questo caso la sostanza più usata è l'acqua. Il CTES è una forma innovativa di accumulo dell'energia durante i periodi di fuori picco (come ad esempio la notte) per il riutilizzo durante i periodi di picco giornalieri (la mattina e la sera). Essi sono principalmente utilizzati come componenti di appoggio per la produzione di freddo tramite i chiller elettrici, ovvero come accumulo indiretto dell'energia elettrica. L'accumulo è riempito durante i periodi di minor costo dell'energia elettrica e utilizzato quando questa aumenta di prezzo.

2.2.4 In base al ruolo dell'accumulo

Si ha la presenza di accumuli *diretti* e *indiretti*. Un accumulo è definito diretto quando l'utilizzo dell'energia termica immagazzinata avviene senza ulteriori passaggi verso altri componenti. Un sistema di accumulo diretto ha lo scopo principale di contenere energia termica fino a quando l'utenza non ne richiede il rilascio. Un accumulo indiretto è un elemento di supporto per il funzionamento ottimale di un secondo componente: in questo caso, infatti, lo scopo principale può essere, per esempio, il risparmio di energia elettrica. Un esempio è un accumulo caldo da integrare con un riscaldatore elettrico: la carica è fatta durante le fasce di basso costo dell'energia elettrica (notte) mentre l'energia termica sarà poi utilizzata durante il giorno.

Al fine di meglio chiarire la differenza tra un accumulo diretto e un accumulo indiretto, si prende in esame un unico sistema e lo si analizza nelle due configurazioni, in modo da evidenziare le differenze e le conseguenze che queste portano all'intero sistema. Il sistema in esame è rappresentato da un accumulo chimico ad assorbimento: i componenti in gioco sono la risorsa termica, il mezzo di accumulo e l'ambiente. Questo ultimo parametro, come si vedrà in seguito, rappresenta un pezzo fondamentale per costruire un accumulo ottimale. A questo punto si presentano le due configurazioni:

Accumulo Diretto

La configurazione ad accumulo diretto prevede il classico passaggio di energia termica dalla risorsa esterna verso il mezzo di accumulo; un aspetto importante, che per la prima volta entra in gioco nelle considerazioni esposte, è che a un flusso di calore è anche associato un flusso di entropia S

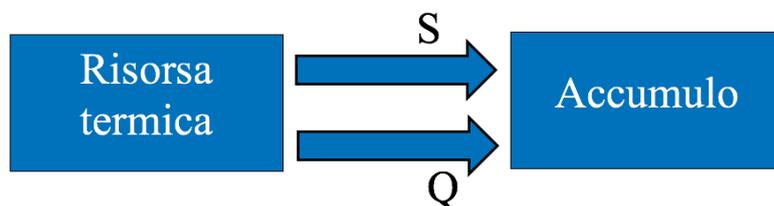


Figura 2.10: Configurazione in accumulo diretto

A partire dalla configurazione appena riportata, è possibile fare un'analisi del tutto qualitativa sulla natura stessa dell'accumulo; da quanto ricavabile dal secondo principio della termodinamica

$$\frac{dQ}{T} = ds \quad (2.4)$$

e quindi, per calcolare il flusso di calore Q entrante nel sistema, è semplicemente necessario integrare il dQ tra gli stati iniziale e finale

$$Q = \int_1^2 dQ = \int_1^2 T ds = \bar{T} \Delta s \quad (2.5)$$

Da questa ultima relazione si nota come un incremento dell'energia immagazzinata sia provocabile da un solo incremento del salto entropico (si suppone che gli stati iniziale e finale dell'accumulo siano stabiliti e fissi, ovvero a temperature invariabili): ma questa opzione poco si adatta alla natura dell'accumulo, che deve poter essere reversibile e ciclabile. Da questa limitazione propria del sistema di un accumulo diretto si possono dedurre le seguenti considerazioni

- Energia specifica limitata
- Perdite inevitabili

Accumulo Indiretto

La configurazione ad accumulo indiretto prevede l'aggiunta, al mezzo di accumulo, di un ulteriore componente: il convertitore. Esso ha il compito di intercettare il flusso di entropia proveniente dalla risorsa termica, trasferirlo all'ambiente e inviare all'accumulo un flusso di intera energia utilizzabile, ovvero exergia. Nel passaggio intermedio, una quota di energia sarà inevitabilmente trasferita all'ambiente. Lo schema esemplificativo è riportato in figura 2.11.

In linea del tutto generale, il flusso di exergia all'accumulo vale

$$W = Q - Q' = Q \left(1 - \frac{T_{accumulo}}{T} \right) - T_0 S_{irr} \quad [kJ] \quad (2.6)$$

La soluzione di accumulo indiretto appena presentata ha potenzialmente i requisiti necessari per risolvere entrambi i problemi legati alla configurazione diretta: dal

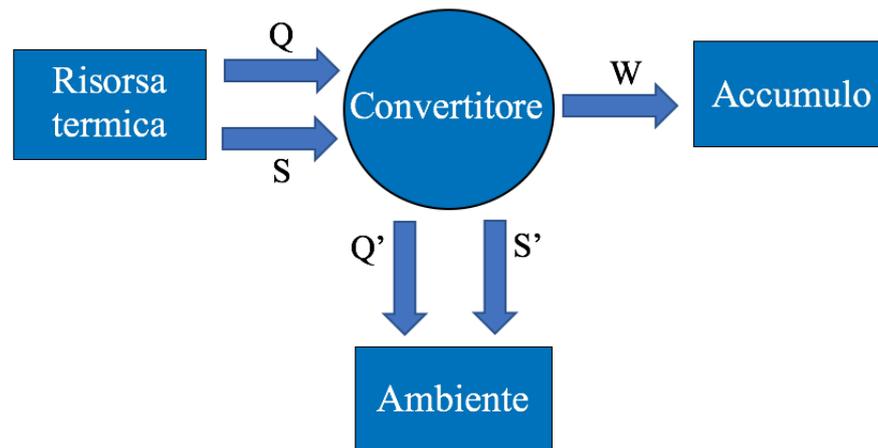


Figura 2.11: *Configurazione in accumulo indiretto*

momento che il flusso entropico è riversato in ambiente, e che questo è considerato come un pozzo infinito che non risente di questo contributo, è possibile immaginare una soluzione che comporti il ΔS massimo realizzabile. In questo modo si realizza un dispositivo in grado di garantire una densità di energia enorme, e inoltre senza perdite: infatti il processo di scarica non può essere attivato spontaneamente dal sistema, ma necessita di una sorgente esterna che lo attivi; fino a quando questa sorgente non entra in contatto con il mezzo di accumulo, l'energia termica è contenuta senza dispersioni. Se a livello teorico la realizzazione di questo impianto sarebbe molto conveniente, a livello tecnologico sono presenti ancora diversi punti critici, che rendono la distribuzione di questi sistemi ancora relegata a piccoli impianti sperimentali.

2.3 Figure di merito per la scelta

Il mercato dell'accumulo termico è molto vasto e ricco di numerose sfumature che permettono al cliente di poter scegliere la soluzione che meglio si adatta alle specifiche richieste. Nonostante questo, però, tutte le tecnologie hanno dei parametri di base che ne permettono il confronto, stabilendo l'opzione che garantisca la miglior performance se inserita nel contesto richiesto. Questi parametri vengono definiti comunemente *figure di merito* e valutano i diversi aspetti di una tecnologia, ovvero le caratteristiche energetiche, la durata dell'impianto, il costo, la compatibilità con altri sistemi e così via. Lo studio per ottenere un sistema ottimale deve essere condotto considerando tutte queste caratteristiche, in modo tale da garantire il miglior rendimento sotto ogni

aspetto. Per quanto riguarda gli accumuli termici, le figure di merito di riferimento sono tipicamente le seguenti:

- *Densità di energia* [kJ/m^3]: esprime la quantità di energia che il mezzo è in grado di accumulare/rilasciare riferita all'unità di volume. Questa è la figura di riferimento per quanto riguarda l'aspetto del dimensionamento del sistema: valori alti di densità di energia permettono di contenere il volume dell'accumulo entro limiti piccoli.
- *Energia specifica* [kJ/kg]: esprime la quantità di energia che il mezzo è in grado di accumulare/rilasciare riferita all'unità di massa. Questa figura di merito è meno rilevante rispetto alla densità di energia. Infatti, al contrario di quest'ultima, la differenza tra accumuli sensibili e latenti è meno marcata; proprio per questo motivo, tale parametro è meno influente nel momento in cui si decide la sostanza da utilizzare.
- *Potenza specifica* [kW/kg]: esprime la potenza che il mezzo è in grado di gestire durante le fasi di carica/scarica. La potenza specifica è la figura di riferimento per quanto riguarda le cinetiche dei processi: più tale figura è elevata, più le fasi saranno veloci. Questo aspetto risulta essere molto critico in quelle applicazioni che hanno come vincolo principale proprio un tempo limitato per la fase di carica o scarica.
- *Costo* [$\text{€}/\text{kg}$; $\text{€}/\text{m}^3$]: figura di merito che esprime il costo per unità di volume o di massa dell'accumulo; questo parametro è tendenzialmente collegato alla maturità della tecnologia in esame: più una tecnologia è matura più il prezzo sarà minore, e viceversa. Il costo complessivo dell'impianto influenza in modo molto marcato la fattibilità o meno dell'opera.
- *Durata dell'impianto* [anni]: esprime, mediamente, la durata attesa dell'impianto. Affinché un investimento possa essere ripagato, la durata di vita deve essere sufficientemente lunga da permettere il completo rientro del capitale investito; in caso contrario l'impianto non è neanche realizzato.
- *Temperatura di esercizio* [$^{\circ}\text{C}$]: esprime il range di temperatura in cui il sistema andrà ad operare.

- *Taglia* [m^3]: esprime la dimensione dell'accumulo. Questo parametro è spesso associato a vincoli legati al posizionamento dell'accumulo nel sistema in cui andrà ad operare.
- *Efficienza*: esprime il rapporto tra l'energia rilasciata nella fase di scarica e la quantità di energia che è stata fornita per completare la fase di carica

$$\eta = \frac{E_{rilasciata}}{E_{fornita\ per\ accumulo}} \quad (2.7)$$

Ad incidere su questo valore possono essere la qualità del serbatoio di accumulo o le proprietà chimico-fisiche del mezzo di accumulo stesso. La differenza tra le due quantità rappresenta le perdite durante le fasi di carica, mantenimento e scarica.

- *Sicurezza*: parametro legato ai carichi di incendio sopportabili dal sistema in caso di innesco.
- *Durata dell'accumulo*: esprime il periodo per il quale il serbatoio è in grado di immagazzinare l'energia accumulata.

In tabella 2.1 si propone una visione riassuntiva con i valori tipici delle principali figure di merito per le tre categorie di accumulo termico esaminate.

TES system	Capacity (kWh/t)	Power (MW)	Efficiency (%)	Storage Period	Cost (€/kWh)
Sensible (hot water)	10-50	0.001-10	50-90	days/months	0.1-10
PCM	50-150	0.001-1	75-90	hours/months	10-50
Chemical reactions	120-250	0.01-10	75-100	hours/days	8-100

Tabella 2.1: *Confronto figure di merito per TES [1, Bibliografia]*

La scelta della categoria più adatta per l'applicazione in analisi può essere svolta, con un primo approccio, sulla base di questa tabella: si intuisce, infatti, come il PCM sia un buon compromesso in termini di capacità di accumulo e costo associato rispetto al sensibile e al termochimico: quest'ultimo, anche se statisticamente risulta essere il migliore in uso, non può ancora essere definito come una tecnologia affermata, e le sue applicazioni sono limitate.

2.4 Limitazioni

Come per tutti i sistemi tecnologici in commercio, anche in questo caso la soluzione dell'accumulo è accompagnata da limitazioni di tipo fisico/termodinamico e tecnologico; e la consapevolezza della loro esistenza gioca un doppio ruolo: da una parte esse rappresentano un elemento imprescindibile che accompagna in modo inevitabile questo tipo di sistema, mentre dall'altra sono stimolo per il continuo progresso nello scoprire materiali e sistemi che riducano sempre di più il *gap* esistente tra sistema reale e ideale. Quando si parla di limitazioni di un sistema di accumulo ci si riferisce in generale a uno o più dei seguenti aspetti:

- *Perdite per dispersione verso l'ambiente*: caratterizzano qualsiasi tipo di sistema che coinvolga uno scambio termico tra più componenti; le dispersioni termiche sono la grande motivazione che non permette agli accumuli tradizionali di poter essere utilizzati per tempi superiori a due giorni. La sola opportunità esistente per limitarne l'effetto è applicare al serbatoio un'abbondante quantità di isolante termico; poiché le perdite sono causate anche dai fenomeni di convezione e irraggiamento, ulteriori miglioramenti possono essere apportati: inserimento di un'intercapedine in cui si crea il vuoto - per annullare l'effetto della convezione - e rivestimento delle superfici interne del serbatoio con materiali altamente riflettenti - per limitare il flusso radiativo in uscita -. Il sistema così costruito è alla base del cosiddetto Vaso di Dewar (si veda figura 2.12), modello di accumulo quasi ideale, con perdite pressochè nulle.
- *Limitate proprietà dei materiali a disposizione*: questo è l'aspetto legato alle limitazioni tecnologiche con cui è inevitabile doversi confrontare; nonostante un'applicazione possa presentare molteplici vantaggi, se non si possono sfruttare al meglio le potenzialità di un fenomeno, essi saranno come inesistenti. In tal caso, non si parla solamente di proprietà fisiche dei materiali utilizzati (come possono essere calore specifico, conduttività, densità, ...) ma anche di proprietà meccaniche (la massima tensione sopportabile per evitare il collasso nel caso di accumulo tramite volano), chimiche (ad esempio la temperatura di inversione per l'idrolisi dell'acqua, che vale circa 2500°C, dalla quale si potrebbe produrre idrogeno da stoccare), elettriche (la superconduttività elettrica avrebbe riscontri positivi in

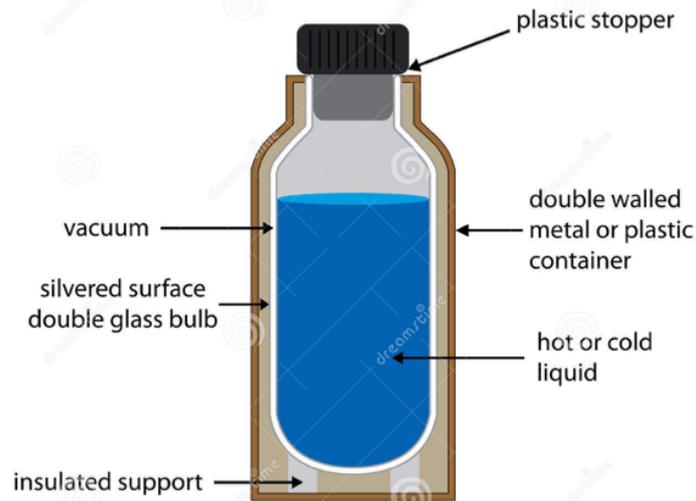


Figura 2.12: *Vaso di Dewar [3, Sitografia]*

molti ambiti della scienza, e non solo nel campo dell'accumulo elettrico), magnetiche e così via. La tecnologia evolve, e inizia a dare i primi risultati: un esempio sono i materiali di nuova generazione che sfruttano la nanotecnologia. Nanofluidi, nanoparticelle sospese in un letto fluido che procurano un aumento della conduttività termica fino al 40%; zeoliti, materiali microporosi che immagazzinano energia per reazioni di assorbimento con l'acqua, presentano una densità di energia fino a 4 volte superiore rispetto a un accumulo sensibile; infine materiali compositi, ovvero forniti di strutture atomiche alla nanoscala in grado di incrementare le proprietà termiche e meccaniche del reticolo in cui sono inserite.

Capitolo 3

Phase Change Material

Nell'ambito dell'accumulo termico, una soluzione in fase di grande espansione è quella dell'utilizzo dei materiali a cambio di fase. Poiché il lavoro di tesi proposto ha come oggetto principale l'accumulo tramite PCM, si tratta l'argomento dedicando un capitolo a parte. Rimane tuttavia ben chiaro il fatto che questo è un caso particolare che rientrerebbe nella trattazione più generale di accumulo termico.

“*Materiale a Cambiamento di Fase è il nome che si dà a una sostanza la quale è capace di passare da una fase o stato (solido, liquido, gas) ad un'altra fase (solida, liquida, gas) ad una specifica temperatura e pressione*” [4, Bibliografia]. I materiali a cambiamento di fase sono molto comuni in natura, e ne esistono variegata categorie: le trasformazioni di fase possibili sono riportate in tabella 3.1

		To		
		Solid	Liquid	Gas
From	Solid	Solid-solid transformation	Melting	Sublimation
	Liquid	Solidification	-	Evaporation
	Gas	Desublimation	Condensation	-

Tabella 3.1: *Trasformazioni di fase per PCM [4, Bibliografia]*

Il passaggio solido-solido è da intendersi come un cambiamento della struttura cristallina della sostanza in cui questa trasformazione avviene. A livello commerciale è però molto più frequente imbattersi in materiali che sfruttano il passaggio solido-liquido,

per il fatto che, tendenzialmente, questa trasformazione implica una piccola variazione del volume tra le due fasi, aspetto che permette di avere un serbatoio dimensionato in modo accettabile per entrambe le condizioni. Il vantaggio principale di un accumulo a PCM è un ridotto volume, a parità di energia accumulata, rispetto a un accumulo ad acqua: l'aspetto della dimensione dell'accumulo è molto importante nel settore edilizio, dove questi materiali devono essere inseriti all'interno di intercapedini o usati come uno strato del muro stesso; se la dimensione di tale strato fosse eccessiva, si andrebbe ad influire negativamente sottraendo volume abitabile. Proprio riguardo all'applicazione in ambito edilizio dei PCM, è stato condotto uno studio che mette a confronto le diverse tecnologie possibili per l'inserimento all'interno di un muro [1, Bibliografia]

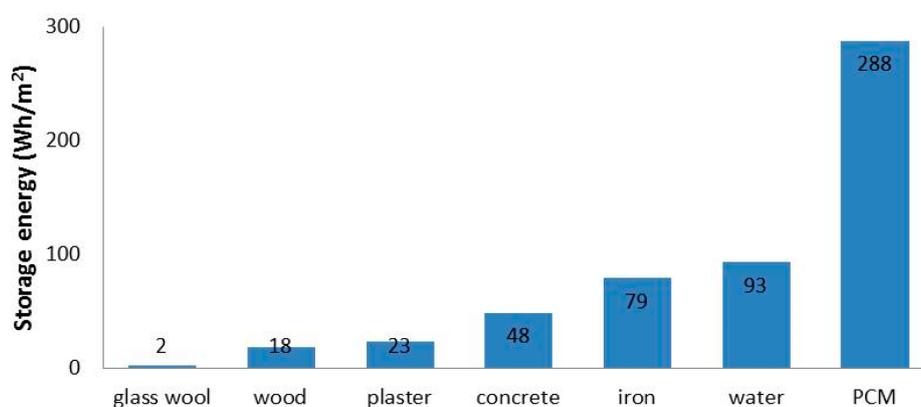


Figura 3.1: *Massima energia stoccabile per uno strato di 10mm operando tra 18 e 26 °C per 24 h [1, Bibliografia]*

È chiaramente visibile la netta predominanza dei PCM, con un valore dell'energia accumulabile che è 3 volte superiore rispetto all'acqua.

Poiché lo studio della materia di accumulo ha subito notevoli incrementi nel corso degli anni, si rende necessario classificare i PCM a seconda della loro natura.

3.1 Classificazione

I PCM possono essere suddivisi in tre categorie principali: composti organici, composti inorganici e miscele eutettiche. La figura 3.2 propone una visione generale, mentre una panoramica più dettagliata delle singole categorie sarà sviluppata successivamente

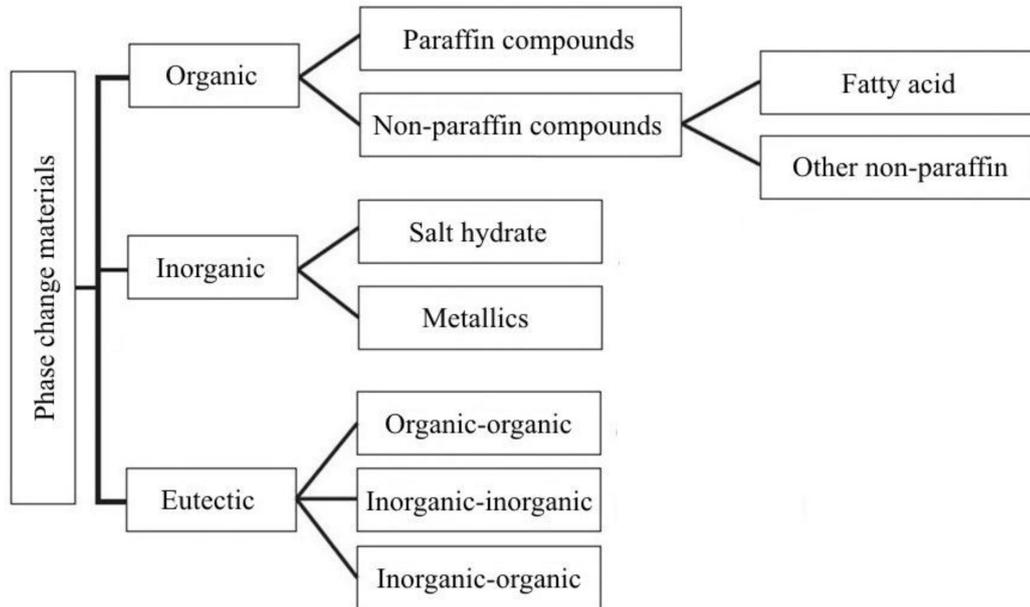


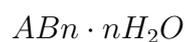
Figura 3.2: *Classificazione PCM [1, Bibliografia]*

3.1.1 Composti Inorganici

Sono a loro volta suddivisibili in due categorie, sali idrati e metalli.

Sali Idrati

Sono ottenuti da un composto salino con l'unione di n molecole d'acqua; variando il numero di queste molecole, si è in grado di modificare la temperatura di fusione del sale. La forma generale per un sale idrato è



Questi composti sono caratterizzati da differenti comportamenti durante la fase di fusione:

- Fusione congruente: il sale, durante la fase di fusione, è completamente solubile nell'acqua di idratazione.

- Fusione incongruente: il sale, durante la fase di fusione, è parzialmente solubile nell'acqua di idratazione.

Sfortunatamente molti dei composti che presentano i più alti calori latenti di fusione fondono in modo incongruente: questa caratteristica comporta forti differenze di densità tra le due fasi, separazione delle fasi e sedimentazione all'interno del serbatoio, provocando molteplici problemi a livello tecnologico [5, Bibliografia]. Essi sono però molto interessanti perché presentano alte densità di energia, conducibilità termiche apprezzabili, bassa corrosività e compatibilità con la plastica. Gli aspetti negativi legati a queste sostanze sono invece i seguenti:

- Sottoraffreddamento: il materiale continua la fase di raffreddamento oltre il punto di solidificazione. La spiegazione fisica di tale fenomeno risiede nella natura cinetica che esso coinvolge: per poter dare inizio alla cristallizzazione del reticolo, deve essere presente un punto di nucleazione iniziale, e la cinetica deve essere sufficientemente elevata da rendere l'espansione del reticolo un comportamento naturale. Laddove uno dei due requisiti non sia soddisfatto, il liquido continua a raffreddarsi, senza però passare allo stato solido. Come è possibile vedere in figura 3.3, in seguito all'attivazione del materiale è presente un rilascio istantaneo del calore latente di fusione, con un incremento della temperatura fino alla soglia della fusione; a partire da questo momento, il solido inizia la fase di scarica accompagnata dal raffreddamento.

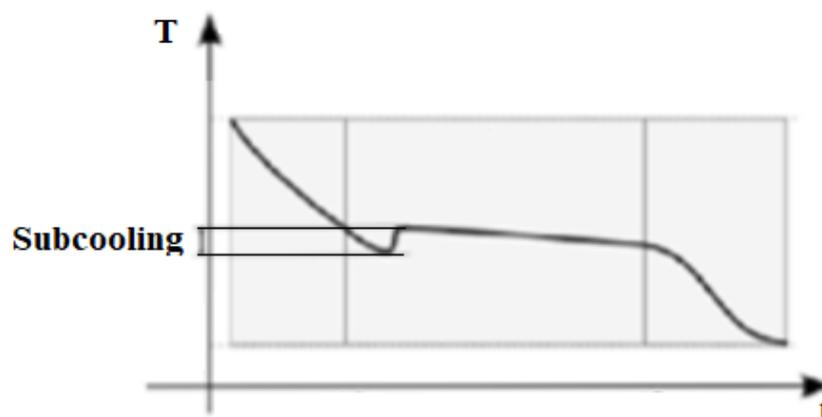


Figura 3.3: Sottoraffreddamento in un sale idrato [3, Bibliografia]

Se nella maggior parte dei casi questo fenomeno rappresenta una forte limitazione dei sali idrati, esistono delle situazioni in cui la visione è completamente ribaltata, e il sottoraffreddamento passa da svantaggio a importante possibilità di accumulo senza

perdite: infatti, dal momento che il *subcooling* è legato a processi di tipo chimico, fino al momento in cui la nucleazione non è attivata, il sale idrato contiene al suo interno tutta l'energia latente. Quando invece il *subcooling* deve essere evitato, è possibile aggiungere alla soluzione degli agenti nucleanti, ovvero piccole impurità che fungono da centri di nucleazione attorno ai quali si crea tutto il reticolo.

- Segregazione: fenomeno irreversibile che provoca la degradazione del sale, ovvero il rilascio di una o più molecole di acqua, con conseguente perdita di prestazioni in termini di energia accumulabile. Tale fenomeno può essere mitigato tramite l'inclusione di componenti polimerici a base gel o di altri materiali ad alta viscosità.

Metalli

I metalli e le relative leghe sono utilizzati per l'accumulo ad alta temperatura a causa delle temperature di fusione di questi materiali. Le problematiche legate a queste sostanze sono dovute alla parziale degenerazione che esse subiscono al crescere del numero di cicli effettuato: ricerche in merito hanno stabilito che in seguito a 1000 cicli termici, il range di temperatura per la fusione era cambiato di 3-5 K e il calore latente associato era diminuito. A loro favore gioca però un'alta densità di energia e un'alta conducibilità termica.

3.1.2 Composti Organici

Prodotti derivati del petrolio, presentano un'unica temperatura di fusione. Tipicamente sono molto economici rispetto ad altre tipologie.

Paraffine

Le paraffine sono una delle categorie che meglio si adatta all'accumulo termico, grazie all'elevata densità di energia che possiedono. Inoltre presentano una forte flessibilità di utilizzo grazie alle proprietà derivanti dalla loro struttura interna. Le molecole organiche di cui è formata (ad esempio alcani) trasmettono alla paraffina la tipica consistenza della cera con struttura molecolare del tipo



Al variare del numero n di gruppi CH_2 è possibile trasferire al composto diverse proprietà termiche: in particolare evince una dipendenza della temperatura di fusione, la quale cresce al crescere di n . Grazie a questa proprietà, a livello tecnologico si è in grado di sintetizzare la paraffina che presenti la temperatura di fusione adatta all'applicazione in esame; è da sottolineare il fatto che le temperature di interesse per le paraffine riguardano il TES a bassa temperatura, ovvero nel range 6 - 80 °C. Ulteriori lati positivi di questi composti sono la sicurezza a livello impiantistico, la non corrosività e non reattività, il basso costo e la stabilità nel tempo. Trattando degli aspetti negativi è indispensabile citare la bassa conducibilità termica, la quale implica la necessità di avere grandi superfici di scambio termico per garantire una rapida fase di carica/scarica. Molti studi con lo scopo di trovare la metodologia adatta ad accrescere questa proprietà hanno evidenziato come questo sia possibile a scapito di una riduzione dell'energia accumulabile.

Non Paraffine

Le non paraffine sono una categoria molto ampia di prodotti, tra cui si citano gli alcoli, gli esteri e gli acidi grassi.

3.1.3 Eutettici

Per composti eutettici si intende una miscela di due o più sostanze pure che si combinano, a una data pressione e temperatura, per dare come prodotto un'ulteriore sostanza le cui caratteristiche termiche (e non) sono ottenute dalla combinazione delle proprietà delle sostanze pure di partenza. Il comportamento di questa miscela, indicata con E (eutettico) è lo stesso di una sostanza pura: questo è possibile grazie all'individuazione dell'esatto punto in cui le concentrazioni delle sostanze pure sono tali da evitare qualsiasi fenomeno di cristallizzazione nel mezzo liquido. Un'importante caratteristica della miscela eutettica, come anche chiaramente visibile dalla figura 3.4, è che la sua temperatura di fusione è sempre minore delle singole temperature di fusione delle sostanze pure di cui è formata. Questo aspetto è di notevole interesse in quanto è possibile sfruttare le proprietà di un determinato materiale, abbinandolo a un secondo materiale che presenti una temperatura di fusione nel range richiesto.

La concentrazione di A e B individuabili dal punto E sono quelle di interesse per sfruttare una miscela eutettica come un PCM in quanto la trasformazione che essa subisce in seguito a un raffreddamento/riscaldamento segue una linea verticale (vedi Figura 3.4, in verde), passando da A+B tutto solido ad A+B tutto liquido.

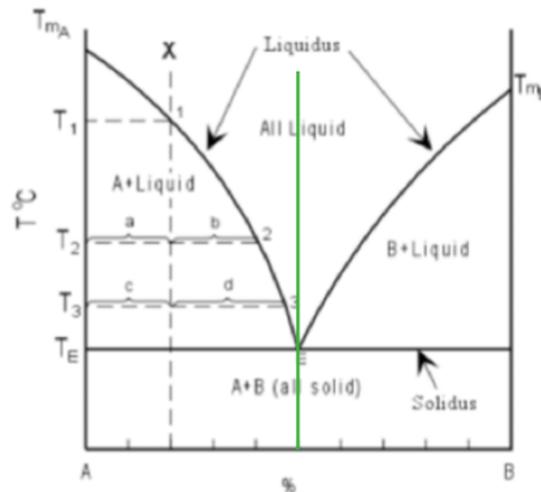


Figura 3.4: Trasformazione di interesse per TES

3.2 Caratteristiche

La suddivisione in classi dei PCM è utile per differenziare le diverse sostanze di cui essi sono fatti; in questo modo si effettua una scrematura preliminare che anticipa la scelta effettiva del PCM adatto per l'applicazione designata. Lo step successivo prevede l'analisi più dettagliata della sostanza in esame, in particolare focalizzando l'attenzione sulle proprietà termofisiche, chimiche ed economiche che essa presenta, derivandone i pro e i contro. La scelta del PCM ottimale può essere condotta utilizzando come linea guida la lista di requisiti che esso dovrebbe possedere:

- Punto di fusione alla temperatura di funzionamento
- Alto valore del calore latente di fusione
- Alto valore del calore specifico, in modo tale da sfruttare anche una quota di calore sensibile
- Alta conducibilità termica, in modo tale da poter performare le fasi di carica/scarica in tempi brevi e senza elevate differenze di temperatura

- Fusione congruente, ovvero il materiale deve poter fondere completamente con fasi liquide e solide omogenee
- Assenza di segregazione, ovvero senza cambi irreversibili delle proprietà termiche
- Piccole variazioni di volume durante il cambiamento di fase, in modo tale da poter utilizzare scambiatori semplici ed economici
- Assenza del fenomeno di sottoraffreddamento
- Stabilità chimica nel tempo
- Assenza di tossicità
- Comportamento non corrosivo nei confronti dei contenitori o, se in ambito edilizio, degli altri materiali da costruzione
- Scarsa infiammabilità
- Facile reperibilità sul mercato
- Basso costo
- Alto numero di cicli

Non esiste nessun PCM che garantisca tutti i requisiti sopra elencati. Il grosso lavoro che deve essere svolto consiste nel trovare il PCM che abbia il maggior numero di caratteristiche positive e che sia in grado di garantire l'accumulo necessario. Alcune di queste figure di merito (soprattutto quelle di tipo chimico ed economico) non richiedono la conoscenza precisa del materiale, in quanto sono definibili a partire dalla sola classificazione della sostanza; per le figure di tipo termofisico, invece, è necessario il supporto di esperimenti in laboratorio. Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tecniche in grado di dare come *output* le caratteristiche volute, ma di seguito si espongono i principi di funzionamento delle due principali, ovvero la DTA (*Differential Thermal Analysis*) e la DSC (*Differential Scanning Calorimetry*). Entrambe richiedono la presenza di una sostanza le cui proprietà fungano da termine di paragone con il materiale in esame.

- DSC: due provini sono sottoposti a flussi termici che seguono una rampa prestabilita al fine di mantenere i due campioni alla stessa temperatura. Questi flussi provocano nel materiale un innalzamento della temperatura o il cambiamento di fase, a seconda del livello di flusso registrato. Dall'analisi della curva di flusso in funzione della temperatura è possibile ricavare, ad esempio, il calore latente di fusione (area sottesa dal picco) e la temperatura di fusione. Una tipica curva ottenibile da DSC è riportata in figura 3.5.

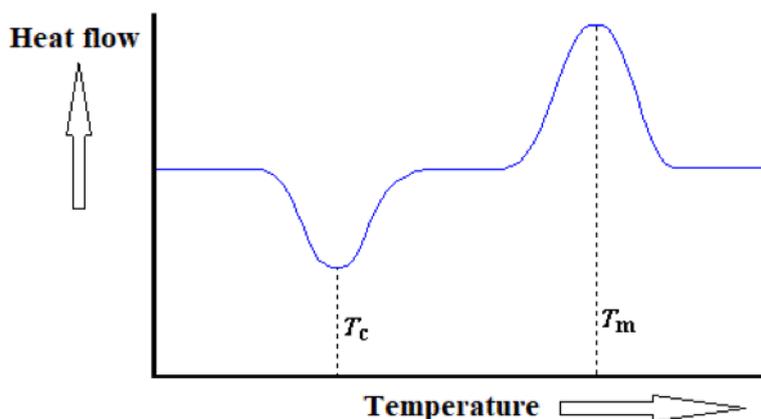


Figura 3.5: *Curva Flusso termico-Temperatura per DSC [4, Sitografia]*

- DTA: segue lo stesso principio di funzionamento della DSC ma imponendo un ugual flusso termico ai due provini: si misura quindi il ΔT tra le due sostanze nel tempo.

Non meno importante per caratterizzare in modo completo un materiale è il numero di cicli che esso è in grado di sopportare senza incorrere in significative perdite di prestazioni termiche; per un PCM un ciclo è definito dall'insieme della fase di carica seguita dalla scarica. Indipendentemente dall'ambito di applicazione del PCM (edilizio, industriale) il numero di cicli minimo richiesto deve essere tale da garantire un ciclo completo al giorno; se si considera una vita dell'impianto di almeno 10 anni, questo significa che il minimo richiesto deve essere di circa 4000 cicli. Un materiale che presenti una degradazione importante al di sotto di questo valore difficilmente potrà essere impiegato in un sistema reale.

In figura 3.6 è presentata un'immagine molto significativa che mette a confronto diversi PCM appartenenti a classi differenti rispetto alle principali figure di merito sopra esposte.

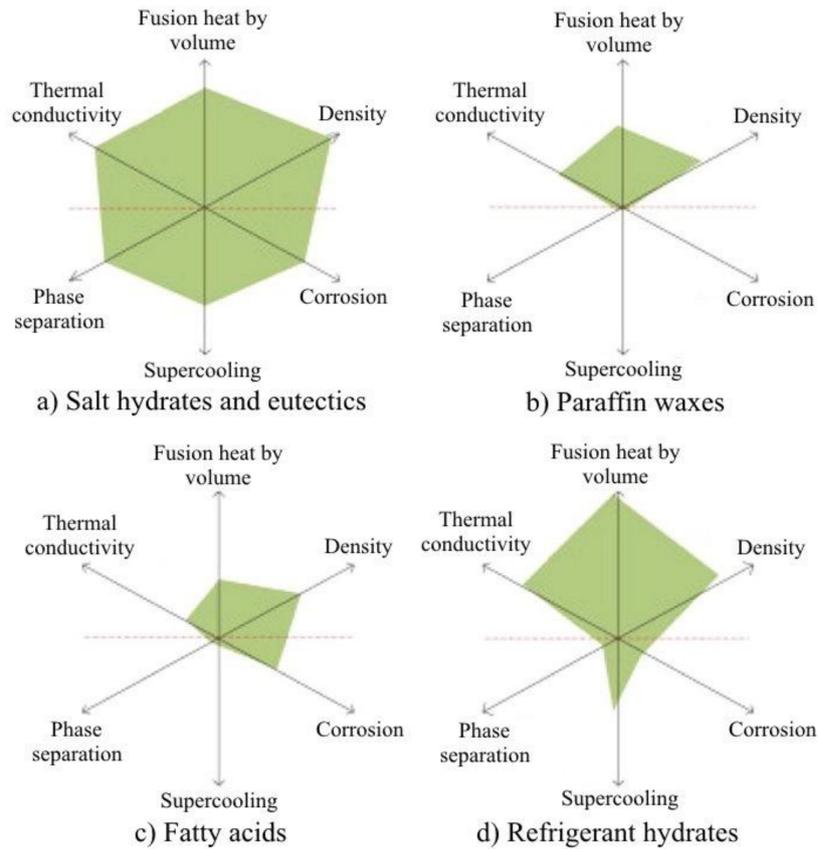


Figura 3.6: *Proprietà termiche di differenti PCM [1, Bibliografia]*

Come si può notare, tutte le categorie presentano sia aspetti positivi sia aspetti negativi: in particolare emerge un ottimo potenziale di accumulo per i sali idrati e gli eutettici i quali sono però caratterizzati da grossi problemi di separazione delle fasi, sottoraffreddamento e corrosione. Le paraffine e gli acidi grassi sono quasi completamente estranee a queste problematiche, ma presentano valori di calore latente di fusione decisamente minori rispetto ai sali idrati; in aggiunta esse sono limitate anche sotto l'aspetto della conducibilità termica, con conseguente necessità di scambiatori a elevata superficie di scambio termico, costosi e di difficile realizzazione. Si è pertanto cercato di ovviare al problema introducendo delle metodologie di incapsulamento che permettessero di incrementare le prestazioni di scambio termico di queste sostanze.

3.3 Tecniche di miglioramento dello scambio termico

Come emerso precedentemente, spesso in parallelo all'utilizzo di un materiale a cambiamento di fase è necessario far fronte a limitate proprietà di scambio termico. Una possibile soluzione per minimizzare questo problema consiste nel fondere il PCM in un mezzo altamente conduttivo (tipicamente a base metallica); laddove questa opzione non fosse disponibile, è possibile ricorrere all'incapsulamento della sostanza in modo da bilanciare la bassa conducibilità con un'elevata superficie di scambio termico. Anche in questo caso la scelta della migliore soluzione è funzione di parametri fisici del materiale uniti a specifiche richieste da parte del sistema in cui si sta operando. Un approccio di questo tipo è in grado di apportare ulteriori benefici, quali prevenire reazioni chimiche tra il PCM e sostanze esterne, incrementarne la compatibilità con gli altri componenti del sistema di accumulo e migliorarne la maneggevolezza. In letteratura è presente un ampio bagaglio di tecniche per l'incapsulamento dei PCM, le quali possono essere classificate secondo il seguente schema generale.

3.3.1 Macroincapsulamento

Metodo che consiste nell'inserimento del PCM all'interno di appositi contenitori di varie forme (sferiche, rettangolari, ...) al fine di esporre la maggior quantità di materiale possibile a contatto con la risorsa termica. Il materiale con cui si realizzano i contenitori può variare dalla semplice plastica fino all'acciaio, a seconda del budget di cui si dispone e delle proprietà di scambio termico richieste al sistema. Un esempio tradizionale di macroincapsulamento è riportato in figura 3.7

3.3.2 Microincapsulamento

Il principio su cui si basa è lo stesso del macroincapsulamento, a differenza del fatto che in questo caso le capsule di contenimento sono le strutture stesse del reticolo cristallino del materiale in cui il PCM è assorbito. Si parla di microincapsulamento quando il diametro del rivestimento è compreso tra 1 - 1000 μm . Nonostante i numerosi vantaggi che tale soluzione è in grado di apportare all'intero sistema, spesso il costo di realizzazione di questo metodo è ancora proibitivo, limitandone l'utilizzo a pochi e

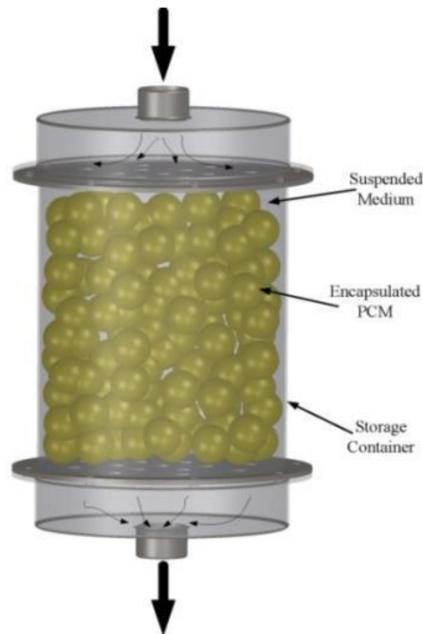


Figura 3.7: Esempio di macroincapsulamento con sfere [1, Bibliografia]

particolari applicazioni. In figura 3.8 si riporta una vista al microscopio delle microsfele utilizzate per il contenimento

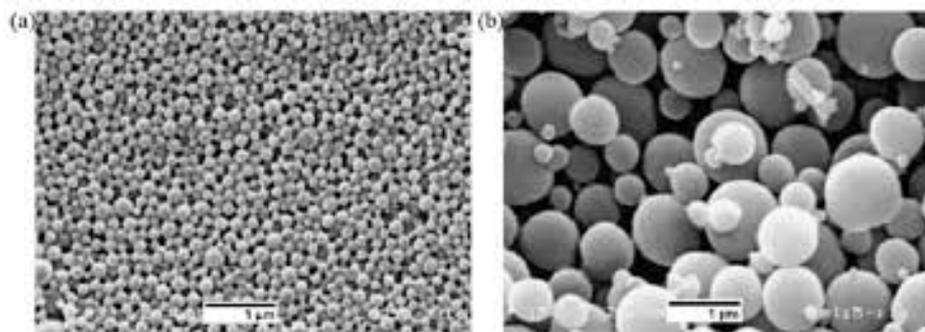


Figura 3.8: Esempio di microincapsulamento [8, Bibliografia]

3.3.3 Incremento della conducibilità termica

Il presente paragrafo ha l'obiettivo di presentare una panoramica delle metodologie disponibili per l'incremento dell'altro parametro che influenza in modo diretto lo scambio termico, ovvero la conducibilità termica λ $\left[\frac{W}{mK}\right]$ e precisamente:

- Incrementare il rateo di solidificazione nei sali fusi tramite la dispersione di particelle ad elevata conduttività.
- Incorporare il PCM in una struttura metallica.

Capitolo 4

Il teleriscaldamento come risorsa energetica

“Per teleriscaldamento si intende il trasporto a distanza di calore da utilizzarsi per il riscaldamento urbano e il trasporto e distribuzione di acqua calda sanitaria.” [5, Sitografia].

Il teleriscaldamento è una soluzione in forte espansione, soprattutto grazie ai molteplici aspetti positivi che è in grado di apportare: eliminazione della caldaia e relativi costi di revisione, pulizia e manutenzione, risparmio di energia primaria, diminuzione delle emissioni di inquinanti in atmosfera. Il tutto allacciando la rete domestica alla rete di distribuzione dell’acqua calda proveniente dalla centrale termica. Oltre ad aspetti di tipo economico/ambientale, il teleriscaldamento influisce positivamente anche sotto l’aspetto della sicurezza dell’utente finale: infatti l’abitazione non richiederà più la linea di alimentazione della caldaia, la quale, nella maggioranza dei casi, necessita di combustibili altamente infiammabili.

In Italia la regolamentazione del teleriscaldamento è dettata dalla norma UNI EN 15316-4-5:2018 *Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo delle richieste di energia e delle efficienze del sistema - Parte 4-5: Teleriscaldamento e teleraffrescamento, Moduli M3-8-5, M4-8-5, M8-8-5, M11-8-5* entrata in vigore il 22 febbraio 2018. Poiché nel lavoro di tesi proposto ci si occuperà nel dettaglio della rete di teleriscaldamento della città di Torino, si riporta una stima redatta dall’ufficio Energia della stessa città, dei benefici che l’ampliamento della rete apporterà alla popolazione (figure 4.1 e 4.2); le fasi menzionate non sono altro che la suddivisione temporale dell’approvazione,

messa in posa e attivazione dei progetti di ampliamento della rete attuale.

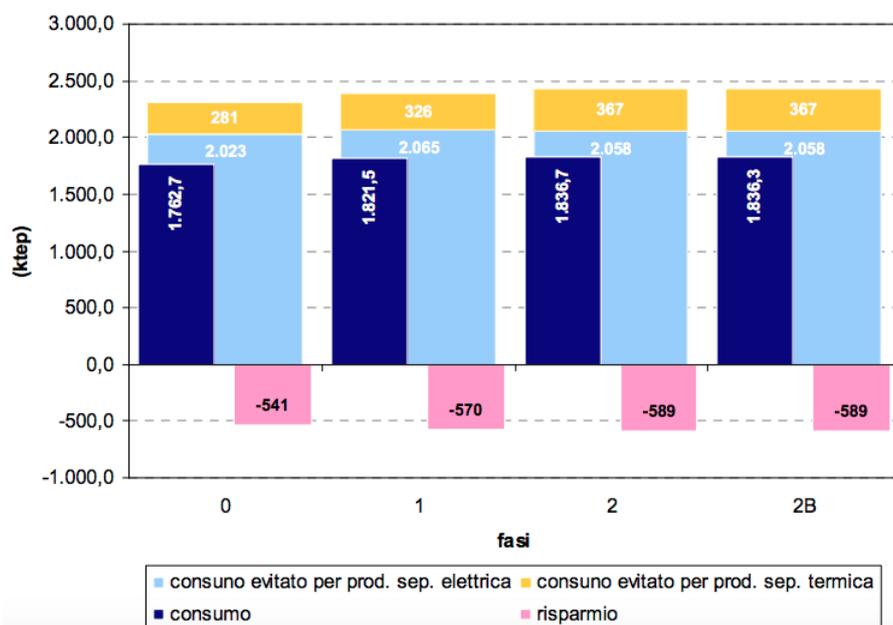


Figura 4.1: Risparmio di energia primaria [9, Bibliografia]

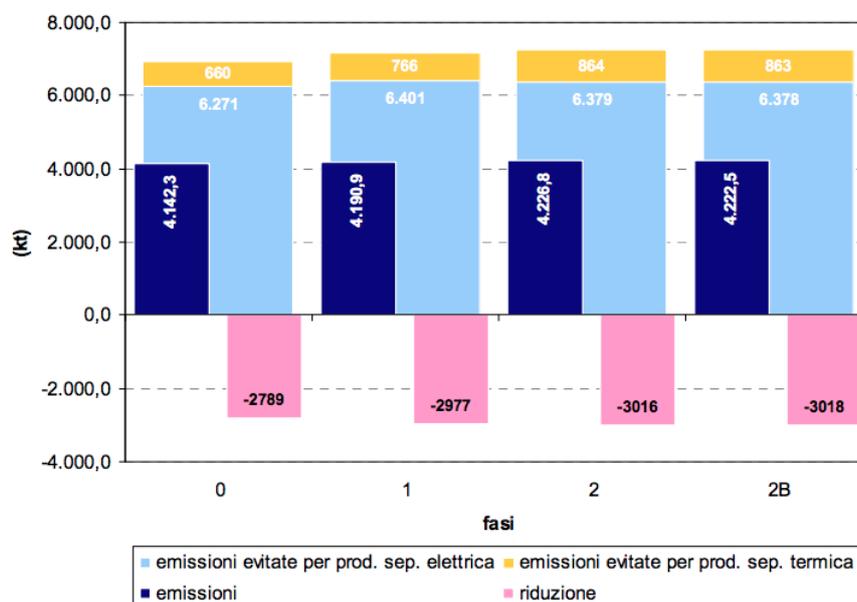


Figura 4.2: Riduzione delle emissioni di CO₂ [9, Bibliografia]

E' possibile notare come il risparmio ottenuto, in entrambe le valutazioni, sia decisamente consistente: tale risparmio aumenta ogni qual volta la rete di distribuzione viene ampliata.

4.1 Struttura

Al fine di meglio capire come è gestita la rete del teleriscaldamento occorre prima di tutto conoscere la struttura della rete stessa, ovvero sapere come sono realizzati i collegamenti tra la centrale termica (dove avviene la produzione dell'acqua calda) e l'utenza (dove avviene il consumo dell'acqua calda). A supporto dell'intera gestione sono di fondamentale importanza le sottostazioni di pompaggio, grazie alle quali l'acqua è in grado di raggiungere tutti i punti della rete.

Una rete di teleriscaldamento si compone di:

- Una o più centrali termiche
- Rete di distribuzione
- Sistema di pompaggio
- Utenze

Il controllo e la regolazione dell'intera rete sono possibili grazie alla presenza delle sottostazioni di pompaggio: esse permettono infatti all'acqua in mandata di raggiungere tutte le utenze collegate alla rete, vincendo le cadute di pressione alle quali l'acqua è inevitabilmente soggetta. Il ruolo delle sottostazioni è però ancora in fase di sviluppo, in quanto sono in via di sperimentazione diverse soluzioni che prevedono l'inserimento di componenti di accumulo termico in accoppiamento con la fase di pompaggio. Il beneficio di questa soluzione è multiplo: da una parte è in grado di accumulare quella quota di energia che altrimenti sarebbe dispersa, dall'altra permette alla centrale di produzione di fronteggiare un picco di richiesta minore nelle ore più critiche, solitamente la mattina. Così facendo la centrale termica può funzionare a regime costante e in condizioni più vicine a quelle di progetto, con rendimenti maggiori.

La disposizione dei diversi componenti determina la tipologia della rete: in particolare si può avere una struttura ad *albero* (figura 4.3) o una *magliata* (figura 4.4). La principale ragione per la magliatura è legata all'eventualità di malfunzionamento in un tratto di tubazione [11, Bibliografia]. In questo caso, infatti, la struttura a maglia permette di isolare il tratto accidentato senza precludere l'uso della rete alle restanti parti. Inoltre, la struttura a maglia presenta minori perdite di carico rispetto a una

equivalente rete ad albero, semplificando quindi le operazioni di gestione del carico e comportando minori costi per il pompaggio.

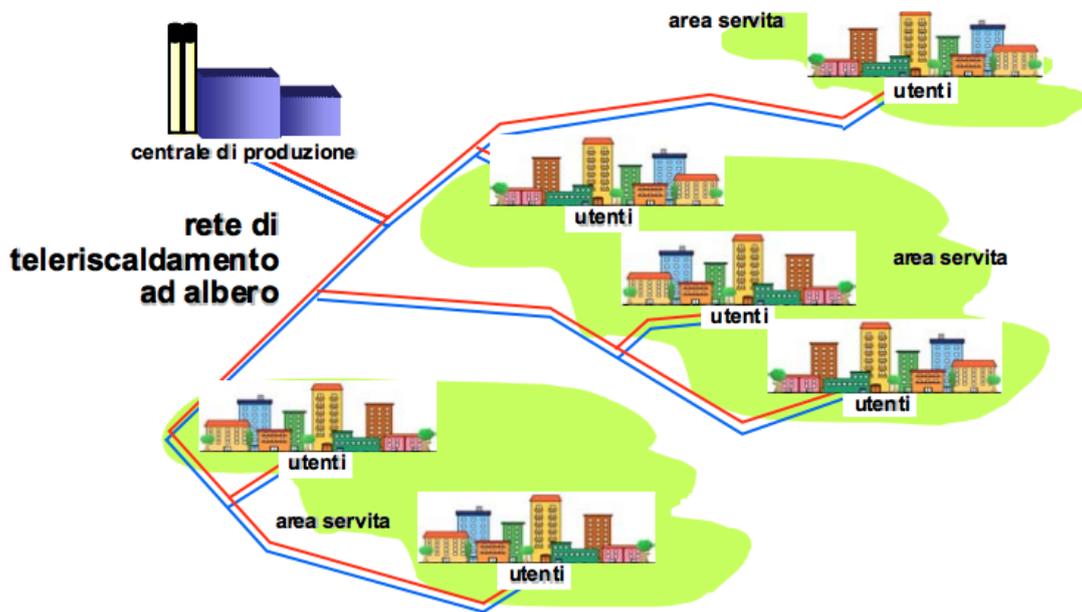


Figura 4.3: *Struttura ad albero [10, Bibliografia]*

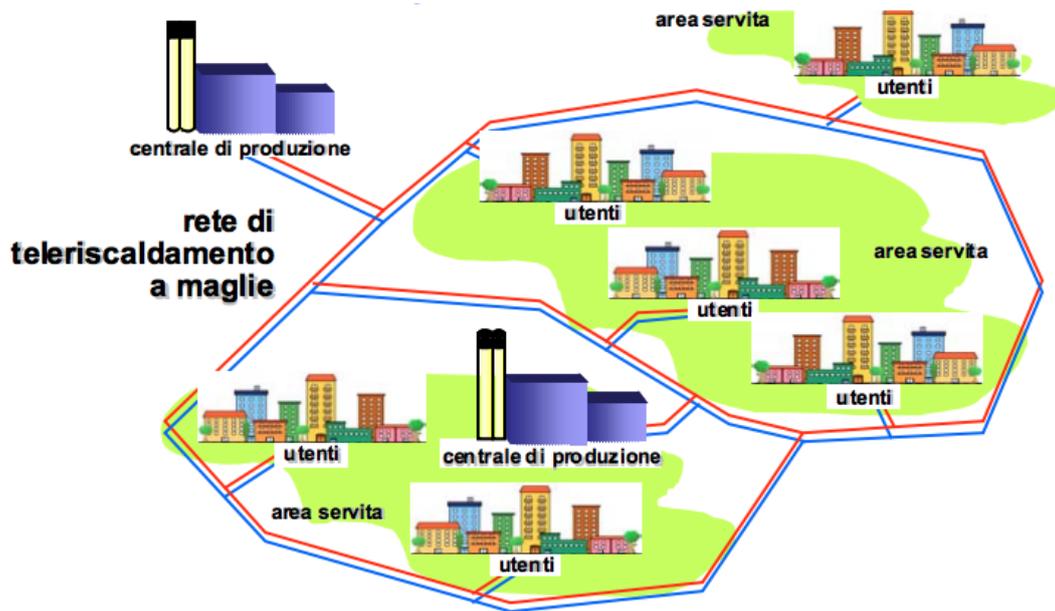


Figura 4.4: *Struttura a maglie [10, Bibliografia]*

Come accennato sopra, il teleriscaldamento è in grado di funzionare grazie alla corretta coordinazione tra i diversi elementi di cui è composto. Se trattata nel dettaglio, tale operazione risulta essere estremamente difficile poichè un gran numero di variabili concorrono a modificare le condizioni di progetto; un esempio è dato dalla temperatura esterna, in base alla quale può aumentare o diminuire la richiesta da parte dell'utenza. Non meno importante, come si vedrà nel paragrafo successivo, risulterà essere la velocità dell'acqua all'interno delle tubazioni.

4.2 Funzionamento

Indipendentemente dalla struttura con cui è organizzata la rete del teleriscaldamento, i principi alla base del suo funzionamento sono i medesimi. I fattori di cui bisogna tenere necessariamente conto sono il flusso termico scambiabile con l'utenza, l'energia termica complessivamente fornita, la temperatura di mandata all'utenza e la portata circolante. Tutti questi elementi hanno un'influenza sulle effettive condizioni di funzionamento della rete, nonchè sui costi che essa comporta.

Di seguito si propone quindi una breve introduzione di questi parametri, dei dati necessari per il calcolo e delle implicazioni apportate al sistema.

- *Flusso termico di progetto*: è il flusso termico massimo che il sistema è in grado di scambiare con l'utenza; esso può essere stimato partendo dai dati sulle temperature di progetto interne ed esterne e dalla volumetria che il sistema dovrà gestire. Risulta

$$\Phi_{max} = \frac{rV_{gestita}(T_{int,D} - T_{est,D})}{1000} \quad [kW] \quad (4.1)$$

dove il coefficiente di dispersione r è funzione del tipo di edificio in cui è installato il teleriscaldamento, ma comunque sempre <1

- *Energia fornita all'utenza*: tiene conto delle ore di funzionamento dell'impianto e dei gradi giorno della località in cui si installa il teleriscaldamento; questo parametro descrive il periodo lungo il quale è attivo l'impianto di riscaldamento. Si calcola

$$Q_{ut} = \frac{rV_{gestita}GGh}{1000} \quad [kWh] \quad (4.2)$$

- *Temperatura di mandata*: il fabbisogno dell'utenza non è costante nel tempo, ma varia a seconda della temperatura esterna. Poiché la portata circolante al secondario è tipicamente costante, per garantire la temperatura di progetto interna è necessario agire sulla temperatura di mandata del secondario. L'approccio è considerare un andamento lineare tra le due condizioni estreme, ovvero temperatura esterna pari a quella di progetto e pari alla temperatura interna. Il calcolo avviene tramite la formula 4.3

$$T_{mandata} = T_{mandata} + \frac{T_{int} - T_{est}}{T_{int} - T_{est,D}} (T_{mandata,D} - T_{int}) \quad [^{\circ}C] \quad (4.3)$$

Una volta stabilita la temperatura in mandata si avrà la temperatura di ritorno come diretta conseguenza.

- *Portata circolante*: il fattore portata lega insieme altri due parametri molto importanti, ovvero il diametro delle tubazioni e la potenza richiesta per il pompaggio. Laddove possibile è preferibile operare con temperature elevate, in modo da ridurre la portata e, a parità di condizioni, entrambi gli altri fattori.

Il legame presente tra i tre è espresso tramite le due relazioni riportate di seguito:

$$G = \frac{\Phi}{c(T_{mand,prim} - T_{rit,prim})} \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (4.4)$$

$$W_p = G \left(f \frac{L}{D} + \beta \right) \frac{v^2}{2} \quad [W] \quad (4.5)$$

Questi due fattori, essendo entrambi dipendenti dalla velocità, possono essere studiati al variare della stessa per determinarne il valore ottimale, ovvero quello che meglio si adatta al costo delle tubazioni eccessivamente grandi a fronte di

inevitabili costi legati al pompaggio. Una tipica situazione è riportata in figura 4.5.

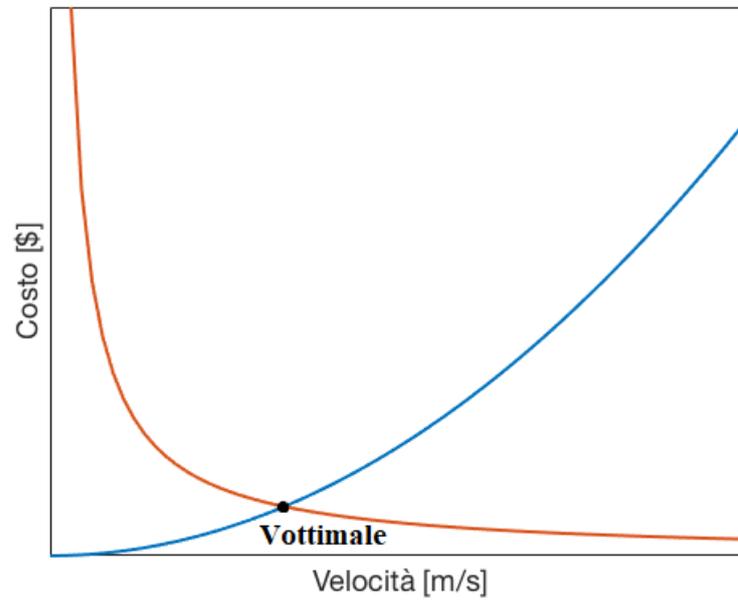


Figura 4.5: *Costi di pompaggio e investimento al variare della velocità nei tubi*

Capitolo 5

Descrizione dello studio

5.1 Analisi preliminare

Come riportato nel titolo del presente lavoro di tesi, l'obiettivo finale del lavoro svolto è quello di presentare al cliente finale un prototipo di accumulo da integrare all'attuale rete di teleriscaldamento, in particolare presso le sottostazioni dislocate lungo il percorso. Poiché l'accumulo deve essere dimensionato in accordo alla quantità di energia che deve poter contenere, il dato di ingresso imprescindibile per proseguire con l'analisi è l'energia che la sottostazione gestisce in condizioni di progetto. A partire da questa si definisce la quota da ripartire sull'accumulo, mentre la restante sarà gestita normalmente dalla centrale termica. Da un'analisi dei dati su tre sottostazioni condotta nel periodo di tirocinio antecedente alla stesura del presente elaborato, è emerso che l'accumulo deve gestire una potenza dell'ordine dei 100 kW. La scelta di questa potenza è volta ad "appiattire" la curva di carico della sottostazione, in particolare durante l'ora di picco mattutina. Come si vede in figura 5.1, sottraendo i 100 kW dal picco mattutino si ottiene una curva di carico più costante rispetto agli scenari differenti ipotizzati.

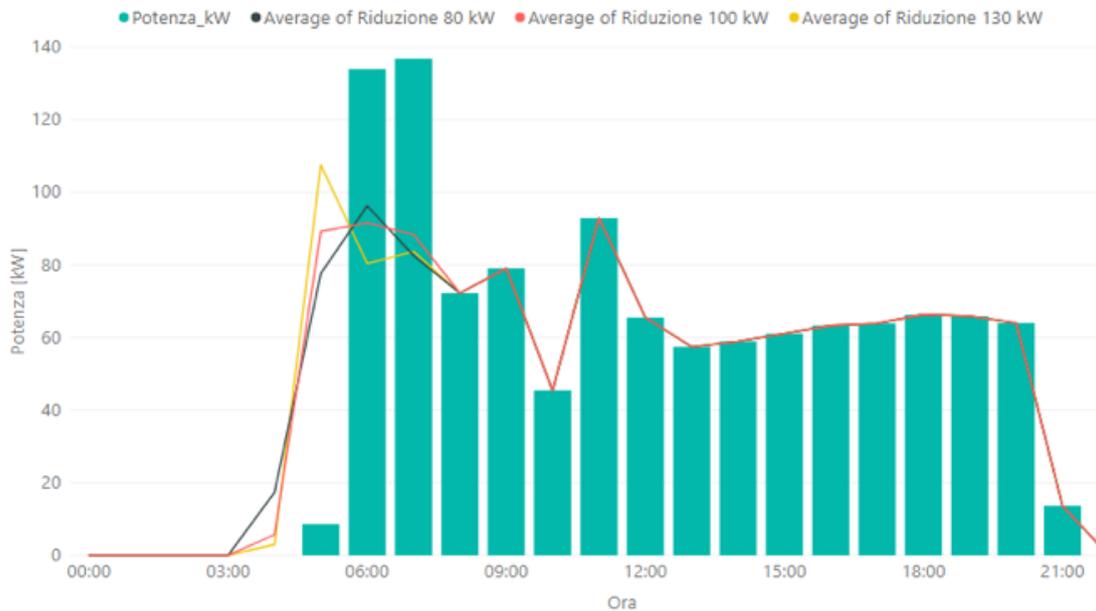


Figura 5.1: *Curva di carico ante e post accumulo*

Nel seguito si procederà con un primo dimensionamento che prende come riferimento le due condizioni estreme, ovvero con potenze da gestire che vanno da 80 a 130 kW.

5.2 Specifiche cliente

La progettazione è un lavoro che coinvolge più parti: il cliente, ovvero colui che commissiona il lavoro e che impone determinati vincoli di funzionamento e performance, e gli esperti del settore, i quali devono conciliare al meglio le richieste del cliente con le possibilità impiantistiche, presentando diverse opzioni e proponendo eventuali alternative. Stabilita l'opzione ritenuta migliore da entrambe le parti, è possibile proseguire con le operazioni.

Per il lavoro di tesi proposto l'iter è stato esattamente quello appena descritto. Le specifiche richieste dal cliente sono presentate di seguito:

- 1) $T_{fusione}$: $> 80^{\circ}\text{C}$
- 2) *Calore latente di fusione*: Nessuna richiesta specifica
- 3) *Carico incendio*: Tale per cui non sia richiesta un'autorizzazione aggiuntiva a quella già presente da parte dell'autorità competente, che nel caso specifico risulta essere il Corpo dei Vigili del Fuoco. Come riportato sul sito dei Vigili del

Fuoco, il nuovo regolamento in materia di prevenzione incendi è il D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151. Da quanto riportato in [6, Sitografia] evince che: “*il nuovo regolamento attualizza l’elenco delle attività sottoposte ai controlli di prevenzione incendi e, introducendo il principio di proporzionalità, correla le stesse a tre categorie, A, B e C, individuate in ragione della gravità del rischio piuttosto che della dimensione o, comunque, del grado di complessità che contraddistingue l’attività stessa. In secondo luogo, il provvedimento individua, per ciascuna categoria, procedimenti differenziati, più semplici rispetto agli attuali procedimenti, con riguardo alle attività ricondotte alle categorie A e B.*”

Dal riferimento normativo sopra richiamato è possibile stabilire se l’installazione del componente di accumulo possa rientrare in una delle tre categorie previste [12, Bibliografia]. Tra tutte le attività riportate nell’allegato I, quella che meglio descrive il caso in esame è la numero 70, che indica: “*Locali adibiti a depositi di superficie lorda superiore a 1000 m² con quantitativi di merci e materiali combustibili superiori complessivamente a 5.000 kg.*” A fronte dei vincoli imposti da questa definizione, il locale in cui dovrà essere installato il serbatoio di accumulo non rientra in nessuna delle tre categorie, e di conseguenza anche i materiali organici e bio-organici, che di per sè presentano un grado di infiammabilità, possono essere utilizzati senza la necessità di ulteriori autorizzazioni.

- 4) *Costo*: Nessuna richiesta specifica
- 5) *Tossicità*: Nessuna richiesta specifica, sebbene la condizione preferibile sia quella con il minor grado possibile.
- 6) *Fine vita del materiale*: Livello di decomposizione a cui questo è sottoposto, il quale deve essere il più contenuto possibile.
- 7) *Durabilità*: Stabilità delle proprietà termiche del materiale, in particolare in termini di temperatura di fusione e calore latente. Per applicazioni industriali di questa portata il minimo richiesto è 10 anni. Ipotizzando 1 ciclo di carica/scarica al giorno per un periodo di 180 giorni all’anno, si richiede un minimo di 2000 cicli nei 10 anni di funzionamento.

Definite le specifiche si può iniziare con la ricerca dei materiali disponibili attualmente sul mercato. Tale ricerca è stata effettuata dividendo i PCM nelle tre categorie Organici, Bio-organici e Inorganici. I dati per le singole voci sono stati ricavati dalla letteratura [13, Bibliografia] e dalle schede tecniche fornite dai produttori dei PCM presenti in laboratorio [14, Bibliografia]. Il risultato è riportato in tabella 5.1.

(a) <i>Tabella riassuntiva</i>				(b) <i>Legenda</i>	
	Organici	Bio-organici	Inorganici		
T fusione	2	2	2		
Calore latente	Nessuna richiesta specifica				
Carico incendio	1*	1*	n.a.	x	Non rispetta
Costo	Nessuna richiesta specifica			1	Rispetta in modo accettabile
Tossicità	2	2	x	2	Rispetta completamente
Fine vita	x	1	2		
Durabilità	x	2	2		

* = si rimanda al punto 3 dell'elenco precedente

Tabella 5.1: *Risultato analisi PCM*

Dal confronto tra le specifiche richieste dal cliente e le caratteristiche dei PCM presentati, evince come i prodotti organici non siano decisamente compatibili per l'applicazione in esame (infatti hanno una vita e una stabilità che non ne permette l'utilizzo a lungo termine). Al contrario i bio-organici e gli inorganici presentano caratteristiche più adatte e saranno tenute in considerazione per le analisi successive. In particolare il materiale di riferimento per i test svolti durante i mesi di lavoro sarà un inorganico con temperatura di fusione a 72 °C.

5.3 Dimensionamento su dati di targa

Stabilito il prodotto da utilizzare nel prototipo, un primo dato su quelle che saranno le dimensioni dell'accumulo da integrare al circuito può essere facilmente ottenuto partendo dai dati di progetto disponibili lato utenza (energia da accumulare/estrarre) e lato costruttore (densità di energia del PCM ed entalpia di fusione). A partire da questa informazione si è anche in grado di ricavare l'ordine di grandezza dell'investimento richiesto. Come riportato nel paragrafo precedente, è nota l'energia che l'accumulo deve essere in grado di gestire: da un minimo di 80 kW ad un massimo di 130 kW per un tempo di 1 h circa, ovvero un'energia che spazia dagli 80 ai 130 kWh. Riportando il valore nelle unità del Sistema Internazionale è necessario moltiplicare per 3600, ottenendo così l'espressione dell'energia in J.

A questo punto, utilizzando le proprietà del materiale scelto si è in grado di risalire al volume occupato dall'accumulo.

$$M_{PCM} = \frac{E_{accumulo}}{\Delta h_{fusione}} \quad [kg] \quad (5.1)$$

$$V_{PCM} = \frac{M_{PCM}}{\rho_{PCM}} \quad [m^3] \quad (5.2)$$

Il prezzo indicativo del materiale, se disponibile, si ricava semplicemente dalla formula 5.3.

$$Costo_{PCM} = M_{PCM} Prezzo_{PCM} \quad [€] \quad (5.3)$$

Alcune considerazioni:

- a) Il volume così calcolato (formula 5.2) tiene conto del solo materiale per l'accumulo termico. Per ottenere le dimensioni complete del componente funzionante è necessario prevedere dello spazio aggiuntivo per l'inserimento della strumentazione.
- b) Il prezzo del PCM utilizzato nella formula 5.3 si riferisce al costo di acquisto del solo materiale. Il prezzo finale del sistema dovrà prevedere anche il costo della componentistica e della realizzazione.

- c) Per tutti i calcoli sopra riportati sono stati utilizzati dati di targa forniti dal produttore del materiale PCM. Il prototipo finale, tuttavia, utilizzerà i valori ricavati dalle prove sperimentali in laboratorio.

Nelle tabelle 5.2 e 5.3 si riportano i risultati finali basati sui calcoli sopra esposti per le due tipologie di PCM che rispettano i requisiti.

80 kWh			130 kWh		
E accumulata	80	kWh	E accumulata	130	kWh
Massa PCM	1600	kg	Massa PCM	2600	kg
Volume PCM	1,01	m^3	Volume PCM	1,64	m^3

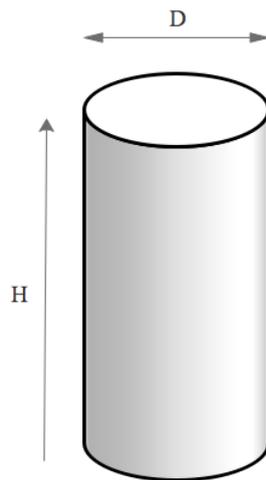
Tabella 5.2: *Calcoli con PCM inorganico*

80 kWh			130 kWh		
E accumulata	80	kWh	E accumulata	130	kWh
Massa PCM	1398	kg	Massa PCM	2272	kg
Volume PCM	1,64	m^3	Volume PCM	2,67	m^3

Tabella 5.3: *Calcoli con PCM bio-organico*

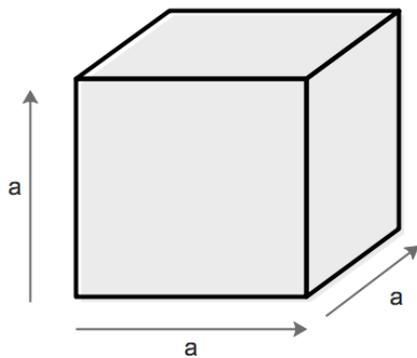
Una volta stabilite le dimensioni dell'accumulo, è necessario verificare che siano compatibili con gli spazi disponibili nella sottostazione; un ulteriore fattore decisionale è il tipo di scambiatore scelto per attuare lo scambio termico. A livello esemplificativo si propone il calcolo per due geometrie possibili, una cilindrica e l'altra rettangolare. I dati di ingresso per questa operazione sono le dimensioni massime nelle tre direzioni che l'accumulo può avere: in questo modo si può stabilire la forma che meglio si adatta allo spazio a disposizione.

- *Geometria cilindrica:* imponendo il vincolo sulla dimensione più stringente (altezza del cilindro o diametro) si ricava la dimensione incognita invertendo la formula per il calcolo del volume (formula 5.4)

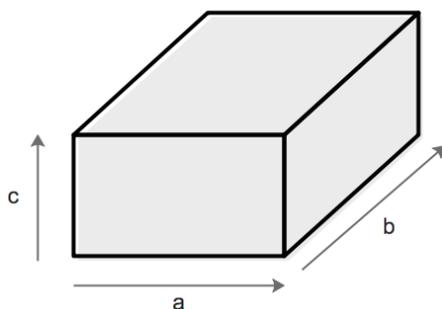


$$V = \pi \frac{D^2}{4} H \quad [m^3] \quad (5.4)$$

- *Geometria rettangolare*: per questa geometria le direzioni su cui si può intervenire sono 3; generalmente non è vantaggioso avere un componente che sia troppo sbilanciato su una delle direzioni, quindi come primo approccio è conveniente considerare tale geometria come cubica, ricavare il valore del lato del cubo che permette di avere il volume desiderato (invertendo la formula 5.5) e poi da questo tenere fisso uno o due dei lati e modificare i restanti. Se così facendo le dimensioni rispettano i vincoli in tutte le direzioni si può considerare chiuso l'aspetto del dimensionamento. Nel caso in cui siano noti a priori i vincoli basta semplicemente imporli nella formula 5.6 ed estrarre il valore del lato nella direzione che si vuole conoscere.



$$V = a^3 \quad [m^3] \quad (5.5)$$



$$V = a b c \quad [m^3] \quad (5.6)$$

Capitolo 6

Attività di laboratorio

Nel seguente capitolo verranno esposte le metodologie seguite per caratterizzare i PCM utilizzati nelle prove condotte, tramite l'utilizzo della componentistica presente in laboratorio. Saranno presentati i circuiti utilizzati per le prove e verrà fornita una breve spiegazione del funzionamento. A seguire saranno presentati i risultati ottenuti, da cui potranno essere tratte le informazioni per procedere allo studio di fattibilità del sistema di accumulo.

6.1 Descrizione della strumentazione

La sperimentazione è un processo che deve essere condotto in maniera controllata e che offra a colui che la gestisce la possibilità di intervenire per modificare o interrompere il funzionamento. Ciò è possibile grazie a un'adeguata strumentazione in termini di componenti principali (serbatoi, riscaldatori elettrici, piastre riscaldanti, dissipatori) e di controllo (misuratori di temperatura, pompe di circolazione, valvole). Questi strumenti permettono inoltre al personale di adattare la conduzione dell'esperimento in base ai risultati attesi, osservando così anche la risposta del sistema alle variazioni imposte dall'esterno.

6.1.1 Componenti principali

Si presenta l'elenco della strumentazione utilizzata e presente presso il laboratorio della ditta i-TES completo di alcuni dati tecnici.

Componente	Dati tecnici
Accumulo acqua grande	Materiale: Acciaio Inox
	Volume serbatoio vuoto: 100 - 110 L
	Volume serbatoio con fiale: 90 - 95 L
	Temperatura di esercizio: +5 - +90 °C
Accumulo acqua piccolo	Materiale: Acciaio Inox
	Volume serbatoio: 5 L
Prototipo accumulo PCM	Materiale: Acciaio Inox
	Volume serbatoio: 1 L
Resistenza elettrica	Potenza: 1500 W
	Temperatura massima: 110 °C
Scambiatore a 4 flussi	Materiale: Acciaio Inox
Radiatore	Materiale: Plastica
	Portata aria: 0,083 kg/s
Piastra riscaldante	Tensione di esercizio: 230 V
	Potenza: 800 W
Batteria termica	Temperatura di fusione: 58 °C
	Temperatura massima: 80 °C
	Potenza resistenza elettrica: 2800 W

Tabella 6.1: *Componenti principali*

Seguendo lo stesso ordine usato in tabella 6.1 si riportano le foto dei componenti utilizzati



(a) Accumulo acqua 100 L



(b) Accumulo acqua 5 L



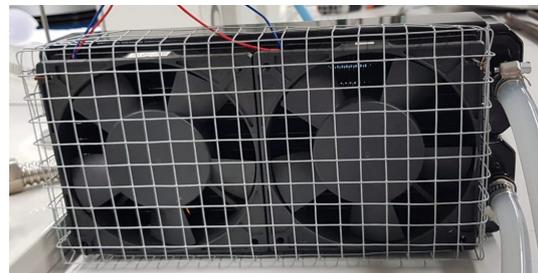
(c) Prototipo PCM



(d) Resistenza elettrica



(e) Scambiatore a 4 flussi



(f) Radiatore



(g) Piastra riscaldante



(h) Batteria termica

Figura 6.1: Componenti principali

6.1.2 Strumenti di controllo e regolazione

Si presenta l'elenco della strumentazione utilizzata come supporto per la raccolta dei dati e l'eventuale controllo del sistema in caso di malfunzionamento.

Componente	Dati tecnici
Data logger di Temperatura 1	Numero sonde: 4 Tipologia sonde: ad immersione
Data logger di Temperatura 2	Numero termocoppie: 4 Tipologia termocoppie: a contatto
Pompa di circolazione OBIEGOWA	Posizione 1: Portata 18 L/min; Potenza 38 W Posizione 2: Portata 36 L/min; Potenza 53 W Posizione 3: Portata 48 L/min; Potenza 72 W
Pompa SHURFLO	Tensione di esercizio: 12 V Pressione di esercizio: 1,4 bar Portata: 1,8 L/min
Pompa STERWINS	Tensione di esercizio: 220-240 V Potenza: 250 W Portata massima: 1500 L/h
Termocoppie J, K	Campo di misura: $0 < T < +250^{\circ}$ Precisione: $\pm 2,2^{\circ}$ Risoluzione: $0,01^{\circ}$
Sonda a immersione	Campo di misura: $-40 < T < +100^{\circ}$ Precisione: $\pm 0,15^{\circ}$ Risoluzione: $0,002^{\circ}$ a 25°
Riscaldatore istantaneo	Tensione di esercizio: 220-250 V Potenza: 3000 W

Tabella 6.2: *Strumentazione di controllo e regolazione*

Seguendo lo stesso ordine usato in tabella 6.2 si riportano le foto dei componenti utilizzati



(a) Data logger con termocoppie



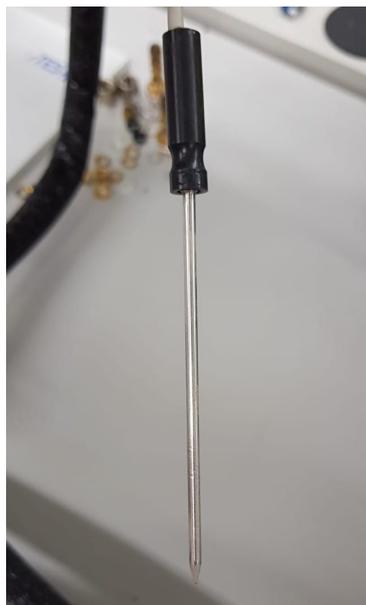
(b) Pompa OBIEGOWA



(c) Pompa SHURFLO



(d) Pompa STERWINS



(e) Sonda a immersione



(f) Riscaldatore

Figura 6.2: Strumentazione di controllo e regolazione

6.2 Descrizione del metodo

Il percorso logico seguito fin dall'inizio del lavoro può essere brevemente sintetizzato con il seguente approccio:

- Caratterizzazione del funzionamento dei diversi componenti utilizzati in laboratorio, al fine di stabilire le perdite a cui gli stessi sono soggetti (Circuito 1) con conseguente costruzione di un modello governato da un preciso bilancio energetico
- Caratterizzazione del materiale utilizzato per le prove (Circuiti 2 e 3)
- Riproduzione della rete di teleriscaldamento nelle condizioni ante e post inserimento della batteria di accumulo.

I risultati sono stati ottenuti tramite l'utilizzo di tre circuiti differenti che vengono qui di seguito esposti.

6.2.1 Circuito 1

Al fine di riprodurre nel modo più fedele possibile il funzionamento reale che l'accumulo dovrà sostenere una volta installato nella sottostazione del teleriscaldamento, è stato realizzato un circuito che potesse simulare le fasi di carica e scarica del sistema. Per motivi puramente pratici, il circuito non è in grado di gestire nè le potenze nè le quantità di energia messe in gioco nella sottostazione; l'ipotesi di partenza è stata quindi quella di considerare valido il fattore scala, ovvero la possibilità di trasferire i risultati ottenuti dal circuito su un sistema più ampio modificando semplicemente la quantità di materiale e le dimensioni dell'accumulo.

In figura 6.3 si propone uno schema semplificato del circuito presente in laboratorio, in cui si distinguono i tre componenti essenziali: il circuito primario (provvede alla carica), lo scambiatore e l'utenza (circuito secondario, provvede alla scarica). Il sistema proposto utilizza acqua come fluido termovettore per entrambi i circuiti, mentre la dissipazione dell'energia termica assorbita al secondario è ottenuta tramite uno scambiatore aria-acqua.

Le prove sono state condotte seguendo una logica che permettesse l'identificazione di fasi ben distinte, in modo tale da poterle analizzare in modo separato.

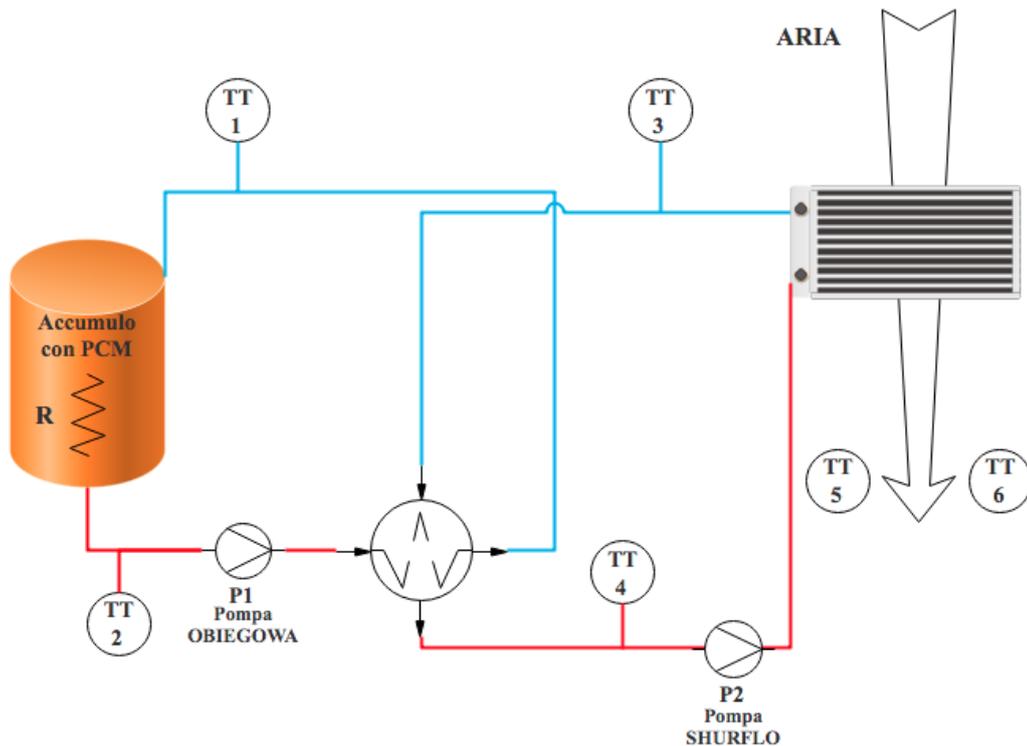


Figura 6.3: *Circuito 1*

La procedura standard è così composta:

- *Fase 1: Controllo della strumentazione* - Si azzerano i contatori delle termocoppie e dei consumi. Si annota il valore di partenza della volumetria lato primario.
- *Fase 2: Carica dell'accumulo* - Si imposta la temperatura finale voluta all'accumulo. In questo modo si suddividono gli esperimenti su livelli differenti di temperatura, con la possibilità di evidenziare le differenze esistenti.
- *Fase 3: Bianco* - Questa fase è necessaria per portare a regime le ventole del radiatore e le termocoppie poste a valle dello stesso. In questa fase si avvia anche la pompa P1 in modo da preriscaldare i tubi che arrivano allo scambiatore.
- *Fase 4: Accensione del circuito secondario* - Questa è la fase di mantenimento, in cui primario e secondario sono in comunicazione mentre è ancora presente la sorgente calda lato primario.
- *Fase 5: Scarica forzata* - La sorgente calda è spenta, e ha inizio la vera fase che permette di simulare la scarica apportata dal circuito di raffreddamento.

- *Fase 6: Spegnimento del sistema* - Le pompe di circolazione e la strumentazione sono scollegati. Si registra la volumetria finale lato primario.

Tutti gli esperimenti sono stati eseguiti secondo l'iter suddetto e con le stesse modalità operative, alla conclusione dei quali è stata redatta una tabella riassuntiva di tutti i dati di interesse dello studio.

Il funzionamento del circuito è il seguente: la resistenza elettrica R scalda l'acqua con PCM all'interno dell'accumulo; quando il sistema è arrivato alla temperatura impostata la pompa P1 (OBIEGOWA impostata in velocità 3) inizia a far circolare l'acqua proveniente dal primario all'interno dello scambiatore, mentre la pompa P2 (SHUR-FLO) è ancora spenta. Allo stesso tempo l'aria inizia a fluire attraverso il radiatore e la temperatura è rilevata dalle termocoppie TT5 e TT6. Il sistema è mantenuto in queste condizioni per un periodo tale da permettere ai tubi del primario di portarsi alla temperatura dell'acqua. Quando questo processo è terminato si avvia la pompa P2 e le termocoppie TT1, TT2, TT3 e TT4 registrano le temperature dell'acqua in ingresso e in uscita dallo scambiatore. Una volta terminata la fase di bianco la resistenza R è scollegata, mentre tutti gli altri componenti rimangono attivi. Al termine dell'esperimento tutti i sensori vengono scollegati e i dati importati in un foglio di calcolo per l'analisi.

La curva caratteristica ottenuta da un esperimento condotto seguendo queste fasi è riportata in figura 6.4

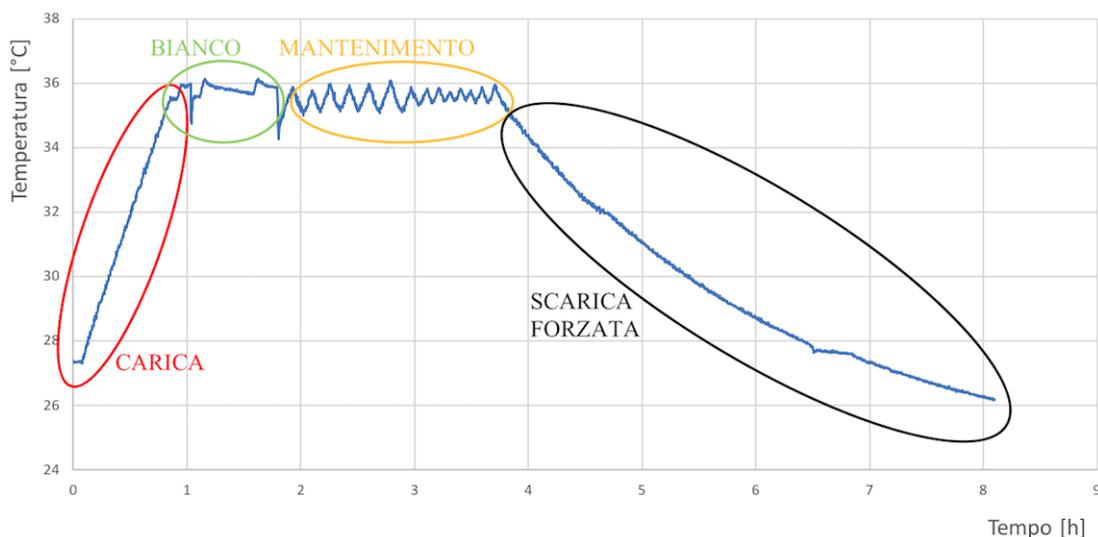


Figura 6.4: Profilo della temperatura media nel serbatoio

6.2.2 Circuito 2

L'obiettivo principale degli esperimenti condotti sul circuito 2, di cui è possibile vedere una rappresentazione schematica in figura 6.5, è stato quello di sperimentare una nuova tipologia di scambio termico tra l'acqua calda e il PCM rispetto al Circuito 1: questa soluzione prevede infatti il passaggio dell'acqua all'interno di tubi inseriti in un contenitore pieno di PCM. In questo modo è stato possibile ricavare importanti informazioni sulle caratteristiche di scambio termico del PCM stesso, come la conduttività media e il calore latente di fusione. Queste informazioni, nonostante nella maggior parte degli esperimenti siano i normali dati di ingresso, non è detto che siano conosciute quando si tratta di PCM; nel caso specifico, inoltre, il materiale utilizzato è totalmente da studiare poiché nasce come prototipo per la sperimentazione. Questa stessa caratteristica non ci permette di utilizzare il PCM nel Circuito 1 poiché la quantità di materiale disponibile è molto contenuta, all'incirca 1,5 kg. Come visibile in figura 6.5, ingresso e uscita dal radiatore sono stati colorati in verde; questa notazione è utilizzata al solo fine di indicare un tratto di circuito variabile. Infatti, a seconda dell'obiettivo dell'esperimento, il radiatore può essere attivato o meno: così facendo, si avranno situazioni in cui l'acqua in uscita risulta a più bassa temperatura rispetto a quella in ingresso o, in caso di radiatore spento, alla stessa temperatura. Questa flessibilità del circuito permette di studiare aspetti differenti analizzando gli stessi dati: per esempio si può attuare una verifica della potenza dispersa al radiatore in parallelo alla fase di carica/scarica del PCM.

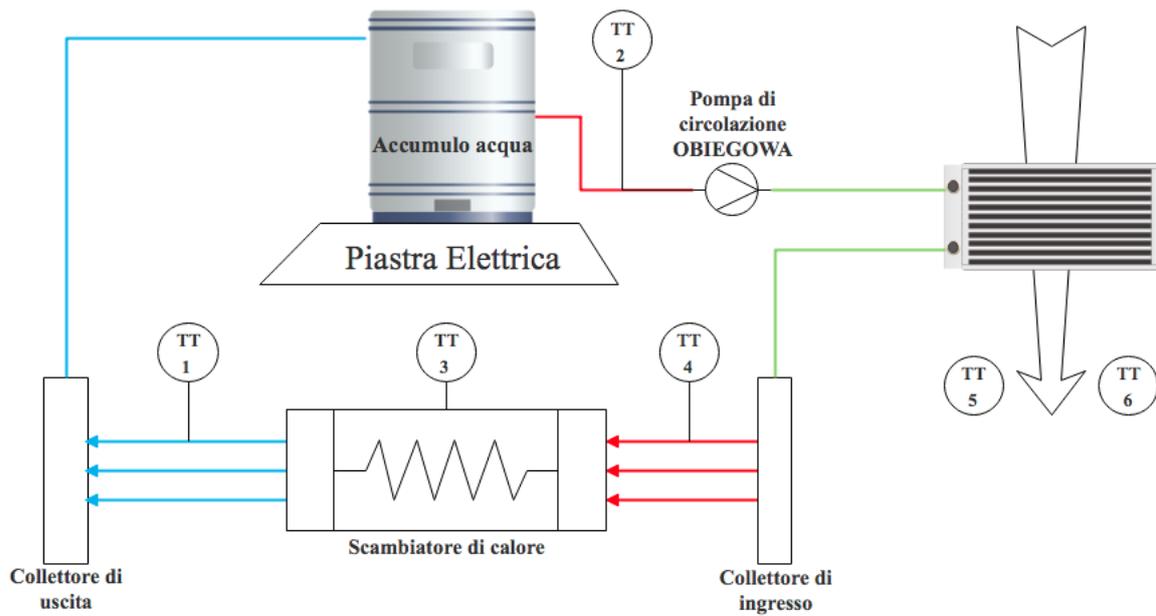


Figura 6.5: *Circuito 2*

6.2.3 Circuito 3

Con il circuito 3 si conclude il ciclo di esperimenti volti alla caratterizzazione dei componenti e materiali presenti in laboratorio. In particolare si è provveduto al collegamento tra il serbatoio da 100 L con la batteria termica al fine di studiare diversi aspetti riguardanti le efficienze di carica/scarica dei due componenti. L'obiettivo finale dello studio è quello di replicare nel modo più fedele possibile il funzionamento della rete di teleriscaldamento nelle ore di interesse per l'integrazione dell'accumulo. Il percorso così pensato prevede la costruzione di un circuito che simuli i due circuiti separatamente, in modo da evidenziare le differenze esistenti tra il funzionamento senza accumulo e quello successivo con l'integrazione dell'accumulo. Lo schema rappresentativo del circuito è visibile in figura 6.6.

La logica con cui è stato costruito il circuito è la seguente:

- In verde è riportata la porzione di circuito con il compito di simulare il primario della rete: il riscaldatore istantaneo (R1) è utilizzato come centrale termica.
- In arancione è riportata la porzione di circuito da utilizzare per la scarica della batteria termica.

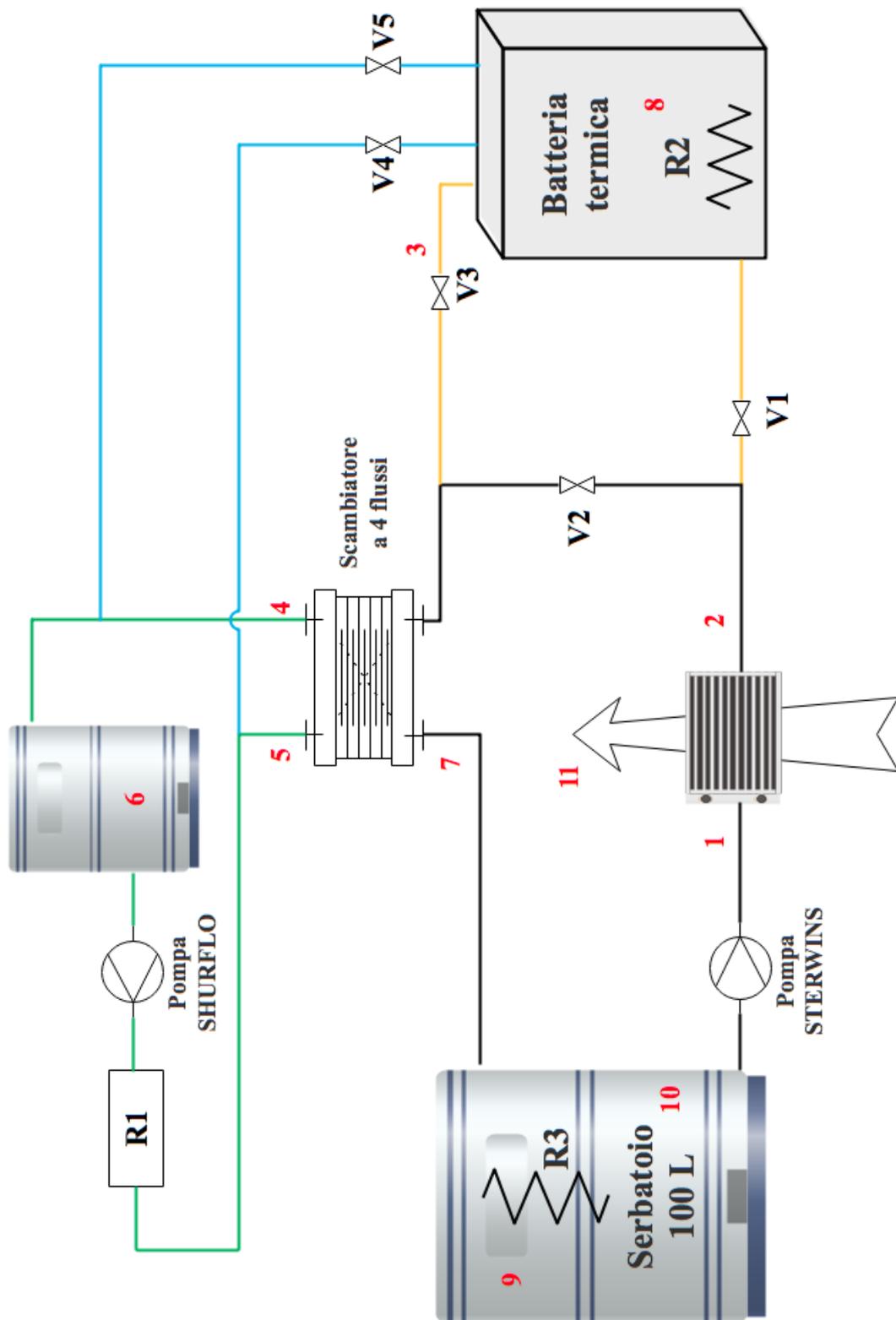


Figura 6.6: Circuito 3

- In blu è riportata la porzione di circuito da utilizzare per la carica, tramite circuito idraulico, della batteria termica.
- In nero è riportata la porzione di circuito che simula l'utenza: il serbatoio da 100 L è utilizzato come polmone termico, al fine di riprodurre la volumetria di acqua che, al momento dell'accensione del circuito, comporta un'inerzia termica notevole causa del picco evidenziato in centrale. Il dissipatore interpreta il ruolo dei terminali negli ipotetici appartamenti, ovvero la dissipazione dell'energia termica.

Il vantaggio di un sistema così costruito è il fatto di avere i circuiti della carica e della scarica del PCM separati e indipendenti. In questo modo è possibile fondere il PCM nella batteria evitando il riscaldamento dell'intero circuito, il quale rimane alla temperatura desiderata pronto per essere attivato a carica completa. Da questo momento in poi si è quindi in grado di replicare al meglio il reale funzionamento della rete di teleriscaldamento, con la presenza di acqua nelle tubazioni alla temperatura di circa 25 °C. Grazie alla presenza delle valvole V1, V2 e V3 è possibile, quando richiesto, bypassare la batteria di accumulo e studiare il sistema nella fase di bianco (funzionamento attuale, senza accumulo). Le valvole V4 e V5 permettono invece di collegare direttamente la batteria termica al primario, rendendone possibile la carica per via idraulica. Per comprendere meglio la simbologia utilizzata nello schema del circuito si rimanda alla tabella 6.3.

Numero	Significato
1	Termocoppia tipo J
2	Termocoppia tipo J
3	Termocoppia tipo J
4	Termocoppia tipo J
5	Termocoppia tipo K
6	Sonda a immersione
7	Sonda a immersione
8	Termocoppia tipo K
9	Termocoppia tipo K
10	Termocoppia tipo K
11	Sonda a immersione

Tabella 6.3: *Legenda simboli Circuito 3*

6.3 Descrizione dell'analisi dei dati

Le informazioni ricavabili dai dati misurati sono di grande interesse per determinare i flussi di potenza e di energia scambiati nel sistema di simulazione da confrontare con le quantità richieste dal cliente. In particolare si è focalizzata l'attenzione sull'analisi del rateo di dispersione di energia nei diversi componenti del circuito; questo parametro è infatti l'indicatore principale delle prestazioni del componente. La fase successiva è volta alla caratterizzazione del materiale per l'accumulo, e quindi lo studio della conducibilità termica e del calore latente di fusione. In conclusione si passa allo studio complessivo del sistema, e quindi alla determinazione delle efficienze di scarica che esso è in grado di garantire. Poiché l'analisi della carica del serbatoio è stata condotta in un periodo differente da quello in cui si è lavorato per la stesura della tesi, in questo paragrafo si riportano i ragionamenti seguiti per caratterizzare le fasi di mantenimento e scarica forzata.

La trattazione dell'intero sistema è stata condotta con l'idea di fornire un *bilancio energetico* del circuito che possa essere rappresentato in forma di diagramma di Sankey, ovvero una forma grafica che permette di evidenziare le quote di energia in ingresso

al sistema in parallelo alle quote in uscita (sottoforma di energia rilasciata all'utenza e di perdite verso l'ambiente). Il percorso seguito per arrivare al bilancio finale parte dai dati importati dai sensori di temperatura e dai consumi presenti nel sistema: dopo averli riportati su un foglio Excel[®], si è proceduto come riportato di seguito, avendo ritenuto valide le seguenti ipotesi:

- Condizioni stazionarie
- Proprietà costanti
- Fluidi incomprimibili

Con queste condizioni la potenza gestita da un fluido circolante all'interno di un sistema vale

$$\dot{Q}_{\text{primario}} = \dot{m}_{\text{primario}} c_p \Delta T \quad [kW] \quad (6.1)$$

6.3.1 Perdite al Serbatoio di accumulo

Le perdite al serbatoio di accumulo sono state analizzate durante la fase 4 (il mantenimento) perchè questa è la condizione più significativa per il componente in questione. La fase di mantenimento è caratterizzata dall'alternanza tra momenti in cui la resistenza elettrica è accesa (ON) e altri in cui è spenta (OFF): il passaggio da uno stato all'altro è identificabile tramite il voltaggio riportato dal misuratore dei consumi, il quale per lo stato ON riporta un voltaggio pari a 5V mentre per lo stato OFF un voltaggio pari a 0V.

Ragionando sempre in termini di bilancio energetico, le fasi ON e OFF presentano formulazioni diverse; infatti, se le perdite per dispersione sono sempre presenti, durante la fase ON è necessario aggiungere il contributo dell'energia elettrica trasformata completamente in energia termica immessa dalla resistenza. In formule si ha:

$$E_{\text{Elettrica}} = mc\Delta T + E_{\text{dispersaON}} \quad [kWh] \quad (6.2)$$

$$E_{\text{dispersaOFF}} = mc\Delta T \quad [kWh] \quad (6.3)$$

Poiché la temperatura dell'accumulo è mantenuta all'incirca costante durante queste fasi, anche l'energia dispersa dovrà essere tale. Dal momento che le termocoppie sono collegate a *data logger* con intervallo di campionamento impostato a 10 secondi, si è riscontrata la possibilità che i dati registrati non fossero compatibili con il processo in atto: ad esempio, tra due campionamenti della fase ON, si registrava un decremento della temperatura all'interno del serbatoio piuttosto che un incremento. Il motivo di queste letture errate è da attribuirsi alle termocoppie stesse, le quali non sono sufficientemente sensibili a individuare piccole variazioni. Per ovviare a questo inconveniente, il salto termico inserito nel bilancio considera le due temperature a intervalli regolari di 1 minuto. Completato questo processo, il rateo di dispersione è ottenuto semplicemente dividendo l'energia dispersa per l'intervallo di tempo considerato. Il risultato finale è preso come media tra tutti gli intervalli, nelle fasi ON e OFF.

6.3.2 Perdite allo Scambiatore

Il bilancio in termini di potenza sullo scambiatore si può scrivere

$$\dot{Q}_{\text{primario}} = \dot{Q}_{\text{secondario}} + \dot{Q}_{\text{dispersa}} \quad [kW] \quad (6.4)$$

dove le potenze lato primario e secondario si calcolano facilmente tramite la formula 6.1, in cui si utilizzano i rispettivi valori di portata e salti termici. La potenza dispersa in ambiente è ricavabile dalla differenza tra le due.

Un aspetto che è necessario precisare riguarda nuovamente la sensibilità degli strumenti utilizzati per le misure: poiché il salto termico sul fluido è contenuto, è possibile che l'errore sulla misura sia confrontabile con il Δ misurato, portando a valori completamente inattendibili. In questi casi, come ad esempio una potenza entrante al secondario maggiore di quella rilasciata dal primario, la potenza dispersa è stata impostata a 0. Come prevedibile, il problema è riscontrato con maggior frequenza col procedere della fase di scarica, la quale comporta minori potenze in gioco. Un'ulteriore ipotesi utilizzata è che la potenza dispersa così calcolata si mantenga costante per tutto l'intervallo di tempo considerato (10 secondi), in modo tale da calcolare l'energia dispersa come $\dot{Q}_{\text{dispersa}}\Delta t$. La somma di questi contributi rappresenta il totale dell'energia disper-

sa allo scambiatore. Per ottenere il rateo di dispersione è sufficiente dividere questa quantità per il tempo utile della scarica forzata, come riportato in formula 6.5

$$HeatLossRate = \frac{E_{tot,dispersa}}{t_{scarica}} \quad [kW] \quad (6.5)$$

6.3.3 Perdite al Radiatore

Il componente in questione è stato analizzato con le stesse procedure presentate per lo scambiatore, con la sola differenza delle portate in gioco: una portata di acqua e una seconda di aria. Per il calcolo della portata di aria gestita dal radiatore si è fatto uso di un anemometro digitale; per facilitare e rendere più attendibile la misura effettuata, l'aria in uscita dal radiatore è stata convogliata all'interno di una sezione rettangolare di dimensioni note: la misura è stata condotta in 6 punti differenti e come valore definitivo si è considerata la media aritmetica. La posizione di riferimento è identificabile dalla figura 6.7 in cui si riporta la sezione di passaggio dell'aria e i valori misurati nelle relative aree di passaggio.

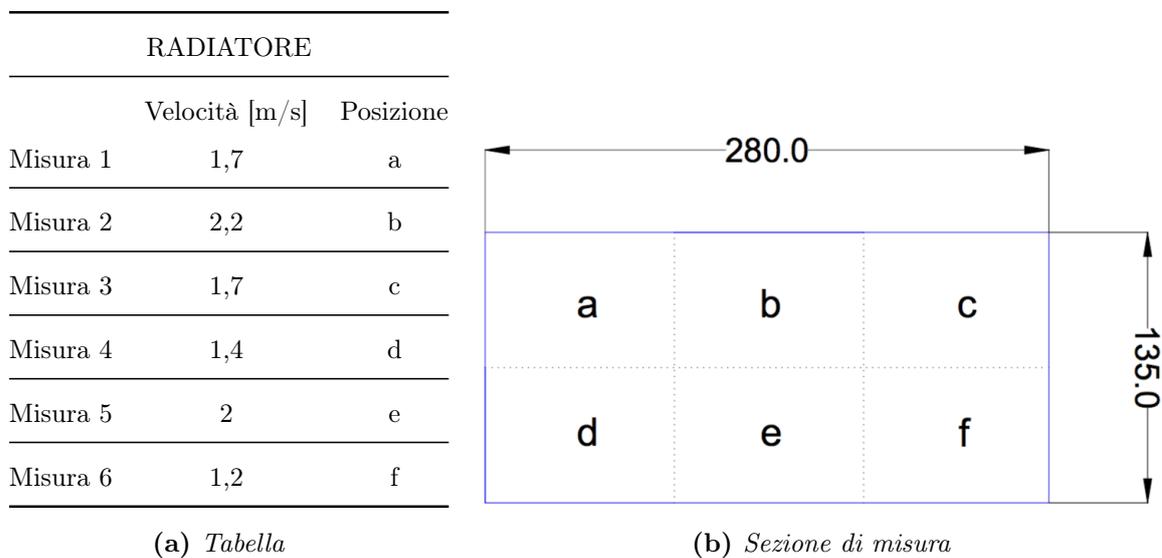


Figura 6.7: Misure con anemometro

Una volta stabilita la velocità dell'aria, tramite la formula 6.1 con i dati riferiti all'aria, si è in grado di ricavare la potenza che questa estrae dall'acqua. Come per lo scambiatore si considera la differenza tra le due potenze pari alla quota dispersa dal componente.

6.3.4 Conducibilità termica del PCM

Al fine di stabilire il comportamento del PCM (Inorganico 72°C) a contatto con una sorgente termica esterna, calda o fredda che sia, è di primaria importanza sapere come questo è in grado di propagare il flusso termico. Il parametro che fornisce tale informazione è la conducibilità termica, ovvero la facilità con cui il mezzo trasferisce un flusso termico all'interno della struttura. Per semplicità si considera che per la fase liquida il meccanismo di trasmissione del calore prevalente sia la conduzione, in quanto la viscosità del PCM è così elevata da rendere trascurabili i moti convettivi. Per l'analisi proposta sono stati utilizzati i dati ricavati da esperimenti condotti con il circuito 2, per il quale si hanno informazioni sulle temperature lato acqua e lato PCM. A causa della complessità della geometria da studiare, si è proceduto sostituendo ai tre tubi reali un tubo che avesse una superficie di scambio equivalente. La scelta di questa soluzione parte dalla considerazione che per lo scambio termico in esame il parametro che maggiormente ne influenza l'andamento sia la superficie di scambio piuttosto che la portata di acqua circolante. Una rappresentazione in sezione delle due geometrie è riportata in figura 6.8.

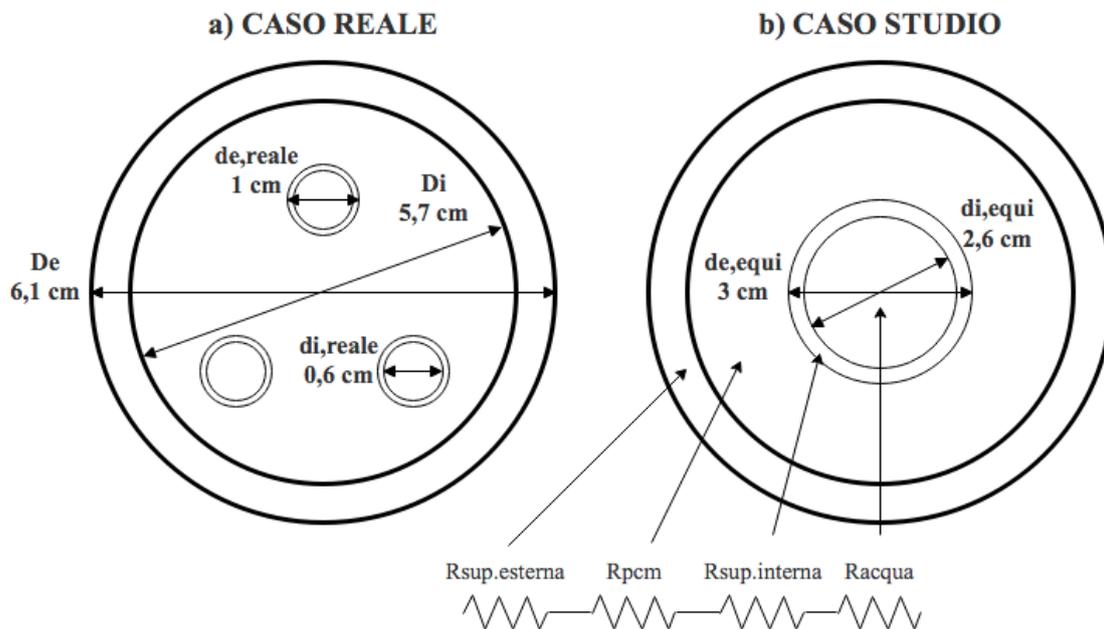


Figura 6.8: Sezione reale (a) e sezione studio (b)

In questo modo è stato possibile ricondurre il calcolo delle resistenze termiche a una serie di resistenze in coordinate cilindriche, della forma (vedi formula 6.6)

$$R = \frac{1}{2\pi Lk} \ln \left(\frac{D_{esterno}}{D_{interno}} \right) \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (6.6)$$

La resistenza totale risulta essere la somma delle singole resistenze. Una volta stabilita la geometria si è passati al calcolo della conducibilità termica del PCM per via indiretta: il primo passaggio è stato quello di calcolare il flusso termico presente tra l'acqua all'interno del tubo e la superficie esterna del tubo stesso. Questo è possibile sotto l'ipotesi di condizioni stazionarie, assunta valida, in cui vale la relazione 6.7.

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{tot}} = \frac{T_{acqua} - T_{sup.interna}}{R_{acqua} + R_{sup.interna}} \quad [W] \quad (6.7)$$

Per la continuità del flusso, la stessa quantità dovrà essere gestita dagli strati successivi, ovvero il PCM e lo scambiatore metallico. Invertendo la formula 6.7 si ottiene il valore della resistenza totale, che in questo caso è dato dalla somma della resistenza del PCM più quella della superficie esterna (vedi formula 6.8). Poiché quest'ultima è una caratteristica del materiale ed è costante, per differenza si ottiene il valore della resistenza del PCM (formula 6.9).

$$R_{tot} = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{T_{sup.interna} - T_{sup.esterna}}{\Phi} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (6.8)$$

$$R_{pcm} = R_{tot} - R_{sup.esterna} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (6.9)$$

Infine, invertendo la formula 6.6 per il PCM, si è in grado di esplicitare il valore della conducibilità termica.

6.3.5 Calore latente di fusione

Il materiale sotto analisi è nuovamente l'inorganico a 72 °C; la prova è condotta sul Circuito 2 e consiste nel portare a completa fusione il PCM con successiva scarica fatta con acqua fredda. Il procedimento più dettagliato è riportato di seguito:

- 1) Riscaldamento circuito con acqua a 80 °C
- 2) Spegnimento del riscaldamento quando il PCM è completamente fuso, ovvero quando la termocoppia TT3 di figura 6.5 segna una temperatura di almeno 74 °C
- 3) Svuotamento del serbatoio fino al livello della presa inferiore; spegnimento della pompa di circolazione
- 4) Chiusura del circuito e aggiunta di acqua dalla rete fino a ottenere una temperatura all'interno del serbatoio di 50 °C circa
- 5) Riapertura del circuito e riaccensione della pompa di circolazione

Nel momento in cui si attiva nuovamente la pompa di circolazione, il serbatoio immette nel circuito acqua a 50 °C, mentre riceve l'acqua a 80 °C ancora presente all'interno dei tubi. Segue un breve periodo di miscelazione che comporta un leggero incremento della temperatura del serbatoio. Nonostante questo, lo scambiatore vede al suo interno acqua più fredda rispetto alla temperatura di solidificazione del PCM e quindi ha inizio il fenomeno del rilascio dell'energia termica all'acqua. Per l'analisi del calore latente si considera il range 73 - 71 °C, in modo da rendere meno rilevanti gli errori sulla misura della termocoppia TT3. L'energia rilasciata nella scarica è ottenuta dal bilancio energetico applicato allo scambiatore: l'incremento di temperatura misurato sull'acqua passata al suo interno è provocato interamente dalla cessione di calore da parte del PCM poiché lo scambiatore è completamente coibentato e si considerano nulle le perdite per dispersione. La formula di riferimento è la 6.1; avendo impostato il campionamento a 1 secondo, questo bilancio in termini di potenza può essere interpretato anche in termini di energia [kJ]. Il calore latente sarà semplicemente dato dalla somma delle energie nel periodo di analisi, come riportato nella formula 6.10

$$\Delta h_{fusione} = \sum_{T=73^{\circ}C}^{T=71^{\circ}C} E_{rilasciata} \quad [kJ] \quad (6.10)$$

Per poter confrontare il valore calcolato con quello di targa dichiarato dal venditore è necessario dividere per la massa di PCM all'interno dello scambiatore.

$$\Delta h_{fusione} = \frac{\Delta h_{fusione}}{M_{PCM}} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (6.11)$$

6.3.6 Efficienza di scarica

Con efficienza di scarica si intende esprimere la capacità di un sistema di accumulo di rilasciare verso un sistema secondario l'energia precedentemente accumulata. In generale ci si aspetta un'efficienza minore dell'unità poiché parte di questa energia è dispersa in ambiente. La raccolta dati inizia dal collegare la resistenza della batteria termica (vedi figura 6.6) ad un misuratore di tensione, dal quale è possibile risalire al tempo esatto di attivazione della resistenza; in questo intervallo di tempo la resistenza funziona a potenza costante e il calcolo dell'energia risulta agevolato, come riportato alla formula 6.12.

$$E_{consumata} = P_{Resistenza} \Delta t \quad [kJ] \quad (6.12)$$

Trascurando le dispersioni termiche della batteria, rese tali da un adeguato strato di isolante, l'energia elettrica consumata è interamente trasferita al PCM, il quale la accumula nelle due forme sensibile e latente. Calcolando l'efficienza di scarica come rapporto tra l'energia rilasciata in fase di scarica e l'energia accumulata (formula 2.7), con questo approccio abbiamo stabilito il termine a denominatore. Per determinare il dato mancante si è focalizzata l'attenzione sul flusso di acqua circolante all'interno della batteria: tramite le termocoppie TT2 e TT3 si valutano le temperature di ingresso e uscita dell'acqua, e con la formula 6.1 la potenza scambiata. Assumendo questa potenza costante per tutto l'intervallo di tempo intercorso tra un campionamento e l'altro (impostato a 10") è possibile utilizzare nuovamente la formula 6.12 applicata

ai componenti in esame. In definitiva l'energia complessivamente estratta risulta dalla somma delle energie nei singoli intervalli di tempo per tutta la durata dell'esperimento.

6.4 Risultati ottenuti

Tutte le metodologie sopra descritte e le analisi dei dati effettuate hanno permesso di ricavare le informazioni necessarie al proseguimento del lavoro. Infatti, basandosi sull'esito di queste prove, è possibile dare inizio al lavoro di progettazione del componente, il quale risulterà più o meno simile al prototipo basato sui dati di targa a seconda che i risultati di laboratorio riproducano in modo più o meno preciso i valori dichiarati dal fornitore. Seguendo l'ordine con cui sono stati presentati i circuiti, anche in questa sezione si partirà con l'esporre i risultati sul Circuito 1.

6.4.1 Bilancio Energetico sul Circuito 1

L'impostazione di questo circuito è stata pensata fin dall'inizio con lo scopo di caratterizzare i diversi componenti dal punto di vista della performance termica: analizzare quindi le perdite a cui essi sono soggetti a seconda del livello di temperatura a cui sono sottoposti. Il risultato di questo processo è riportato in tabella 6.4, dalla quale sono stati presi i valori che compongono il bilancio energetico rappresentato in forma grafica in figura 6.9: in nero sono rappresentati i flussi termici in ingresso al sistema, in verde quelli in uscita.

A fronte dei risultati riportati è immediato il seguente commento: dato che la potenza entrante nel sistema è minore di quella dispersa dal circuito (data dalla somma della potenza termica ceduta all'aria e dalle dispersioni nei vari componenti), l'acqua all'interno del serbatoio tende a raffreddarsi. Questo aspetto è ancora più visibile al crescere della temperatura circolante all'interno del sistema, in quanto le perdite aumentano mentre la quota in ingresso rimane costante.

Data esperimento		06/07	09/07	11/07	13/07
Livello di temperatura	[°C]	40	50	60	80
T iniziale	[°C]	27	22	23	25
T finale	[°C]	39	49	55	77
E sensibile	[kWh]	1,15	2,58	3,13	5,11
E latente	[kWh]	-	-	-	0,84
E elettrica consumata	[kWh]	3,05	4,16	5,96	8,25
Perdite all'accumulo	[kW]	0,85	0,85	1,27	1,32
t scarica forzata	[h]	4,5	4,5	4	5,5
T a fine scarica forzata	[°C]	27	28	30	33
Perdite allo scambiatore	[kW]	0,28	0,41	0,59	1,27
Perdite al radiatore	[kW]	0,45	0,58	0,55	1,47

Tabella 6.4: Carica con resistenza e scarica forzata con radiatore sul Circuito 1

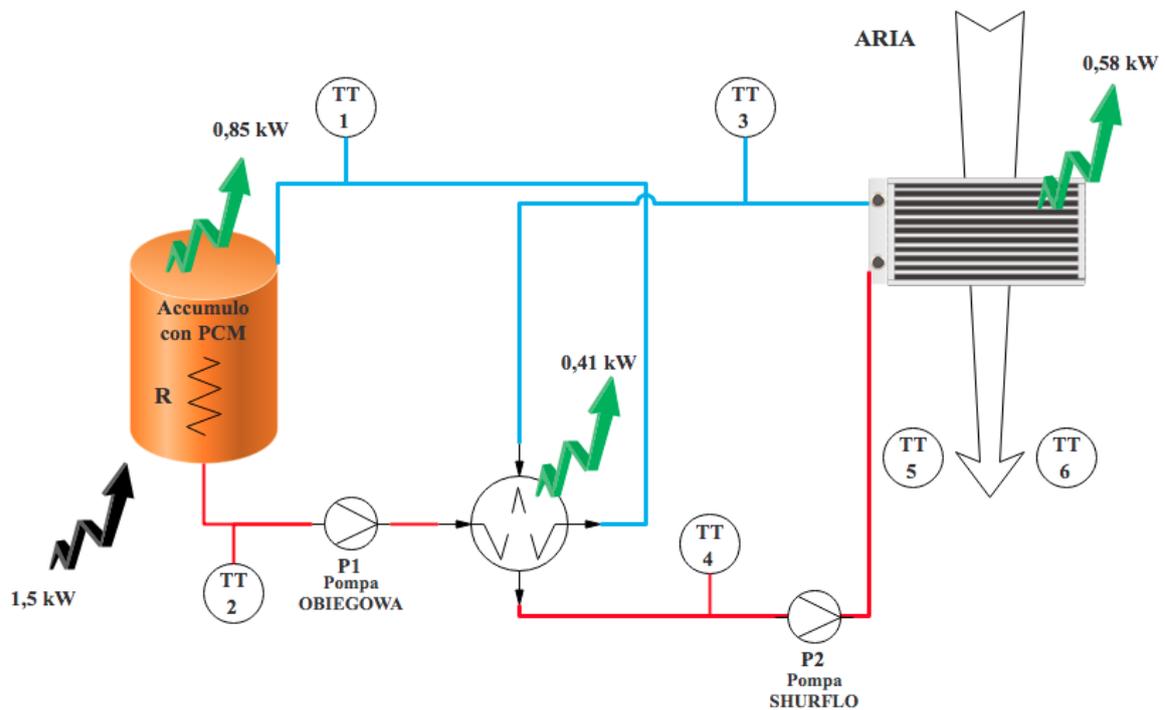


Figura 6.9: Bilancio energetico Circuito 1 (a 50 °C)

6.4.2 Caratterizzazione del PCM72

In un lavoro che coinvolge delle sostanze ancora in fase di sperimentazione, come il caso dei PCM, è d'obbligo pensare a delle prove che permettano di verificare (almeno in prima approssimazione) le proprietà termiche della sostanza stessa dichiarate dal fornitore. Poiché per i calcoli futuri uno dei parametri più importanti risulta essere il calore latente, in questo paragrafo si presentano i valori ottenuti su questo parametro dalle prove sostenute sul Circuito 2. Dalle stesse è inoltre stato ricavato un valore di conducibilità termica medio del materiale, il quale non era riportato nella scheda tecnica.

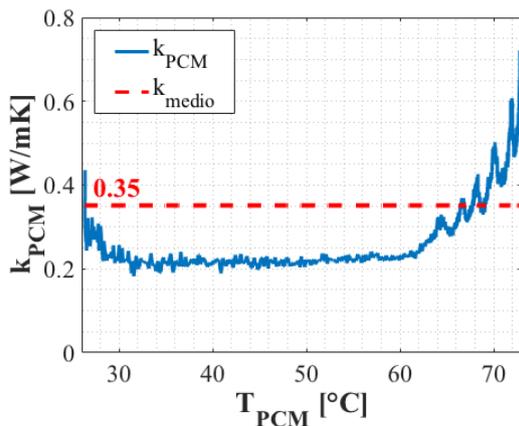
M_{PCM}	1,16	kg	M_{PCM}	1,16	kg	M_{PCM}	1,16	kg
Δh_{targa}	180	kJ/kg	Δh_{targa}	180	kJ/kg	Δh_{targa}	180	kJ/kg
$\Delta h_{calcolato}$	171,4	kJ/kg	$\Delta h_{calcolato}$	184,9	kJ/kg	$\Delta h_{calcolato}$	172	kJ/kg
Errore	-5	%	Errore	3	%	Errore	-4,5	%
(a) Prova del 31/08			(b) Prova del 04/09			(c) Prova 1 del 05/09		
M_{PCM}	1,16	kg	M_{PCM}	1,16	kg	M_{PCM}	1,16	kg
Δh_{targa}	180	kJ/kg	Δh_{targa}	180	kJ/kg	Δh_{targa}	180	kJ/kg
$\Delta h_{calcolato}$	200,4	kJ/kg	$\Delta h_{calcolato}$	181,7	kJ/kg	$\Delta h_{calcolato}$	172,1	kJ/kg
Errore	11,3	%	Errore	1	%	Errore	-4,4	%
(d) Prova 2 del 05/09			(e) Prova 1 del 07/09			(f) Prova 2 del 07/09		

Figura 6.10: Prove per calore latente PCM 72 °C

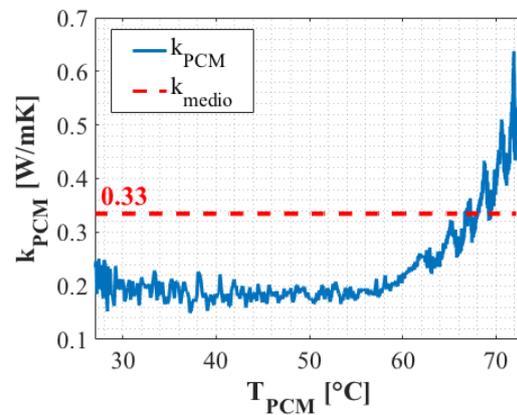
Da quanto si evince dalla figura 6.10 il valore di calore latente ricavato dalle prove sperimentali rispecchia quello dichiarato nella scheda tecnica. L'errore tra i due valori è sempre contenuto all'interno di una fascia accettabile.

Il secondo importante parametro presentato è la conducibilità termica del PCM. Il procedimento seguito per ricavare questo valore è già stato riportato nel paragrafo "Conducibilità termica del PCM", ma per interpretare in modo più coerente i grafici seguenti sono necessarie alcune considerazioni: in primo luogo, lo studio è stato reso

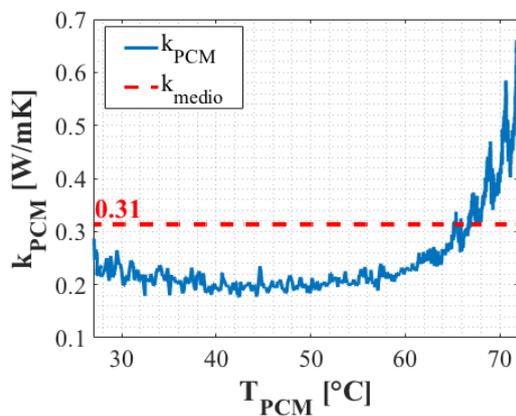
più semplice rispetto al caso reale, trascurando alcuni fenomeni come il transitorio e i moti convettivi all'interno della fase liquida del mezzo; in secondo luogo la termocoppia utilizzata per la rilevazione della temperatura è posizionata all'esterno dello scambiatore e quindi riporta il livello di temperatura della fascia più esterna del materiale, quella che non entra in contatto diretto con la risorsa calda. Questo fatto non permette di identificare al meglio la fase di transizione da solido a liquido, in quanto questa inizia dagli strati più caldi, ovvero quelli interni. In figura 6.11 si riportano i risultati ottenuti.



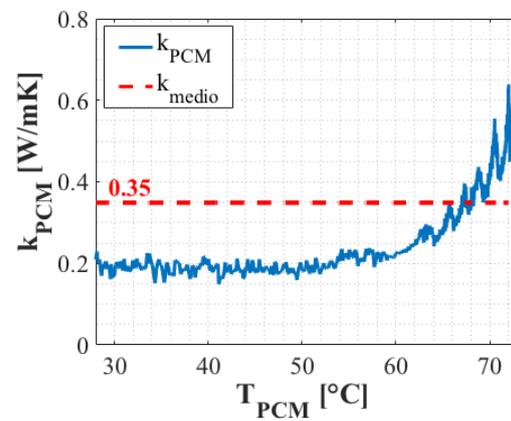
(a) Prova del 10/09



(b) Prova dell' 11/09



(c) Prova del 12/09



(d) Prova del 13/09

Figura 6.11: Prove per conducibilità PCM 72 °C

Osservando gli andamenti riportati in figura 6.11 si possono trarre le seguenti considerazioni: come prevedibile, il comportamento della sostanza è assimilabile a quello di un materiale isolante, con valori di conducibilità che si aggirano poco al di sopra dello zero. Questo andamento rimane all'incirca costante su tutto il range del sensibile al

di sotto del punto di fusione; a partire dai 60 °C si nota un deciso incremento della conducibilità, che continua a mano a mano che ci si avvicina alla temperatura di fusione. Il trend, completato il processo di fusione, dovrebbe portare a un nuovo crollo dei valori di conducibilità intorno al valore medio. A livello sperimentale non è stato possibile portare il PCM oltre il punto di fusione, ma una conferma di quanto detto è reperibile dalla relazione ENEA [15, Bibliografia, pag.13].

6.4.3 Simulazione del sistema reale

I risultati ottenuti dagli esperimenti condotti sul Circuito 3 sono fondamentali per determinare la fattibilità o meno del progetto iniziale, ovvero installare un accumulo che integri una prefissata quota di potenza termica in parallelo alla centrale termica. In primo luogo è stato possibile risalire alle tempistiche richieste dal processo: scaricare in modo completo (si intende la quota latente, dominante rispetto alla sensibile) la batteria di accumulo ha richiesto circa 30', tempo che rientra abbondantemente all'interno della fascia di 1h prevista. Successivamente si è passati all'analisi della grandezza di interesse, ovvero l'energia rilasciata in scarica. Il procedimento seguito è stato esposto al paragrafo precedente, mentre i risultati ottenuti sono proposti di seguito:

$E_{elettrica}$	8,82	kWh
quota latente	7	kWh
quota sensibile	1,82	kWh
$E_{scaricata}$	4,58	kWh
Efficienza di scarica	52	%

Tabella 6.5: *Efficienza di scarica*

E' necessaria una nota in merito al valore appena esposto: questo, infatti, è il risultato di un singolo esperimento che non permette quindi di considerare l'esito della prova completamente attendibile; il motivo per cui non sono state condotte ulteriori prove trova spiegazione nella priorità dei test da svolgere. Si è preferito tralasciare questo aspetto per dedicare maggiore attenzione all'adattamento del Circuito 3 con il quale ci si pone nella condizione di simulare il funzionamento della rete di teleriscaldamento.

Analizzando i dati provenienti da una sottostazione durante il suo funzionamento reale è stato tracciato il profilo delle temperature alla quale il circuito secondario è sottoposto. L'obiettivo finale del Circuito 3 è quindi riprodurre nel modo più fedele possibile questo andamento, e successivamente integrare il contributo dell'accumulo per mantenere tale curva invariata ma diminuendo il tempo di funzionamento della resistenza R1. In termini concreti tutto il tempo in cui la resistenza è spenta rispetto alla condizione precedente rispecchia la diminuzione di potenza comportata in centrale termica dall'accumulo. La curva delle temperature, visibile in figura 6.12, è stata ricavata applicando ai dati un filtro sulla temperatura esterna: essa è stata posta < 0 per porre lo studio nelle condizioni più gravose.

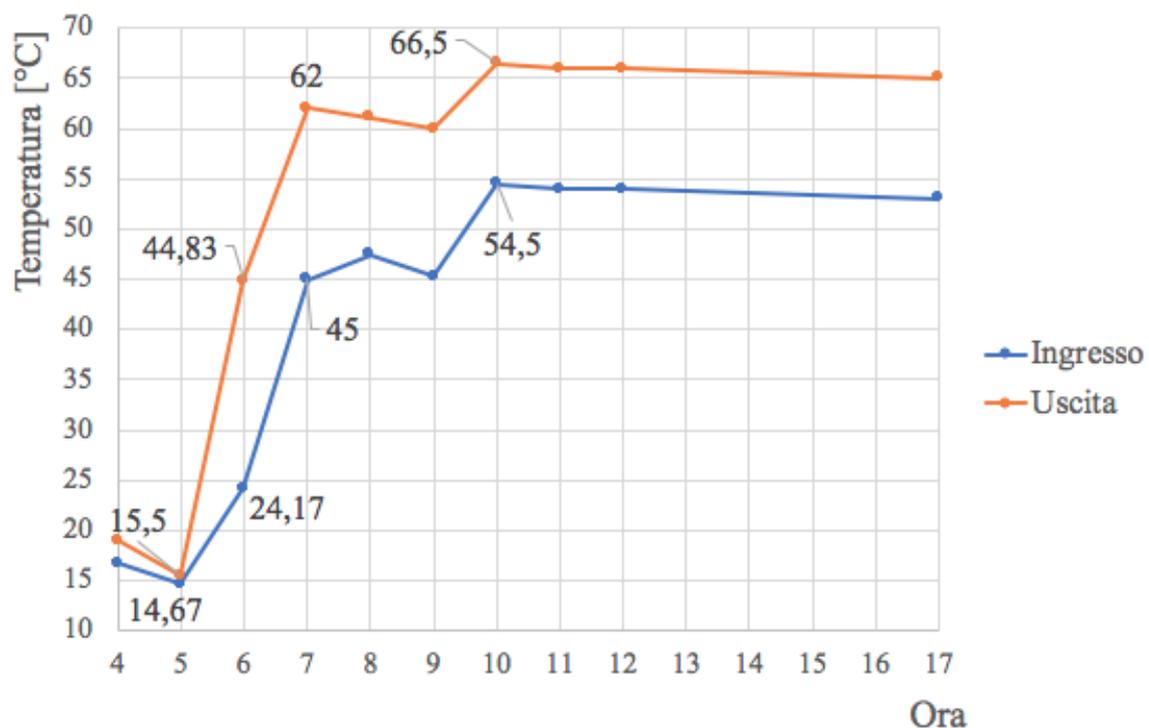


Figura 6.12: Curva delle temperature lato secondario

Si osserva un deciso incremento della temperatura sia lato ingresso sia lato uscita, con il rispettivo Δ che si mantiene circa costante a un valore prossimo a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Questo trend si verifica fino al raggiungimento delle condizioni stazionarie a partire dalle 10. In laboratorio si è provato a replicare la rampa di salita primaria agendo sull'accensione/spegnimento delle due resistenze disponibili. Conoscendo il salto termico da indurre all'acqua e il quantitativo di acqua da scaldare si ricava l'energia complessiva da fornire al sistema; imponendo il vincolo sul tempo di carica è possibile ricavare il valore di

potenza in grado di garantire il funzionamento esposto. In tabella 6.6 sono riportati i calcoli effettuati:

Massa acqua	108	kg
ΔT richiesto	24	$^{\circ}C$
Tempo massimo	45	min
Energia richiesta	3	kWh
Potenza minima	4,02	kW

Tabella 6.6: *Potenza minima per riprodurre la rampa reale*

Poiché la somma delle resistenze utilizzate è pari a 4,5 kW, si è in grado di riprodurre l'andamento desiderato: questo, però, dovrà essere tenuto sotto controllo andando ad agire sulle resistenze stesse tramite un meccanismo di accendi/spegni. Un test è stato dedicato a questo scopo, con i seguenti risultati:

Tempo [min]	T teorica [$^{\circ}C$]	Tmedia [$^{\circ}C$]	Rinterna	Resterna
0	28,92	28,93	SI	NO
1	29,46	28,93	SI	SI
2	30,00	29,54	SI	SI
3	30,54	30,54	SI	SI
4	31,08	31,49	SI	SI
5	31,63	33,26	SI	NO
6	32,17	34,67	SI	NO
7	32,71	34,46	SI	NO
8	33,25	34,67	SI	NO
9	33,79	34,27	SI	NO
10	34,33	34,67	SI	NO
11	34,88	34,685	SI	SI
12	35,42	34,855	SI	SI
13	35,96	35,385	SI	SI
14	36,50	36,075	SI	SI

Tabella 6.7 continua dalla pagina precedente

Tempo [min]	T teorica [°C]	Tmedia [°C]	Rinterna	Resterna
15	37,04	36,98	SI	SI
16	37,58	38	SI	SI
17	38,13	39,385	SI	SI
18	38,67	40,745	SI	NO
19	39,21	41,635	SI	NO
20	39,75	42,32	SI	NO
21	40,29	41,7	SI	NO
22	40,83	41,11	SI	NO
23	41,38	40,93	SI	SI
24	41,92	40,805	SI	SI
25	42,46	41,605	SI	SI
26	43,00	42,51	SI	SI
27	43,54	43,425	SI	SI
28	44,08	44,63	SI	SI
29	44,63	45,46	SI	NO

Tabella 6.7: Riproduzione della rampa di carica reale

Si osserva un andamento molto prossimo a quello aspettato, con alcuni punti di oscillazione intorno al valore atteso, dati dalla modalità di azionamento delle resistenze attuata. E' da specificare il significato della temperatura media riportata: questa è presa tale a partire dai due valori ricavati dalle termocoppie posizionate nei punti 9 e 10 indicati in figura 6.6.

Riportando i dati della tabella sopra su un grafico si ha conferma visiva dell'ottima riproduzione della curva desiderata (figura 6.13). Un'ultima considerazione riguarda la temperatura di partenza per il test effettuato: essa è superiore a quella del caso reale (circa 24 °C), ma si assume che l'andamento così studiato possa essere riportato in modo costante lungo tutta la fascia di temperatura coinvolta dalla sottostazione.

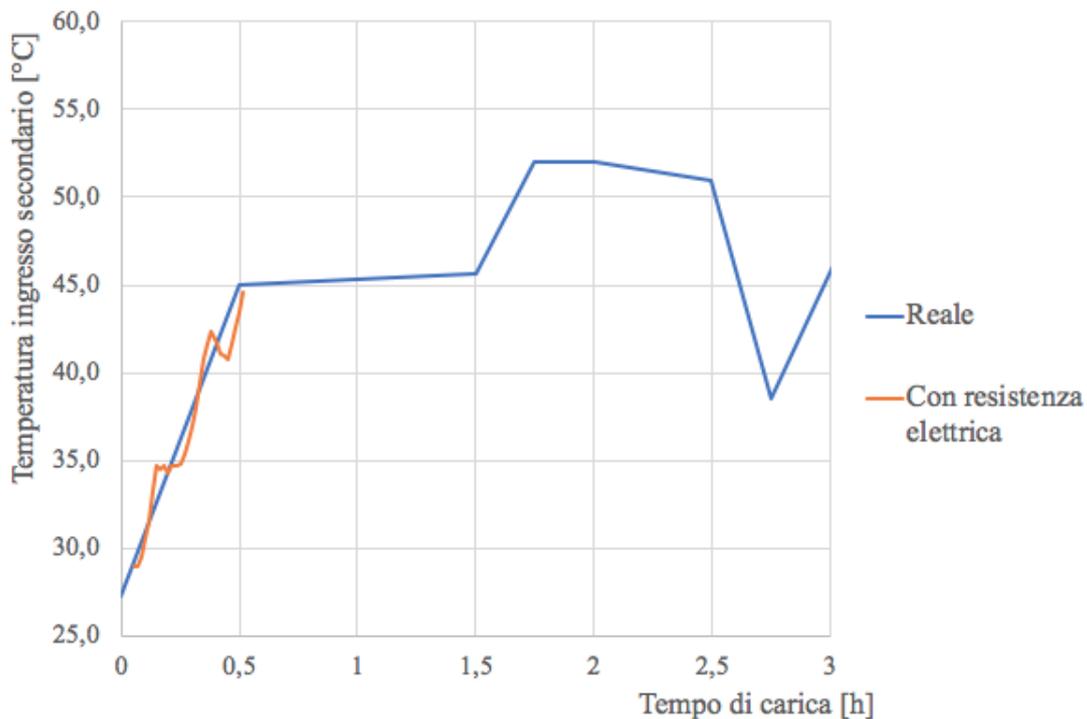


Figura 6.13: Riproduzione rampa di salita del 27/09

Al fine di confrontare l'attuale funzionamento con il futuro integrato dall'accumulo, lo stesso esperimento è stato riprodotto aggiungendo la batteria di accumulo presente in laboratorio, già precedentemente caricata (in questo modo si simula la carica notturna con successiva scarica nelle ore mattutine). Da come si vede in figura 6.14, la rampa di salita iniziale è eccessivamente rapida rispetto a quella desiderata: tale riscontro è tuttavia da interpretare in modo positivo, in quanto verifica la possibilità di sostituire la resistenza elettrica con la batteria di accumulo. Per adattare il *trend* a quello richiesto è necessaria una semplice regolazione sulla portata in ingresso alla batteria. Questa configurazione offre quindi tutte le caratteristiche necessarie a renderla alternativa alla precedente.

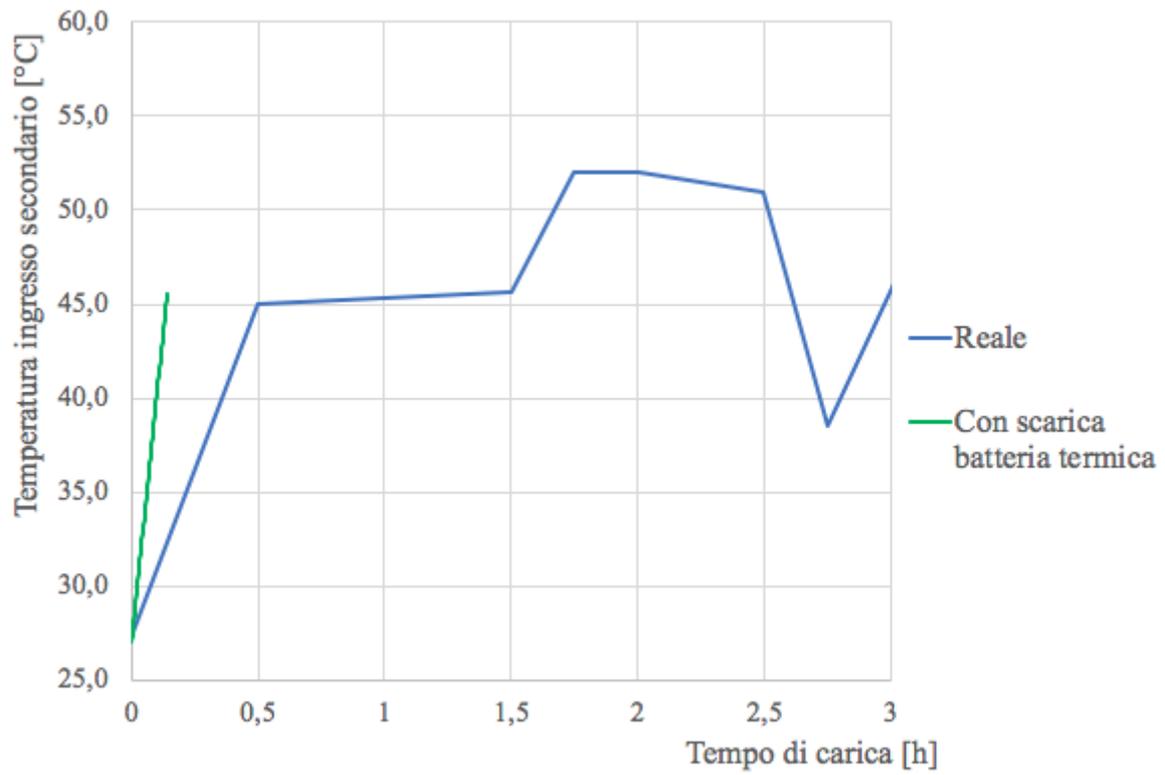


Figura 6.14: Riproduzione rampa di salita del 28/09

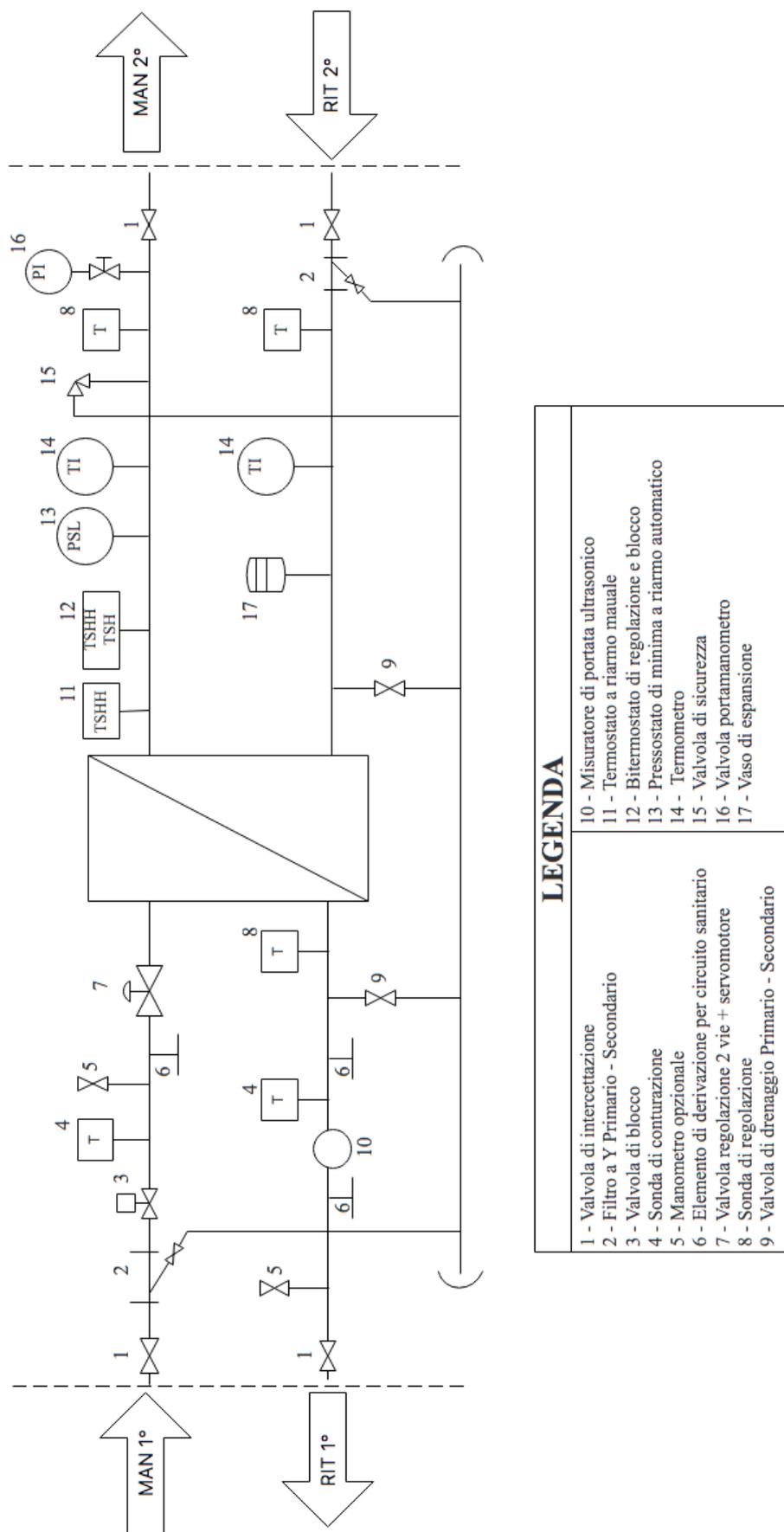
Capitolo 7

Studio di fattibilità

7.1 Schema dell'impianto

Lo studio di fattibilità proposto, nonostante non porti alla versione definitiva del lavoro, deve considerare tutte le fasi a cui il nuovo componente dovrà essere sottoposto: tra queste l'installazione all'interno del sistema già presente e funzionante. Per poter posizionare in modo coerente l'accumulo, è però necessario disporre dello schema impiantistico della sottostazione, dal quale è possibile trarre importanti informazioni sulla strumentazione presente, la regolazione, le dimensioni delle tubazioni e la potenza dello scambiatore tra primario e secondario. Per motivi aziendali, queste ultime informazioni sono state omesse dallo schema riportato (vedi figura 7.1), mentre è rimasta invariata la posizione dei vari componenti.

Poiché gli schemi impiantistici non prevedono il dimensionamento in scala dei componenti rappresentati, si può procedere con l'inserimento dell'accumulo nonostante non se ne conoscano le dimensioni, le quali saranno determinate al paragrafo successivo.



LEGENDA	
<p>1 - Valvola di intercettazione 2 - Filtro a Y Primario - Secondario 3 - Valvola di blocco 4 - Sonda di conturazione 5 - Manometro opzionale 6 - Elemento di derivazione per circuito sanitario 7 - Valvola regolazione 2 vie + servomotore 8 - Sonda di regolazione 9 - Valvola di drenaggio Primario - Secondario</p>	<p>10 - Misuratore di portata ultrasonico 11 - Termostato a riarmo manuale 12 - Bitermostato di regolazione e blocco 13 - Pressostato di minima a riarmo automatico 14 - Termometro 15 - Valvola di sicurezza 16 - Valvola portamanometro 17 - Vaso di espansione</p>

Figura 7.1: Schema di riferimento per la sottostazione

Il circuito primario e secondario differiscono, oltre che per i livelli di temperatura, anche per i livelli di pressione: infatti, per far circolare acqua a 120 °C ed evitarne l'ebollizione, si porta l'intero circuito primario a una pressione di circa 2 bar. Questa caratteristica aggrava il collegamento tra l'accumulo e le tubazioni del primario, vanificando il beneficio delle alte temperature per la fase di carica. Per ovviare a questo problema la soluzione ricade nell'effettuare entrambe le fasi di carica e di scarica lato secondario. Il posizionamento dell'accumulo con i relativi collegamenti è visibile in figura 7.2:

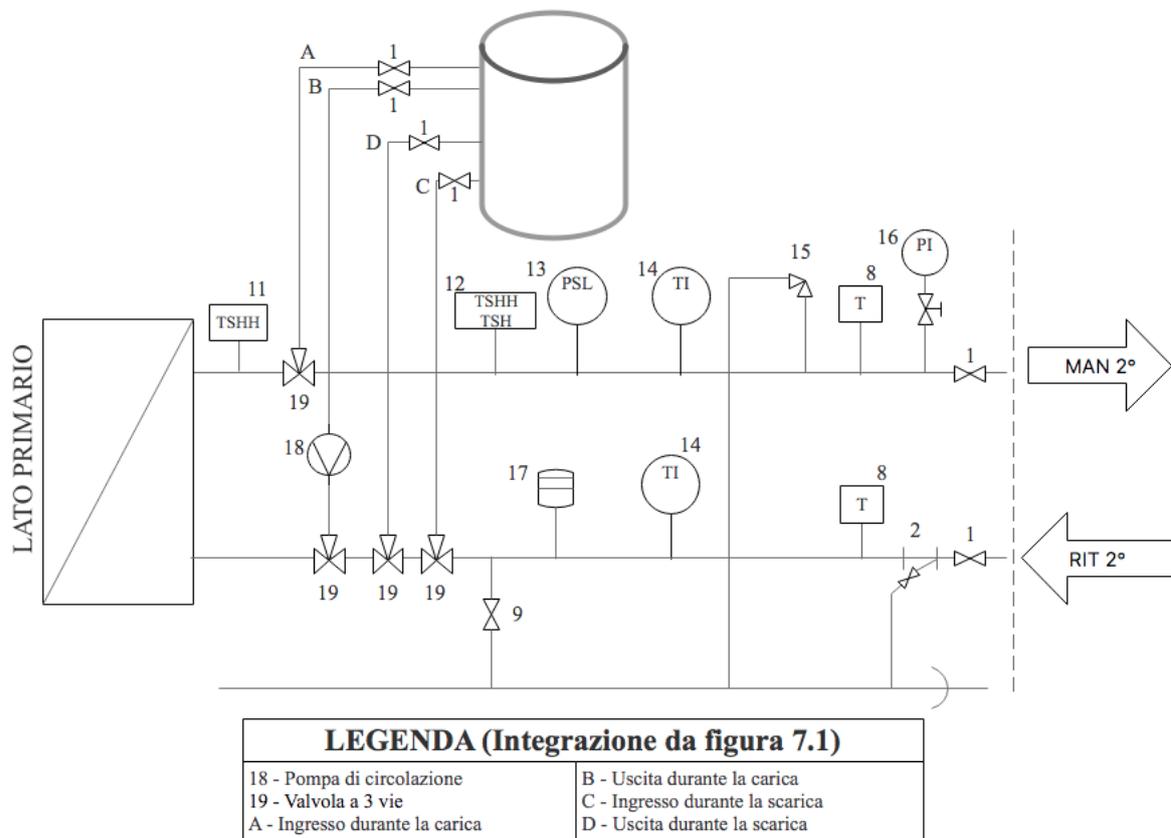


Figura 7.2: Schema della sottostazione con integrazione accumulo

La soluzione proposta prevede l'utilizzo di 4 tubi, 2 per la carica e 2 per la scarica. La logica per la corretta interpretazione dello schema è la seguente: durante la fase di carica, le valvole a 3 vie e le valvole di intercettazione dei rami A e B vengono aperte e la pompa di circolazione attivata. Allo stesso tempo le valvole sui rami C e D sono chiuse. Per la fase di scarica si inverte il processo, aprendo le valvole sui rami C e D e chiudendo quelle sui rami A e B. Da notare che i rami C e D sono collegati direttamente sul ritorno del secondario: infatti la scarica dell'accumulo preleva l'acqua fredda, la

scalda e la reimmette sul secondario per l'invio allo scambiatore con il primario, dove si completa il processo di riscaldamento.

La soluzione proposta è provvisoria, ed è inserita al fine di presentare la logica di funzionamento dei collegamenti; tuttavia, questi, nella versione definitiva, dovranno essere ottimizzati.

7.2 Dimensionamento su dati di laboratorio

Il dato di ingresso principale alla base del dimensionamento è il calore latente di fusione del PCM: come riportato in figura 6.10, questo è stato valutato durante diverse prove sperimentali che hanno portato a valori leggermente differenti tra loro, dei quali si è fatta la media aritmetica per ottenere il valore da inserire nei calcoli. Questa operazione ha ottenuto il seguente valore definitivo: $\Delta h_{fusione} = 180,4 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$. Come riportato anche nel capitolo precedente, il dato sul volume ricavato è riferito al solo materiale di PCM in grado di garantire l'intera copertura dell'energia richiesta. La progettazione di un componente reale deve però tenere conto di alcuni aspetti aggiuntivi, quali le modalità di scambio termico e i fattori di sicurezza: entrambi questi aspetti portano a un sovradimensionamento del sistema.

Le soluzioni proposte sono due:

1. Scambio termico diretto, in cui all'interno del serbatoio contenente PCM sono fatte passare le tubazioni dell'acqua.
2. Scambio termico con incapsulamento del PCM, il quale è contenuto all'interno di fiale e successivamente inserito all'interno di un serbatoio riempito di acqua.

La differenza tra le due tipologie influenza direttamente il volume finale del sistema, in quanto, partendo dal netto di PCM, è necessario moltiplicare questo valore per un fattore >1 per tenere conto degli aspetti sopra esposti. Entrambe le tipologie proposte sono state testate in laboratorio, e dalle successive analisi dei dati sono state ricavate le informazioni necessarie a completare il più accurato dimensionamento.

7.2.1 Soluzione con scambio diretto

Il componente analizzato è la batteria di accumulo già presentata al paragrafo 6.1, della quale sono state rilevate le dimensioni complessive. Successivamente, rimuovendo la copertura esterna e lo strato di isolante, si è risaliti alle dimensioni del solo serbatoio contenente il PCM. A questo punto, calcolati i rispettivi volumi, è stato possibile calcolare la percentuale di volume che il solo PCM richiede rispetto al componente finale: la restante porzione è utilizzata per l'inserimento delle tubazioni per l'acqua, dell'isolante e di ulteriore strumentazione per il controllo e la regolazione.

Con riferimento alla formula 5.6 si riportano le quote per la batteria.

	Batteria	Serbatoio PCM
a [mm]	365	310
b [mm]	575	575
c [mm]	650	650
Volume [m^3]	0,136	0,116
	% occupata	85
Fattore moltiplicativo F_1		1,17

Tabella 7.1: *Fattore moltiplicativo in modalità scambio diretto*

Il fattore moltiplicativo F_1 è stato calcolato tramite la formula 7.1

$$F_1 = \frac{1}{\%_{occupata}} 100 \quad (7.1)$$

Si nota come nonostante tale soluzione risulti molto compatta a livello definitivo, il sovradimensionamento apportato non è trascurabile; questo aspetto risalta ulteriormente trattando volumetrie maggiori. Oltremodo è sempre consigliabile prevedere un ulteriore fattore di sicurezza per far fronte a funzionamenti imprevisti o a qualsivoglia elemento di disturbo. Quando non specificato nel dettaglio, è uso comune utilizzare una maggiorazione del 10%. Di conseguenza il secondo fattore risulta essere

$$K_1 = \frac{1}{1 - 0,1} = 1,11$$

Le dimensioni finali dell'accumulo progettato con la presente modalità di scambio termico sono riportate in tabella 7.2:

Con PCM Inorganico		Con PCM Bio-organico					
Fattore $F_1 = 1,17$							
Fattore $K_1 = 1,11$							
80 kWh		130 kWh		80 kWh		130 kWh	
$V_{PCM} [m^3]$	1,01	$V_{PCM} [m^3]$	1,64	$V_{PCM} [m^3]$	1,64	$V_{PCM} [m^3]$	2,67
$V_{Finale} [m^3]$	1,31	$V_{Finale} [m^3]$	2,13	$V_{Finale} [m^3]$	2,13	$V_{Finale} [m^3]$	3,47

Tabella 7.2: Dimensionamento con scambio diretto

Partendo dai risultati appena riportati si ipotizza un accumulo di forma cilindrica che abbia come dimensione limite l'altezza, ipotizzata pari a 3 metri. Con questa informazione, invertendo la formula 5.4, si ricava il diametro del componente.

Analizzando le condizioni minima e massima si ricava che esso deve essere contenuto nel range

$$0,75 < D_1 < 1,21 \quad [m]$$

7.2.2 Soluzione con incapsulamento

La soluzione con incapsulamento è stata analizzata facendo uso del serbatoio da 100 litri. Quando al suo interno è presente la sola componentistica di base, come la resistenza elettrica, esso è in grado di contenere 110 litri di acqua, ovvero un volume disponibile di 0,11 [m^3]. Successivamente, all'interno del serbatoio, è stata inserita la struttura metallica contenente le fiale di PCM visibile nella figura sotto riportata.



Valutando la quantità di acqua contenuta in questa seconda configurazione, si è risaliti al volume occupato dalle fiale unite alla struttura metallica per sottrazione della volumetria di acqua tra la prima e la seconda misura. Quest'ultima ha dato un riscontro di 63 litri, e di conseguenza il volume occupato dalle fiale è di 47 litri. In modo analogo a quanto fatto per la modalità con scambio diretto, si è proceduto ricavando la percentuale di volume occupata dall'accumulo PCM rispetto al totale disponibile.

Come visibile in tabella 7.3 questo valore è decisamente minore paragonato al medesimo del caso precedente.

	Vuoto	Con fiale
Volume acqua [m^3]	0,11	0,063
Volume fiale+struttura [m^3]	-	0,047
% occupata		43
Fattore moltiplicativo F_2		2,34

Tabella 7.3: *Fattore moltiplicativo in modalità incapsulamento*

Il fattore di sicurezza è indipendente dal tipo di soluzione adottata, per cui risulta

$$K_2 = K_1 = 1,11$$

Le volumetrie richieste per il caso in esame sono riportate in tabella 7.4: è chiaramente visibile un netto incremento rispetto alla soluzione con scambio diretto. Da un semplice raffronto numerico si direbbe che la soluzione migliore sia proprio quella con scambio diretto, in quanto un volume minore implica minori costi per l'acquisto del materiale e per la produzione. Oltre a questo aspetto, però, deve anche essere considerata la fase di vita del componente il quale deve essere sottoposto a manutenzione e controlli periodici; in quest'ottica la soluzione con incapsulamento presenta un vantaggio in quanto l'incapsulamento permette di mantenere separato il PCM dall'esterno e nel caso di rilevazione di perdite è possibile rimuovere il solo pezzo fallato.

Con PCM Inorganico		Con PCM Bio-organico	
Fattore $F_2 = 2,34$			
Fattore $K_2 = 1,11$			
80 kWh	130 kWh	80 kWh	130 kWh
$V_{PCM} [m^3]$ 1,01	$V_{PCM} [m^3]$ 1,64	$V_{PCM} [m^3]$ 1,64	$V_{PCM} [m^3]$ 2,67
$V_{Finale} [m^3]$ 2,62	$V_{Finale} [m^3]$ 4,26	$V_{Finale} [m^3]$ 4,26	$V_{Finale} [m^3]$ 6,94

Tabella 7.4: Dimensionamento con incapsulamento

Anche in questo caso si ipotizza un componente di forma cilindrica la cui dimensione limite sia l'altezza, pari a 3 metri. Il diametro risultante deve essere contenuto nel range

$$1,06 < D_2 < 1,72 \quad [m]$$

Come si nota, in figura non è rappresentata tutta la strumentazione legata alla sicurezza dell'impianto: vasi di espansione, valvole per lo sfogo dell'eccessiva pressione, valvole per lo scarico di emergenza dell'acqua. Lo studio e il posizionamento delle stesse sarà affrontato una volta stabilito il progetto definitivo dell'impianto.

Un'ultima considerazione riguarda le linee di mandata e ritorno su cui il componente è installato: le fasi di carica e scarica hanno implicato l'aggiunta di due circuiti che sono stati trattati in modo indipendente dal resto del sistema, ma nel funzionamento reale è possibile che questo non sia vero; di conseguenza si rende necessario, durante le fasi di funzionamento di questi circuiti, regolare tutta la strumentazione di sicurezza sui rami principali in modo tale da non intervenire interrompendo il funzionamento dell'intero sistema. Le impostazioni precedenti devono poi essere resettate alle condizioni normali al termine dell'utilizzo della batteria termica.

Capitolo 8

Conclusioni

Il lavoro di tesi proposto è stato condotto con l'obiettivo primario di studiare l'integrazione di un accumulatore con PCM all'interno di una struttura del teleriscaldamento già esistente e funzionante; in particolare il componente dovrà essere inserito in corrispondenza della sottostazione di pompaggio della rete.

Il percorso ha seguito diversi *step* intermedi, volti a caratterizzare sia i componenti utilizzati in laboratorio sia il PCM stesso: quest'ultimo, essendo un materiale di nuova generazione, è stato studiato anche dal punto di vista delle proprietà termiche quali il calore latente di fusione e la conducibilità termica. Il tutto è stato possibile grazie alla realizzazione di molteplici circuiti idraulici analizzati con il supporto di adeguata strumentazione per il monitoraggio e la regolazione.

Successivamente si è passati alla simulazione in scala dell'attuale rete di teleriscaldamento, per passare all'integrazione del prototipo di accumulatore e definire così le differenze tra i due funzionamenti. L'ultimo passo è stato quello di proporre un dimensionamento di massima dell'accumulatore, il quale è stato in prima approssimazione calcolato partendo dai dati di targa del materiale, e in seguito progettato tenendo conto dei risultati sperimentali.

Confrontando i dati reali forniti dalla sottostazione con i risultati sperimentali, è possibile affermare che il prototipo è in grado di replicare le curve di temperatura reali senza l'ausilio di una sorgente termica esterna. La scarica completa alla massima potenza disponibile è avvenuta con tempistiche più rapide rispetto alla richiesta: fatto positivo in quanto è possibile rallentare il processo applicando una semplice regolazione della portata di acqua in ingresso alla batteria.

Lista dei Simboli

TES - Thermal Energy Storage

CTES - Cold Thermal Energy Storage

PCM - Phase Change Material

m - Massa del materiale [kg]

f - Frazione di materiale fuso

c - Calore specifico [J/kgK]

\bar{c} - Calore specifico medio tra temperatura iniziale T_i e temperatura finale T_f [J/kgK]

ΔT_{sens} - Differenza di temperatura nel sensibile [K]

$\Delta h_{fusione}$ - Salto entalpico nel cambiamento di fase solido-liquido [J/kg]

T_m - Temperatura di fusione [K]

PBT - PayBack Time [anni]

ACS - Acqua Calda Sanitaria

Q - Flusso termico [J]

S - Flusso di entropia [J/K]

W - Flusso di exergia [J]

S_{irr} - Tasso di generazione entropica [J/K]

T^* - Temperatura di inversione [K]

ΔG - Energia libera di Gibbs [J/kg]

T_0 - Temperatura ambiente [K]

\bar{T} - Temperatura media [K]

Δs - Salto entropico tra i punti 1 e 2 [J/kgK]

Φ - Flusso termico [W]

Φ_{max} - Flusso termico massimo [W]

r - Coefficiente di dispersione volumica [W/m³K]

$V_{gestita}$ - Volumetria [m³]

-
- $T_{int,D}$ - Temperatura interna di progetto [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{est,D}$ - Temperatura esterna di progetto [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{mandata,D}$ - Temperatura mandata secondario di progetto [$^{\circ}\text{C}$]
 GG - Gradi Giorno
 h - Numero di ore di accensione al giorno [h]
 Q_{ut} - Energia complessiva fornita all'utenza [kWh]
 T_{int} - Temperatura interna reale [$^{\circ}\text{C}$]
 T_{est} - Temperatura esterna reale [$^{\circ}\text{C}$]
 G - Portata [kg/s]
 W_p - Potenza richiesta per il pompaggio [W]
 f - Fattore di attrito delle perdite distribuite
 L - Lunghezza tubo [m]
 D - Diametro tubo [m]
 β - Fattore di attrito delle perdite concentrate
 v - Velocità dell'acqua [m/s]
 k - Conducibilità termica [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
 \dot{Q} - Potenza termica [W]
 R - Resistenza termica [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
 P - Potenza [W]
 Δt - Intervallo di tempo [s]

Bibliografia

- [1] Ioan Sarbu and Calin Sebarchievici. *A comprehensive review of Thermal Energy Storage*. MDPI, 14 Gennaio 2018.
- [2] Ibrahim Dincer and Marc A. Rosen. *Thermal Energy Storage, Systems and Applications, Second edition*. Wiley, 2011.
- [3] Eliodoro Chiavazzo. *Accumulo e trasporto dell'energia*. Politecnico di Torino, A.A. 2017/2018.
- [4] Ismaila H. Zarma, Hamdy Hassan, Shinichi Ookawara and Mahmoud Ahmed. *Thermal Energy Storage in Phase Change Materials: Applications, Advantages and Disadvantages*. ICCEEE, 2017.
- [5] Kinga Pielichowska and Krzysztof Pielichowsky. *Phase Change Materials for thermal energy storage*. Elsevier, 2014.
- [6] Belén Zalba, José Marin, Luisa Cabeza and Harald Mehling. *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Pergamon, 2003.
- [7] Zhang, Long, Dong and Jiankai. *Experimental study on the thermal stability of a paraffin mixture with up to 10,000 thermal cycles*. Pubblicato presso la sezione Thermal Science and Engineering Progress di ScienceDirect, volume 1 (2017), pag. 78 - 87.
- [8] A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano e M. Iasiello. *Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'ambito dell'accumulo del freddo*. ENEA, Settembre 2016.

- [9] Alberto Cucatto. *Il Piano di Sviluppo del Teleriscaldamento nell'Area Metropolitana Torinese*. Provincia di Torino, Servizio Qualità dell'aria e Risorse energetiche.
- [10] Alberto Poggio, Giuseppe Serrati, Luciano Filippi, Cinzia Maga, Livia Manzone, Paola Benedetti. *Studio sul Teleriscaldamento in Provincia di Torino, Stato di fatto e potenzialità di sviluppo*. Area Risorse Idriche e Qualità dell'Aria, Servizio Qualità dell'Aria e Risorse Energetiche, Novembre 2006.
- [11] Vittorio Verda. *Complementi di Energetica*. Politecnico di Torino, A.A. 2016/2017.
- [12] D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151.
- [13] Laia Miróa, Camila Barrenechea, Gerard Ferrera, Aran Soléa, Ingrid Martorell and Luisa F. Cabeza. *Health hazard, cycling and thermal stability as key parameters when selecting a suitable phase change material (PCM)*. Elsevier, 2016.
- [14] Schede tecniche fornite da Sunamp e CrodaTherm.
- [15] F. D'Annibale, G. Zummo, C. Menale, F. Sfrattoni. *Test sperimentali di nuovi materiali a cambiamento di fase in grado di assicurare performance più elevate in termini velocità di risposta del PCM alla variazione di temperatura del fluido primario*. Report di Ricerca di Sistema Elettrico, Settembre 2014.

Sitografia

- [1] <http://www.iea.org/stats/WebGraphs/ITALY5.pdf>
- [2] <http://www.iea.org/stats/WebGraphs/ITALY3.pdf>
- [3] <https://it.dreamstime.com/illustrazione-di-stock-dewar-o-diagramma-identificato-della-bocchetta-di-vuoto-image45460995>
- [4] <http://pslc.ws/macrog/dsc.htm>
- [5] <https://www.gruppoiren.it/teleriscaldamento-approfondimenti>
- [6] <http://www.vigilfuoco.it/asp/page.aspx?IdPage=5574>

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno supportato nel corso della stesura della tesi, con suggerimenti e idee, ma anche con critiche e osservazioni costruttive. A tutti loro va il mio più sincero grazie, consapevole che senza questo supporto il cammino sarebbe stato molto più complicato.

Ringrazio anzitutto il Professor Vittorio Verda, Relatore, senza il quale il presente lavoro non sarebbe stato possibile.

Proseguo con il personale dell'azienda i-TES, e in particolare il Dottor Santovito Michele, figura di riferimento in tutte le fasi del lavoro. Non meno importante la Dottoressa Muscarà Noemi, che mi ha avviato alla conoscenza di tutta la strumentazione necessaria da utilizzare in laboratorio. Aggiungo tutti i colleghi in i-TES che mi hanno aiutato nella stesura della tesi a fronte della loro passata esperienza.

Un ringraziamento sincero è rivolto ai miei compagni di corso Tommaso, Paolo, Emanuele, Flavio, Umberto e Davide, con i quali ho condiviso le fatiche dello studio ma anche i piaceri dei successi in tutti questi anni.

Infine un ringraziamento speciale per le persone più care: gli amici di sempre, che non hanno mai dubitato della mia riuscita, Elisa, che anche nei momenti di difficoltà ha sempre avuto una parola di incoraggiamento, e la mia famiglia, primi tra tutti mia mamma, mio papà e mia sorella, che con sostegno morale e grandi sacrifici mi hanno permesso di portare a termine questo cammino.