

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

## I sistemi di accumulo dell'energia termica nel terreno: una perfetta sinergia tra solare e geotermico

### This is the author's manuscript

*Original Citation:*

*Availability:*

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/1559008> since 2016-03-31T12:23:17Z

*Terms of use:*

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11

***This is an author version of the contribution published on:***

*Questa è la versione dell'autore dell'opera:  
[GEAM, 146, Patron Editore, 2015, 5-14]*

***The definitive version is available at:***

*La versione definitiva è disponibile alla URL:  
[[www.geam.org](http://www.geam.org)]*

# I sistemi di accumulo dell'energia termica nel terreno: una perfetta sinergia tra solare e geotermico

Giordano N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino

## Riassunto

Lo stoccaggio stagionale di energia termica nel terreno è un'interessante applicazione per integrare sistemi di riscaldamento e raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria in edifici residenziali o commerciali. Diversi impianti sono stati messi a punto in nord-Europa e nord-America, dimostrandone l'affidabilità e la sostenibilità, con significativi risparmi energetici ed economici. Due aspetti fondamentali su cui porre l'attenzione sono la progettazione ed il monitoraggio dell'impianto stesso. Il concetto principale di un sistema di stoccaggio è quello di produrre energia termica ed accumularla in un determinato materiale, per cui è necessario minimizzare le perdite di calore dal mezzo di accumulo in modo da recuperare successivamente una quota parte maggiore possibile. Si distinguono in particolare tre applicazioni: i sistemi a calore di reazione chimica, i sistemi a calore latente e quelli a calore sensibile. I primi sfruttano materiali termo-chimici, i secondi materiali a cambiamento di fase, gli ultimi materiali come acqua e terreno. Il presente articolo si propone di fare una panoramica sullo stato dell'arte dei sistemi di stoccaggio termico, con un focus sulle applicazioni che accoppiano pannelli solari e sonde geotermiche (ciclo chiuso) o pozzi per acqua (ciclo aperto). Tali sistemi possono garantire una notevole riduzione dei consumi energetici e sarebbe auspicabile che anche in Italia si iniziasse a percorrere questa strada con impianti dimostrativi e prime reali applicazioni.

**Parole chiave:** accumulo termico; calore sensibile; solare termico; geotermia a bassa entalpia

## Abstract (Ground thermal energy storage systems: perfect coupling between solar and geothermics)

The seasonal storage of thermal energy in the ground is a useful application able to provide the H&C and DHW demand of commercial or residential buildings. Several examples in northern-America and northern-Europe demonstrated the reliability and convenience of these systems in terms of both energy and economic savings. The design and the monitoring activity of such systems are fundamental aspects to take under consideration. The main purpose of a storage system is to produce energy and collect it in a specific material. It is therefore necessary to reduce the heat losses in order to have as much energy as possible back in the winter season. Three different storage mechanisms can be described depending on the kind of heat: thermo-chemical, latent and sensible heat. The first is used with thermo-chemical materials, the second with phase change materials and the latter mainly with water and soils. The present paper aims at discussing the state of the art about thermal energy storage systems, focusing on sensible heat applications that couple solar collectors with closed-loop or open-loop ground heat exchangers. These systems can assure significant savings. A growth of demonstrative plants and real scale applications in Italy would be desirable. .

**Key words:** heat storage; sensible heat; solar thermal; shallow geothermal

## Résumé (Stockage géologique de l'énergie thermique: une synergie parfaite entre le solaire e la géothermie)

Le stockage saisonnier de l'énergie thermique dans le sous-sol est une application très pratique pour les nécessités de chauffage-refroidissement des bâtiments commerciaux ou résidentiels et pour la production de l'eau chaude sanitaire. Plusieurs exemples dans l'Amérique du Nord et l'Europe septentrionale n'ont démontré la fiabilité et la durabilité, avec une réduction de consommation d'énergie et donc un gain économique. À cet égard, les activités de projet et surveillance sont deux aspects essentiels à prendre en considération. L'objectif principal d'un système de stockage est la production d'énergie et l'accumulation de la même dans un matériau spécifique. Par conséquent, il faut minimiser la perte de chaleur afin d'obtenir le maximum retour possible d'énergie en hiver. Trois différents mécanismes de stockage peut être identifié en fonction du type de chaleur traité: thermo-chimique, latente ou sensible. Les trois façons sont utilisés respectivement par des matériaux thermo-chimiques ou exploitant les changements de phase thermiques des matériaux ou avec l'implication du sous-sol et des eaux souterraines. Dans cet article, on décrit l'état de l'art sur les systèmes de stockage d'énergie thermique, en particulier sur les applications de la chaleur sensible avec capteurs solaires connectés à des échangeurs souterrains en circuit fermé ou ouvert. Ces systèmes peuvent assurer des économies significatives. Il serait souhaitable de commencer, aussi en Italie, la réalisation d'applications réelles.

**Mots-clés:** stockage d'énergie thermique, chaleur sensible, solaire thermique, géothermie a basse enthalpie

## 64 1. Introduzione

65 L'accumulo di energia è un concetto su cui si è molto dibattuto negli ultimi lustri, ma affonda le  
66 sue radici alla fine degli anni '70, quando la prima grande crisi petrolifera stimolò molti paesi  
67 industrializzati a pensare ad un nuovo modo di produrre energia. Il mondo delle fonti rinnovabili si è  
68 trasformato così da utopia negli anni del boom economico a concreta possibilità all'inizio del secolo che  
69 stiamo vivendo. Grazie alla rigorosa attività di numerosi ricercatori in tutto il mondo, sia in ambito  
70 accademico sia a livello professionale, è stato dimostrato che all'interno della nostra società, con  
71 cospicui ma non insormontabili adeguamenti, non solo sarebbe possibile l'integrazione di più Fonti di  
72 Energia Rinnovabile (FER), ma che il nostro pianeta ne trarrebbe un indubbio vantaggio. Non è da  
73 sottovalutare inoltre la significativa ricaduta di questo approccio rispetto alla riduzione di conflitti armati  
74 e tensioni geopolitiche, che sempre più spesso mascherano una sfida all'accaparramento delle risorse  
75 ambientali. Fonti rinnovabili come sole, vento e acqua (la prima FER ad essere sfruttata) sono state  
76 ampiamente studiate nel passato recente e meno recente e sono giunte ad un livello tecnologico e di  
77 sostenibilità economica tale da produrre circa il 24% di tutta l'energia consumata in Europa (il 23% in  
78 Italia - Rapporto Eurostat, 2014). Tuttavia l'idea di sfruttare le risorse rinnovabili è sempre stata  
79 accompagnata dal problema che molte di queste forniscono energia in periodi limitati dell'anno o del  
80 giorno, solitamente quando la domanda è minima. Per esempio, il sole ci fornisce un enorme quantitativo  
81 di energia, pari a circa  $3,8 \times 10^{18}$  J, ma essa è intermittente a causa dell'alternarsi del giorno e della notte  
82 e del passare delle stagioni. I fabbisogni umani sono quindi temporalmente disallineati con la sorgente  
83 di energia e questo è il problema maggiore con cui ha dovuto confrontarsi lo sviluppo della tecnologia  
84 solare dalla sua nascita. Il picco della domanda avviene nella tarda sera quando l'energia solare non è  
85 più disponibile istantaneamente, mentre il picco di produzione si presenta quando il fabbisogno è  
86 minimo. L'ampio sviluppo dei pannelli fotovoltaici negli ultimi 5 anni in Italia ha decisamente  
87 modificato la curva giornaliera di produzione dell'energia, e conseguentemente abbassato il prezzo del  
88 kWh fino a portarlo ad oscillazioni di decine di €/MWh a distanza di 6 ore: il 14 Aprile del 2013, il  
89 prezzo in borsa dell'elettricità scese a 0 €/MWh alle ore 15, per poi impennarsi fino a 90 €/MWh a poche  
90 ore di distanza (GME, 2013). In relazione a ciò, il concetto dell'accumulo è diventato cruciale, sia in  
91 campo elettrico quanto in campo termico, per trovare soluzioni affidabili, efficienti e sostenibili  
92 economicamente.

93 Le applicazioni geotermiche a bassa entalpia, l'energia solare, la biomassa, il biogas (per citarne  
94 alcune) hanno le caratteristiche necessarie per guidarci nella transizione energetica resasi essenziale a  
95 causa dei problemi climatici, ambientali e geopolitici che si rivelano sempre meno gestibili. Le FER  
96 sono ampiamente disponibili e possono essere integrate insieme per soddisfare sia i fabbisogni  
97 residenziali (riscaldamento e raffrescamento, Acqua Calda Sanitaria - ACS), sia le necessità del tessuto  
98 imprenditoriale locale. Lo stoccaggio energetico giocherà pertanto un ruolo fondamentale nello sviluppo  
99 delle reti energetiche alimentate da risorse verdi, in modo da sopperire alla non-programmabilità delle  
100 sue fonti e garantire una produzione quanto più continua e stabile nel tempo. Solo con notevoli  
101 innovazioni in quest'ambito potremo progressivamente ridurre la nostra dipendenza dalle fonti fossili e  
102 mirare ad un 100% di produzione verde.

103 La risorsa geotermica ha avuto un ruolo importantissimo in Italia sin dai primi anni del XX secolo,  
104 con la prima dimostrazione della possibilità di produrre energia elettrica da vapore geotermico eseguita  
105 da Piero Ginori Conti a Larderello nel 1904 (Ginori Conti, 1936). L'Italia è infatti uno dei paesi leader  
106 europei nella generazione geotermoelettrica con una produzione attuale di circa 6,0 TWh/a (grazie  
107 soprattutto agli impianti toscani) e una previsione di 9,4 TWh/a al 2030 secondo lo scenario peggiore  
108 (Buonassorte et al., 2011). Per quanto riguarda la bassa entalpia (votata al condizionamento degli edifici  
109 e la produzione di ACS) al contrario, l'Italia risulta decisamente indietro rispetto a Svezia, Austria,  
110 Svizzera e Germania quanto a potenza installata (Rapporto Eurostat, 2014). Questi impianti possono  
111 essere integrati ad altre fonti energetiche rinnovabili e costituire medio-piccoli sistemi multi-sorgente  
112 per sopperire allo sbilanciamento tra disponibilità e fabbisogno tipico delle FER.

113 L'accumulo termico rappresenta un esempio di perfetta integrazione tra fonti. Come vedremo nel  
114 prosieguo dell'articolo, uno dei classici sistemi di *heat storage* prevede la produzione termica da fonte  
115 solare e l'accumulo di questa nel terreno tramite la tecnologia esistente per la messa a punto di impianti  
116 geotermici a bassa entalpia a ciclo aperto o chiuso (Casasso e Sethi, 2013). Lo stoccaggio termico di  
117 questo tipo ricade dunque nella categoria delle fonti geotermiche a bassa entalpia, ma in questo caso il  
118 terreno copre un doppio ruolo. Durante l'estate il sottosuolo viene utilizzato come mezzo per accumulare

119 l'energia termica prodotta; in inverno esso diventa sorgente in quanto deve fornire l'energia necessaria  
120 per soddisfare i fabbisogni dell'edificio.

121 In questo articolo si vuole fare una panoramica sullo stato dell'arte dei sistemi di accumulo  
122 stagionale di energia termica, con particolare riferimento a quelle applicazioni che coinvolgono il  
123 sottosuolo come volume di stoccaggio.

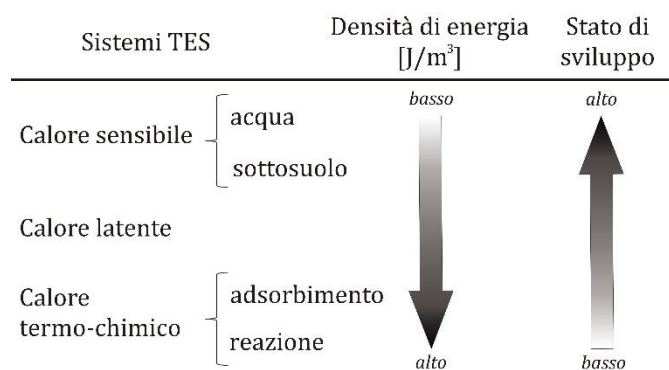
124

## 125 2. I sistemi di stoccaggio del calore

126 Quello che viene definito *heat storage* in terminologia scientifica comprende differenti tipi di  
127 produzione e accumulo di energia termica (**Figura 1**). I principali consistono nel produrre energia solare  
128 tramite i classici pannelli solari termici e accumularla in specifici materiali per uno stoccaggio a breve  
129 (essenzialmente diurno) o lungo termine (stagionale). I materiali per accumulare energia sono  
130 selezionati in base al "tipo" di calore che si intende sfruttare: l'energia termica può infatti essere  
131 accumulata sotto forma di calore (i) latente, (ii) di reazione chimica e assorbimento termo-chimico o  
132 (iii) sensibile (Cabeza, 2015). Il calore latente è la quota parte di energia termica che concorre al  
133 cambiamento di fase dei materiali ed è per questo che i materiali utilizzati da questo meccanismo di  
134 accumulo sono detti *Phase Change Materials* (PCM). Il calore di reazione (esotermiche ed  
135 endotermiche) e quello di assorbimento vengono sfruttati con materiali definiti *Thermo-Chemical*  
136 *Materials* (TCM). Infine il calore sensibile è quello che si accumula con l'aumento di temperatura dei  
137 materiali (senza indurre cambiamenti di fase), che per questo processo sono classicamente acqua, roccia  
138 o terreni, cemento e sali fusi.

139

140



141 **Figura 1** – Caratteristiche dei sistemi di stoccaggio di energia termica (modificato da N'Tsoukpoe, 2009).

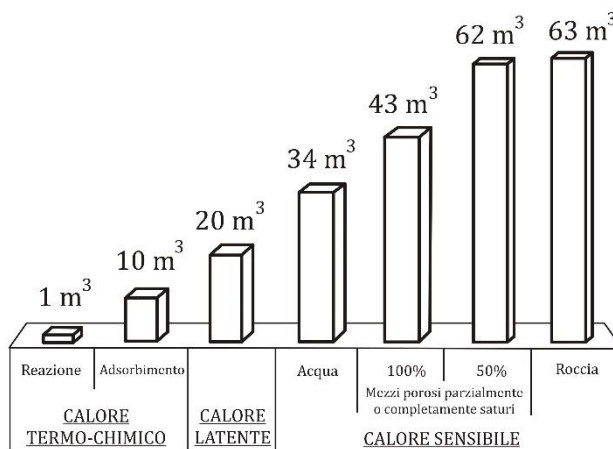
142 **Figure 1** – Characteristics of the known thermal energy storage mechanisms (modified from N'Tsoukpoe, 2009).

143

144 I primi due meccanismi (con PCM e TCM) costituiscono le ultime innovazioni tecnologiche  
145 nell'ambito dell'accumulo termico. I PCM sono solitamente incapsulati e applicati a muri, pavimenti,  
146 soffitti, vetri e scambiatori di calore per stoccaggi a breve termine in modo passivo (Pomianowski et al.,  
147 2013) o associati ad impianti di produzione solare per serre agricole (Xu et al., 2014). Tali materiali  
148 sono sfruttati per il cambiamento di fase solido-liquido; alcuni tra quelli utilizzati sono acqua, soluzioni  
149 saline, paraffine, sali idrati, nitrati, idrossidi e vengono selezionati in base alla temperatura e all'entalpia  
150 di fusione (Cabeza, 2015). I TCM sono comunemente ossidi e cloruri di metalli per il calore di reazione,  
151 zeoliti e gel di silice per il calore di assorbimento; sono stati messi a punto prototipi atti a dimostrarne  
152 il possibile utilizzo per accumulo a lungo termine applicato ad edifici (Xu et al., 2014) o per la  
153 produzione di energia elettrica da impianti solari ad accumulo termico ad alta temperatura (Gil et al.,  
154 2010). Il calore sensibile è invece il più avanzato dal punto di vista delle applicazioni ed è sfruttato da  
155 diversi decenni, in particolare per quanto riguarda l'acqua, che possiede una notevole capacità termica  
156 (4,2 MJ/m³/K), doppia rispetto a rocce e terreni.

157 Anche se i concetti termodinamici alla base dei tre meccanismi di accumulo sono differenti,  
158 Hadorn (2008) provò a metterli a confronto in base alla densità di energia e pertanto ai volumi necessari  
159 per stoccare un medesimo quantitativo di calore. La **Figura 2** riporta la quantità di materiale di cui si  
160 dovrebbe disporre per accumulare 10 GJ di energia termica (ipotizzando un  $\Delta T$  di 70°C nei sistemi a  
161 calore sensibile). I materiali termo-chimici hanno una densità di energia di decine di GJ/m³ (Pinel et al.,  
162 2011) e ne sarebbero necessari pochi m³ per accumulare 10 GJ. I PCM presentano densità dell'ordine  
163 di 0,5 – 1,5 GJ/m³ (Cabeza, 2015) e, per il medesimo quantitativo di energia sarebbero necessari circa

164 20 m<sup>3</sup>. I mezzi classicamente utilizzati nei sistemi a calore sensibile possiedono le capacità termiche più  
 165 basse in assoluto, con 4,2 MJ/m<sup>3</sup>/K per l'acqua, 2,2 MJ/m<sup>3</sup>/K per le rocce e 1,4 MJ/m<sup>3</sup>/K per i depositi  
 166 sciolti insaturi. Questi valori garantiscono densità energetiche variabili da 0,1 a 0,3 GJ/m<sup>3</sup>, ipotizzando  
 167 un  $\Delta T$  di lavoro pari a 70°C.



168 **Figura 2** – Confronto tra meccanismi di stoccaggio: volumi di materiale necessario per accumulare 10 GJ di  
 169 energia (modificato da Hadorn, 2008).  
 170

171 **Figure 2** – Comparison of storage mechanisms: volumes needed to store 10 GJ thermal energy (modified from  
 172 Hadorn, 2008).

173  
 174 In sintesi i volumi di terreno devono essere approssimativamente 60, 6 e 3 volte maggiori rispetto  
 175 ai materiali utilizzati sfruttando il calore relativo a processi di reazione chimica, assorbimento termo-  
 176 chimico e cambiamento di fase rispettivamente. Dal canto loro, i sistemi che utilizzano il calore sensibile  
 177 coinvolgono materiali già presenti in natura e ampiamente disponibili e il loro sfruttamento (con alcuni  
 178 accorgimenti tecnici) può inserirsi perfettamente nell'ambiente circostante. I PCM e i TCM sono  
 179 all'avanguardia della ricerca scientifica nel campo dell'accumulo di energia termica e hanno certamente  
 180 un futuro promettente (Xu et al., 2014); sono tuttavia generati in laboratorio con costi non trascurabili e  
 181 presentano spesso caratteristiche di tossicità. Diversi PCM sono stati studiati finora, ma solo alcuni di  
 182 loro successivamente commercializzati, a causa di problemi legati a separazioni di fase, corrosione,  
 183 stabilità a lungo termine e bassa conducibilità termica che non sono ancora stati pienamente risolti. I  
 184 punti di discussione dei TCM riguardano la selezione dei materiali e quindi delle reazioni reversibili  
 185 adatte al tipo di sorgente utilizzata (Cabeza, 2015). In generale, Cabeza (2013) afferma che i sistemi a  
 186 calore sensibile sono la miglior soluzione per l'accumulo stagionale; i PCM danno buoni risultati se  
 187 applicati ad impianti con piccoli range di temperatura di lavoro (es. per minimizzare le oscillazioni di  
 188 temperatura in camere frigorifere dovute a perdite di potenza (Gin et al., 2010)); i TCM sono la scelta  
 189 ideale nell'ottica di applicazioni ad alta temperatura (es. solare a concentrazione per produzione  
 190 elettrica).

191 Focalizzando la nostra trattazione allo stoccaggio di calore sensibile, i fattori principali che  
 192 influenzano la scelta del volume di accumulo sono la differenza di temperatura indotta nel mezzo ( $\Delta T$ )  
 193 e la densità di energia del materiale, espressa come la quantità di energia accumulabile per unità di  
 194 volume o di massa (J/m<sup>3</sup> o J/kg), la quale dipende essenzialmente dalla capacità termica del materiale.  
 195 L'energia accumulata in un materiale può così essere espressa in questo modo:

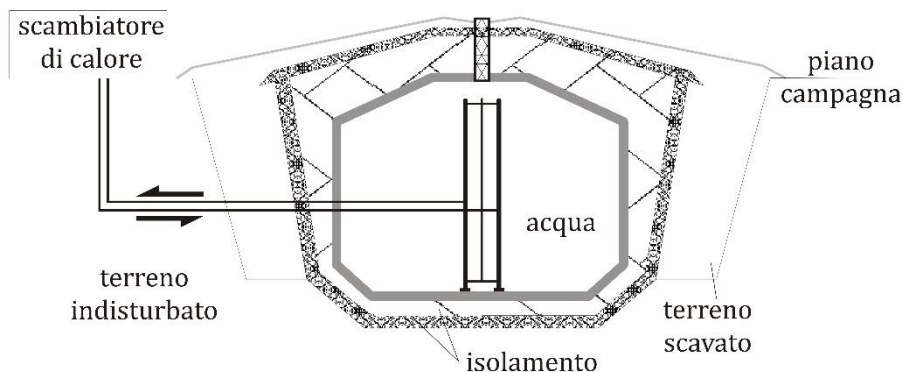
$$E = \text{densità} \times \text{capacità termica} \times \text{volume} \times \Delta T$$

197 I sistemi a calore sensibile sono stati ampiamente testati nelle ultime decadi del secolo scorso e  
 198 ne è stata dimostrata la loro abilità a ridurre l'utilizzo di energia primaria. Queste applicazioni sono  
 199 pertanto pronte ad essere utilizzate sia in campo residenziale e commerciale (la cui efficacia è stata  
 200 diffusamente comprovata), sia in campo produttivo (piccole-medie aziende agricole, florovivaistiche, di  
 201 allevamento, di trasformazione etc.), dove con qualche progetto dimostrativo si potrebbe verificarne  
 202 l'attitudine ad inserirsi all'interno del bilancio energetico delle singole aziende (fabbisogni e surplus  
 203 termici) e percorrere con più decisione la strada dell'indipendenza energetica e della sostenibilità  
 204 ambientale delle stesse.

### 3. Utilizzare il sottosuolo come batteria

Le principali applicazioni che sfruttano il calore sensibile possono essere divise in differenti categorie a seconda del mezzo di stoccaggio: (i) acqua, (ii) *rock beds*, (iii) roccia o terreni. Si possono utilizzare anche materiali come calcestruzzi (Frattini et al., 2014) e sali fusi (Cabeza, 2015), ma ci limitiamo qui ad entrare nel dettaglio delle prime tre categorie.

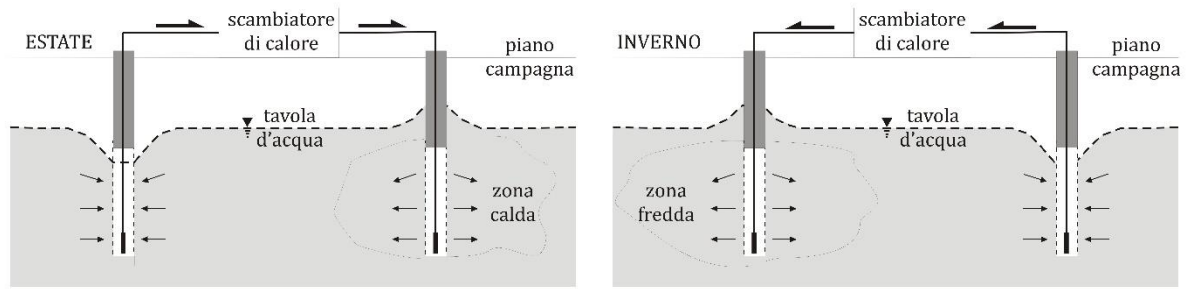
L'acqua è sicuramente il mezzo più favorevole per l'accumulo di calore sensibile perché, come detto, ha una buona capacità termica e può essere pompata ed estratta facilmente, oltre a essere ampiamente disponibile. I primi sistemi messi a punto riguardano serbatoi artificiali (**Figura 3**) che possono essere interrati, per limitare la dissipazione del calore accumulato, oppure incorporati ad un edificio. Diversi impianti di questo tipo furono costruiti negli anni '80 e '90 in Svezia, Germania, Danimarca e Italia sia con finalità di accumulo a breve termine sia per stoccaggi di maggior durata per coprire lo sbilanciamento tra estate ed inverno. Il termine anglosassone per indicare tali applicazioni è solitamente *tank thermal energy storage* (TTES) (Ucar e Inalli, 2008). Un concetto importante in quest'ambito, ma che si ripropone anche nelle altre tipologie come vedremo, è quello della stratificazione (Chung, 2008). "Stratificare" il mezzo di stoccaggio significa creare delle porzioni più calde rispetto ad altre, in modo da poter attingere al volume sia per estrarre calore (porzioni calde) sia per caricare ulteriore energia termica al suo interno (porzioni fredde). È sicuramente più vantaggioso separare il volume in questo modo rispetto ad averlo tutto ad una temperatura omogenea. Come descritto in precedenza infatti, la differenza di temperatura è un fattore chiave, essendo direttamente proporzionale alla quantità di energia accumulata che può essere così estratta e utilizzata. Inoltre, più è bassa la temperatura del fluido che ritorna ai pannelli solari per essere nuovamente riscaldato, maggiore è l'efficienza del sistema perché le perdite di calore dei collettori per radiazione e convezione sono minimizzate. Per ottenere un serbatoio stratificato si utilizzano stratificatori, diaframmi o particolari accorgimenti nella forma del serbatoio e nella configurazione dei tubi di mandata e ritorno per favorire l'azione della forza gravitazionale sui gradienti di densità.



**Figura 3** – Serbatoio interrato a supporto di impianto TTES (modificato da Schmidt et al., 2004).

**Figure 3** – Diagram of buried tank for TTES (modified from Schmidt et al., 2004).

L'acqua viene anche sfruttata in sistemi più complessi (**Figura 4**) che prevedono di estrarre acqua ad una certa temperatura dal sottosuolo (solitamente 10-15°C, a seconda delle condizioni idrogeologiche locali), riscaldarla per mezzo dell'energia termica a disposizione e re-iniettarla nello stesso acquifero ad una temperatura maggiore ( $\Delta T$  5-10°C in base alla normativa e agli studi di impatto). Nella stagione invernale si può così estrarre acqua ad una T più elevata rispetto alle condizioni indisturbate e migliorare pertanto l'efficienza dei sistemi a pompa di calore. Per questi sistemi (detti *aquifer thermal energy storage* – ATES) sono sufficienti due pozzi posizionati correttamente in modo da non creare interferenza tra estrazione ed immissione e scongiurare un corto-circuito termico (Banks, 2009). L'efficienza è ottima come per i classici impianti a pompa di calore a ciclo aperto, ma la permeabilità dell'acquifero e soprattutto il gradiente idraulico sono fattori determinanti. Germania, Olanda e Turchia, pioniere in questo campo, possono infatti permettersi di sfruttare ampiamente i loro acquiferi che presentano gradienti idraulici trascurabili (Schmidt et al., 2004). Pensando all'Italia, tali impianti sono sconsigliabili negli acquiferi tipici della Pianura Padana centro-occidentale, dove alte permeabilità dei depositi ed elevati gradienti idraulici favorirebbero la migrazione a valle dell'accumulo termico generato, con perdita del lavoro fatto e danno ad utenze circostanti.



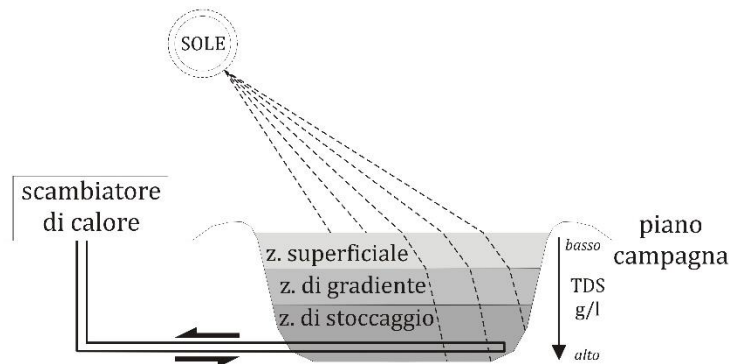
250

251 **Figura 4** – Impianto ATEs che sfrutta in modo diretto la falda freatica per accumulare e successivamente estrarre  
 252 calore (modificato da Schmidt et al., 2004).

253 **Figure 4** – Diagram of ATEs system exploiting groundwater to store and extract thermal energy (modified from  
 254 Schmidt et al., 2004).

255

256 Altre applicazioni che sfruttano l'acqua come mezzo di stoccaggio sono i *solar ponds* (Kamal,  
 257 1991), letteralmente stagni solari (**Figura 5**), o i *cavern thermal energy storage* (CTES) (Nordell, 2012).  
 258 I primi consistono in laghi artificiali o naturali il cui fondo viene spesso coperto da teli neri per attirare  
 259 maggiormente la luce solare. Sperimentati inizialmente in Israele negli anni '60, hanno in realtà avuto  
 260 poche applicazioni successive. L'idea alla base prevede di sfruttare gradienti di densità che si creano in  
 261 risposta a gradienti di salinità e fanno sì che l'acqua calda stazioni sul fondo del serbatoio a cielo aperto.  
 262 In questo modo la dissipazione del calore verso l'atmosfera è impedita da un isolante superficiale di  
 263 acqua più fredda. In questo caso risulta fondamentale un controllo costante della proliferazione algale a  
 264 causa della scarsa ossigenazione e del limitato ricircolo. I CTES di contro sono sistemi che utilizzano  
 265 serbatoi sotterranei, precedentemente sfruttati da industrie minerarie o petrolifere, per accumulare grandi  
 266 quantitativi di acqua e sfruttarli in maniera analoga ai TTES. Diverse applicazioni di questa tipologia  
 267 sono documentate in Svezia e Finlandia; a differenza degli altri impianti, il  $\Delta T$  e le portate di  
 268 estrazione/immissione possono essere notevolmente maggiori, ma lo svantaggio dei costi significativi  
 269 iniziali sembra poter essere superato solo con impianti di ampie dimensioni.



270

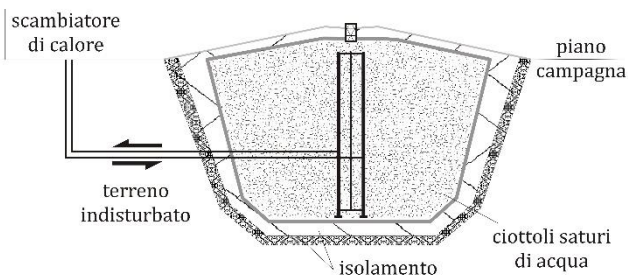
271 **Figura 5** – Utilizzo di stagni artificiali o naturali per l'accumulo di energia solare (modificato da Pinel et al., 2011).

272 **Figure 5** – Diagram of solar ponds for seasonal solar energy storage (modified from Pinel et al., 2011).

273

274 I *rock beds* (detti anche *water-gravel thermal energy storage* – WGTES) consistono in serbatoi  
 275 artificiali riempiti di ghiaia o pezzi di cemento saturi di acqua o aria (**Figura 6**), le quali agiscono da  
 276 fluido di trasporto del calore (Phillips, 1981). Se si utilizza aria, questa fa solo da mezzo trasportatore,  
 277 se al contrario viene applicata l'acqua, essa contribuisce anche allo stoccaggio e il sistema viene detto  
 278 ibrido attivo. Tali impianti possono garantire  $\Delta T$  maggiori rispetto ai TTES ed è più facile garantirne la  
 279 stratificazione e minimizzare la convezione interna. A svantaggio di questi sistemi, la struttura del  
 280 serbatoio dev'essere più resistente (costi maggiori); inoltre, a parità di volume del serbatoio e di  $\Delta T$ ,  
 281 l'energia stoccata è circa il 25% inferiore, ma è in ogni caso possibile sfruttare  $\Delta T$  decisamente maggiori.  
 282 Germania e Cina hanno messo in atto diverse applicazioni di questo tipo (Schmidt et al., 2004; Zhao et  
 283 al., 2011).

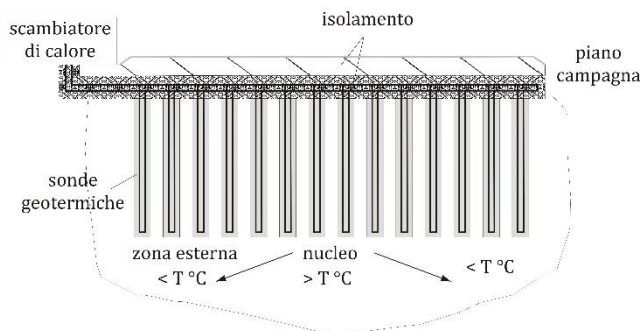




**Figura 6** – Impianto WGTES con serbatoio interrato riempito di acqua e materiale sciolto (modificato da Xu et al., 2014).

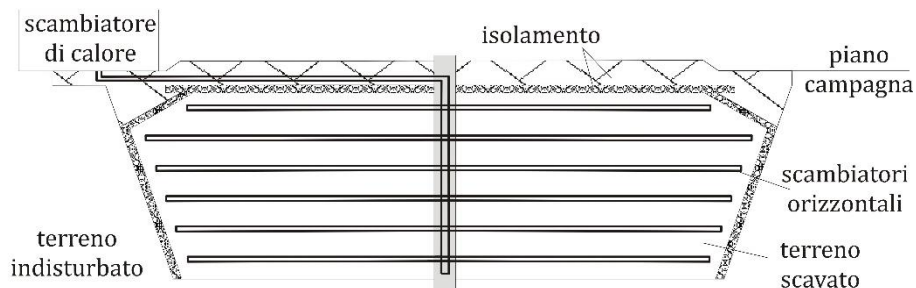
**Figure 6** – Diagram of buried tank with pebbles and water for WGTES (modified from Xu et al., 2014).

Rocce o sedimenti sciolti possono essere sfruttati in modo indiretto in sistemi a circuito chiuso che utilizzano sonde geotermiche di medio-basse profondità (30-50 m) collegate direttamente, o tramite uno stoccaggio intermedio, a pannelli solari che producono l'energia termica. L'uso delle sonde ha dato il nome a questi sistemi che vengono definiti *borehole thermal energy storage* (BTES) (Cabeza, 2015). Le sonde, in numero variabile da 30 a 50, sono solitamente disposte su un'area circolare e collegate in serie a blocchi di 5-6 (**Figura 7**). Quelle centrali agiscono da nucleo caldo e man mano che ci si sposta verso l'esterno la temperatura di ingresso (e quindi quella conseguente nel terreno/roccia) è progressivamente inferiore. Questa stratificazione è utile per gli stessi motivi già descritti a riguardo dei TTES e in più diminuisce il flusso termico dispersivo verso l'esterno. In pratica, diminuendo il gradiente termico, si crea uno schermo per proteggere il nucleo caldo direttamente con le sonde che fan parte del sistema. È importante applicare strati isolanti in superficie per diminuire la dissipazione verso l'atmosfera e, sebbene complicato dal punto di vista operativo, si potrebbe pensare di adottare isolamenti a lato dell'intero volume di stoccaggio. Tali sistemi possono anche essere costruiti a disposizione orizzontale, con le sonde sistemate orizzontalmente a partire da un condotto centrale (**Figura 8**). Un vantaggio dei BTES consiste nella diffusa disponibilità di terreni o rocce nei quali tale tecnologia è implementabile, anche se la densità di energia si attesta ai livelli più bassi di tutti i sistemi presentati, pari a 15-30 kWh/m<sup>3</sup> contro i 30-50 dei WGTES e i 60-80 dei TTES.



**Figura 7** – Impianto BTES con sviluppo verticale. La parte centrale del volume presenta temperature maggiori rispetto all'esterno.

**Figure 7** – Diagram of vertical BTES. The core presents temperature higher than portions in the annular zone.



**Figura 8** – Impianto BTES con sviluppo orizzontale (modificato da Pinel et al., 2011).

**Figure 8** – Diagram of horizontal BTES (modified from Pinel et al., 2011).

313 La Svezia fu il paese leader nello stoccaggio di calore sensibile a partire dagli anni '80. La limitata  
314 produzione solare dovuta alle alte latitudini l'ha spinta a trovare soluzioni efficaci per l'accumulo, così  
315 numerosi impianti sperimentali e dimostrativi furono costruiti in quegli anni. Principalmente si  
316 concentrarono su serbatoi artificiali o naturali di acqua di medio-grandi dimensioni (Ingelstad, Lyckebo,  
317 Lambohov), ma non disdegnarono nemmeno la sperimentazione su *rock beds* e stoccaggio in roccia  
318 (Store Skuggan, Södertuna, Lulea, Danderyd) (Dalenbäck, 2012; Nordell, 2012). Nei primi anni '90 il  
319 Canada prese la leadership della tecnologia con la messa a punto di numerosi impianti ATES (Sussex,  
320 Carleton, Saskatoon) non per accumulare energia solare, ma per sfruttare il surplus di calore prodotto  
321 dagli edifici nella stagione estiva ed utilizzarlo in inverno per il riscaldamento degli stessi (Pinel et al.,  
322 2011). La Germania iniziò la sperimentazione nel 1996 con una serie di dieci impianti di energia solare  
323 a larga scala usando serbatoi d'acqua (Amburgo, Friedrichshafen, Hannover, Monaco), acquiferi  
324 (Rostock, Berlino, Rastatt) e terreni o roccia (Neckarsulm, Attenkirchen, Crailsheim) per lo stoccaggio  
325 termico (Fisch et al., 1998; Schmidt et al., 2004, Xu et al., 2014). Anche l'Olanda, tra fine anni '90 e  
326 inizio del nuovo millennio, partì con la progettazione e la costruzione di molti impianti a ciclo aperto  
327 (Hilversum, Duiven, Eindhoven, Amersfoort), sfruttando le caratteristiche dei suoi abbondanti acquiferi  
328 con bassi gradienti idraulici, avvantaggiandosi del fatto che la velocità di propagazione dell'acqua  
329 sotterranea non dissipa in modo significativo l'energia termica immessa (Snjdeers, 2005). Nel 2005 gli  
330 impianti attivi erano 400 (Snjdeers, 2005), nel 2009 circa 1.000 (Godschalk e Bakema, 2009) e gli  
331 addetti ai lavori auspicano che tale numero continui ad aumentare anche in altri paesi europei per  
332 raggiungere gli obiettivi definiti dal protocollo di Kyoto.

333

#### 334 **4. Esempi di applicazione**

335 Come riportato nei paragrafi precedenti, i paesi che hanno sperimentato ed applicato  
336 maggiormente questo tipo di sistemi sono la Svezia, il Canada, l'Olanda e la Germania. In questo  
337 paragrafo si vuole riportare un esempio applicativo per ognuno di questi paesi, senza dimenticare  
338 tuttavia l'elevato numero di impianti che sono stati costruiti negli ultimi 20-30 anni (per una trattazione  
339 più dettagliata si rimanda pertanto a Cabeza (2015); Giordano (2015); Lundh e Dalenbäck (2008); Pinel  
340 et al. (2011); Schmidt et al. (2004); Xu et al. (2014)). In aggiunta si riporta l'esempio di un primo  
341 impianto sperimentale in Italia.

##### 342 *4.1 CTES a supporto della rete di teleriscaldamento di Uppsala (Svezia)*

343 Nel 1983 fu costruito un sistema di accumulo termico integrato nella rete di teleriscaldamento di  
344 Uppsala (tuttora in funzione). Consiste in un doppio circuito di stoccaggio (a breve e lungo termine) di  
345 energia prodotta parzialmente da collettori solari. Il volume della caverna è pari a circa 115.000 m<sup>3</sup> e le  
346 temperature di lavoro sono comprese tra 60 e 90°C, con una quantità di energia accumulata pari a 5,5  
347 GWh (Nordell, 2007).

348

##### 349 *4.2 BTES a supporto di un'area residenziale a Okotoks (Canada)*

350 L'impianto della "*Drake Landing Solar Community*" fu completato nel 2007 per soddisfare i  
351 fabbisogni di riscaldamento di 52 villette monofamiliari ([www.dlsc.ca](http://www.dlsc.ca)). Ogni unità abitativa possiede i  
352 propri pannelli solari (per un totale di 2.300 m<sup>2</sup> di superficie lorda) che provvedono alla produzione di  
353 ACS. Il surplus viene mandato nella rete di distribuzione che porta ad un serbatoio di stoccaggio  
354 intermedio a breve termine di circa 240 m<sup>3</sup>. Questo *buffer storage* ha il compito di mandare il fluido  
355 termovettore al volume di stoccaggio principale ad una temperatura costante (60-70°C circa). Tale  
356 volume consiste in 34.000 m<sup>3</sup> di sottosuolo perforato da 144 sonde geotermiche fino ad una profondità  
357 di 35 m. Il sistema di produzione, accumulo e distribuzione dell'energia termica è in grado di funzionare  
358 sfruttando per il 90% energia solare e per il restante 10% boiler a metano che integrano la produzione  
359 nei mesi più rigidi (la *T* esterna scende anche a -30°C a Gennaio). Le *T* del volume di accumulo variano  
360 tra 52°C delle porzioni laterali e i 72°C del nucleo caldo alla fine dell'estate, e tra i 30°C e 40°C  
361 rispettivamente alla fine dell'inverno.

362

##### 363 *4.3 ATES a supporto dell'Università di Eindhoven (Olanda)*

364 Un sistema di stoccaggio termico a ciclo aperto fu terminato nel 2012 per soddisfare i fabbisogni  
365 di riscaldamento e raffrescamento del 70% degli edifici facenti parte dell'Università ([www.tue.nl](http://www.tue.nl)).  
366 L'impianto è composto da 6 serie di pozzi (tre per il caldo e tre per il freddo), per un totale di 32  
367 perforazioni che verranno ampliate a 48 entro il 2020, che intercettano il medesimo acquifero e portano  
368 la *T* indisturbata del sottosuolo (11-12°C) a 8°C e 15°C rispettivamente nelle zone di accumulo fredda

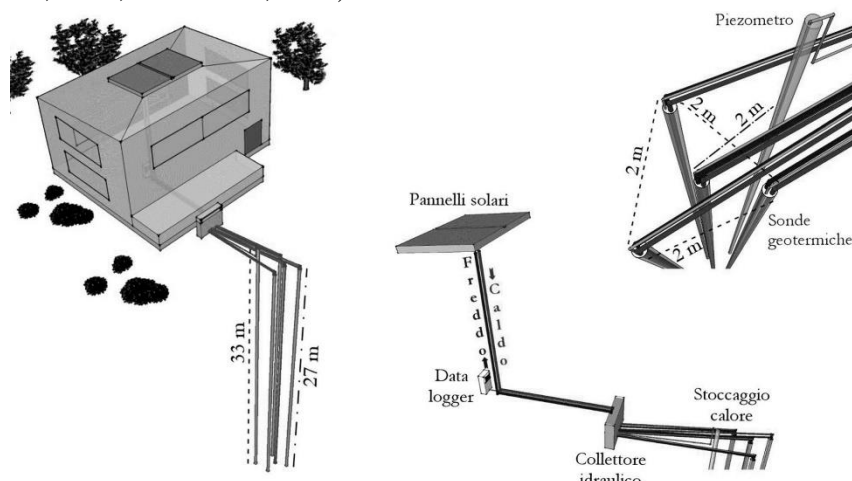
369 e calda. Le portate attuali ammontano a 2.000 m<sup>3</sup>/h con una potenza di raffrescamento pari a 25 MW.  
 370 Secondo i progettisti, tale impianto permette di risparmiare annualmente circa 3 milioni di kWh di  
 371 energia elettrica e 600.000 m<sup>3</sup> di gas naturale; con l'ampliamento in progetto, si prevede di arrivare a  
 372 ridurre l'utilizzo di elettricità di 4 milioni di kWh e l'uso di gas di 1 milione di m<sup>3</sup> (Cabeza, 2015).  
 373 Diversamente dagli altri descritti, questo impianto non utilizza energia solare, ma fa uso di pompe di  
 374 calore per aumentare e diminuire la *T* dell'acqua estratta a seconda del fabbisogno da soddisfare e re-  
 375 inietta il surplus (di caldo o di freddo) all'interno dell'acquifero per utilizzarlo nella stagione successiva.  
 376

377 **4.4 TTES a supporto di edifici residenziali a Friedrichshafen (Germania)**

378 Uno dei primi sistemi di stoccaggio di energia solare termica realizzati in Germania fu quello di  
 379 Friedrichshafen nel 1996 (Lundh e Dalenbäck, 2008). L'impianto fornisce energia termica ad un'area  
 380 residenziale costituita da un totale di 570 unità abitative multifamiliari. L'area dei collettori solari  
 381 ammonta a 5.600 m<sup>2</sup>, per un totale di potenza installata pari a 3,9 MW. La parte di accumulo stagionale  
 382 consiste in un serbatoio di acqua interrato con pareti in cemento rinforzato e volume di 12.000 m<sup>3</sup>.  
 383 L'interno delle pareti è rivestito di acciaio per ridurre le perdite di calore causate dalla diffusione di  
 384 vapore lungo i fianchi e per evitare che l'isolante esterno (lana minerale) venga attaccato dall'umidità.  
 385 La massima temperatura di progetto del serbatoio è 95°C, ma a causa delle perdite termiche (più  
 386 significative rispetto a quanto atteso) l'acqua rimane operativamente a valori massimi di 80-85°C con  
 387 differenze di *T* interne pari a 20-30°C (per la stratificazione descritta nei paragrafi precedenti). Le  
 388 temperature del terreno attorno al serbatoio (partite da valori iniziali di 12-15°C) si attestavano a 30°C  
 389 (di lato) e 40°C (sotto) a 8 anni dall'avvio dell'impianto, dopo aver raggiunto uno stato di equilibrio a  
 390 2-3 anni dall'avvio dell'impianto. Il  $\Delta T$  di lavoro è di 45°C contro i 65°C di progetto a causa di elevate  
 391 temperature di ritorno del sistema (dovute a difetti nella di distribuzione all'interno degli edifici), il che  
 392 causa una ridotta capacità termica utilizzabile. Sarebbero necessari interventi migliorativi per aumentare  
 393 la capacità di stoccaggio del sistema e quindi l'energia termica fornita.  
 394

395 **4.5 Sito sperimentale BTES a Grugliasco (TO)**

396 Dopo un primo prototipo di TTES costruito presso l'Università della Calabria (Cosenza) alla fine  
 397 degli anni '90 (Oliveti et al., 1998), poco fu fatto in Italia in quest'ambito. Un piccolo impianto BTES  
 398 è stato costruito a Grugliasco per valutare l'abilità di sedimenti alluvionali insaturi ad accumulare  
 399 l'energia termica prodotta da pannelli solari (Giordano et al., 2016). Il sistema è composto da 2 pannelli  
 400 solari termici (area collettori lorda 5 m<sup>2</sup>) collegati direttamente a 4 sonde geotermiche (prof. 27 m)  
 401 impostate in depositi alluvionali ghiaioso-sabbiosi insaturi (**Figura 9**). Nel primo anno di funzionamento  
 402 (Aprile-Ottobre 2014), l'impianto ha prodotto e trasferito al terreno circa 9 GJ di energia termica,  
 403 aumentando la temperatura del sottosuolo di circa 2°C fino a 2 m dal centro del campo sonde.  
 404 Contestualmente è stata analizzata la potenzialità delle indagini geofisiche di tipo elettrico per il  
 405 monitoraggio della propagazione del calore, sfruttando la relazione esistente tra resistività elettrica e  
 406 termica (Giordano, 2015; Arato et al., 2015).



407  
 408 **Figura 9** – Schema dell'impianto BTES di Grugliasco (TO).

409 **Figure 9** – Diagram of the Grugliasco BTES.

411 Tale impianto, ispirato al concetto dei *living lab*, vuole essere un laboratorio a scala reale per lo  
412 studio dell'interazione opera-terreno e per la valutazione di tecniche indirette di monitoraggio  
413 dell'estensione del pennacchio termico indotto. Un sito web ([www.gtes.unito.it](http://www.gtes.unito.it)) è stato organizzato in  
414 modo da spiegare le caratteristiche principali dell'impianto e delle attività che si eseguono nell'ambito  
415 della ricerca. Il sito permette a qualunque utente esterno di visualizzare la situazione in tempo reale con  
416 valori di temperatura nel terreno e lungo il circuito, portate idrauliche, potenza istantanea ed energia  
417 prodotta o consumata progressivamente.

418

## 419 **5. Conclusioni**

420 L'accumulo di energia è un concetto su cui si dibatte da quando si iniziò a parlare di FER. Tali  
421 fonti di energia sono spesso discontinue e non programmabili. Come esistono le batterie per accumulare  
422 energia elettrica, si ha la possibilità di utilizzare specifici materiali per incamerare l'energia termica.  
423 Diversi metodi sono stati analizzati e sono tuttora in fase di studio per cercare di ridurre lo  
424 sbilanciamento tra disponibilità e domanda di energia.

425 Tra i metodi più avanzati, con alle spalle numerosi progetti dimostrativi e operativi in modo  
426 soddisfacente, ci sono quelli che sfruttano il calore sensibile ed utilizzano l'acqua e il sottosuolo come  
427 materiali di stoccaggio. In questo articolo si è voluto fare una panoramica dei sistemi maggiormente  
428 utilizzati, con un focus sugli impianti ad acqua di falda (circuito aperto) e a sonde geotermiche (circuito  
429 chiuso). A parer di chi scrive, tali impianti (con limitazioni tecniche da valutare nel caso di impianti a  
430 circuito aperto) potrebbero essere applicati efficacemente sia ad utenze residenziali o commerciali per  
431 la climatizzazione, sia a piccole-medie aziende nell'ambito del ciclo produttivo (produzione e  
432 trasformazione di beni agro-alimentari e florovivaistici).

433 Si auspica pertanto che l'efficacia degli impianti di stoccaggio termico (comprovata da numerosi  
434 e diversificati impianti in nord-America e nord-Europa) possa finalmente essere sperimentata anche in  
435 Italia, dove troppo spesso i buchi normativi (non esiste ad oggi in Italia una legge specifica per impianti  
436 a sonde geotermiche) costituiscono ostacolo importante per lo sviluppo e la diffusione di pratiche  
437 innovative.

438

## 439 **6. Ringraziamenti**

440 Desidero esprimere i miei più sentiti ringraziamenti ai Prof. Cesare Comina e Prof. Giuseppe  
441 Mandrone del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino, grazie ai quali ho svolto il  
442 percorso di dottorato di ricerca presso lo stesso dipartimento. Grazie a loro ho avuto modo di  
443 specializzarmi nel campo dell'accumulo termico nel sottosuolo, con l'indubbio vantaggio di poter  
444 vedere in funzione un impianto in scala reale come quello di Grugliasco.

445 Vorrei altresì ringraziare la Dr.ssa Chiara Colombero per la cura della traduzione francese del  
446 riassunto.

447

448 **BIBLIOGRAFIA**

- 449 Arato, A., Boaga, J., Comina, C., De Seta, M., Di Sipio, E., Galgaro, A., Giordano, N., Mandrone, G., 2015.  
450 *Geophysical monitoring for shallow geothermal applications – two Italian case histories*. First Break - Near  
451 Surface Geoscience, 33(8): 75-79.
- 452 Banks, D., 2009. *Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of*  
453 *analytical approaches*. Hydrogeology Journal, 17: 1149-1155.
- 454 Buonasorte, G., Cataldi, R., Franci, T., Grassi, W., Manzella, A., Meccheri, M., Passaleva, G., 2011. *Previsioni di*  
455 *crescita della geotermia in Italia fino al 2030 - Per un nuovo manifesto della geotermia italiana*. Unione  
456 Geotermica Italiana, 108 pp.
- 457 Cabeza, L.F., 2015. *Advances in thermal energy storage systems – methods and applications*. Woodhead  
458 Publishing Series in Energy, Cambridge, UK, 592 pp.
- 459 Casasso, A., Sethi, R., 2013. *Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia*. Geoingegneria  
460 Ambientale e Mineraria, 138(1): 13-22.
- 461 Chung, J.D., Cho, S.H., Choon, S.T., Yoo, H., 2008. *The effect of diffuser configuration on thermal stratification*  
462 *in a rectangular storage tank*. Renewable Energy, 33(10): 2236-2245.
- 463 Fisch, M.N., Guigas, M., Dalenbäck, J.O., 1998. *A review of large-scale solar heating systems in Europe*. Solar  
464 Energy 63(6): 355-366.
- 465 Frattini, D., Colangelo, F., De Pertis, M., De Rosa, F.M., Ferone, C., Roviello, G., Cioffi, R., 2014. *Materiali da*  
466 *costruzione innovativi per accumulo di energia termica*. La Termotecnica – Energia & Edifici, Dicembre: 53-56.
- 467 Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L.F., 2010. *State of the art on high*  
468 *temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 – Concepts, materials and modellization*.  
469 Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14: 31-55.
- 470 Gin, B., Farid, H.M., Bansal, P.K., 2010. *Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change*  
471 *panels*. Energy Conversion and Management, 51:2698-2706.
- 472 Ginori Conti, G., 1936. *Utilizzazione dei soffiatori boraciferi. Storia, sviluppi, possibilità future*. Firenze, Tip. G.  
473 Cencetti, 60 pp.
- 474 Giordano N., 2015. *Ground thermal energy storage: analogical and numerical modeling coupled with geophysical*  
475 *monitoring from laboratory to field scale*. Tesi di Dottorato, DOI: 10.13140/2.1.3671.5843, 236 pp.
- 476 Giordano, N., Comina, C., Mandrone, G., Cagni, A., 2016. *Borehole thermal energy storage (BTES). First results*  
477 *from the injection phase of a living lab built up in unsaturated alluvial deposits (Torino, IT)*. Renewable Energy,  
478 86: 993-1008, DOI: 10.1016/j.renene.2015.08.052).
- 479 Hadorn, J.C., 2008. *Advanced storage concepts for active solar energy—IEA SHC Task 32*. In: Eurosun—1<sup>st</sup>  
480 International Conference on Solar Heating Cooling and Buildings.
- 481 Kamal, W.A., 1991. *Solar pond literature analysis*. Energy Conversion and Management, 32(3): 207-215.
- 482 Lundh, M., Dalenbäck, J.O., 2008. *Swedish solar heated residential area with seasonal storage in rock: initial*  
483 *evaluation*. Renewable Energy, 33: 703-711.
- 484 N'Tsoukpo, K.E., Liu, H., Le Pierrès, N., Luo, L., 2009. *Review on long-term sorption solar energy storage*.  
485 Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2385-2396.
- 486 Nordell, B., Grein, M., Kharseh, M., 2007. *Large-scale utilization of renewable energy requires energy storage*.  
487 International Conference for Renewable Energies and Sustainable Development, May 21-24, Abou Bakr, Algeria.
- 488 Nordell, B., 2012. *Underground thermal energy storage (UTES)*. 12<sup>th</sup> International Conference on Energy Storage  
489 (InnoStock), May 16-18, Lleida, Spain.
- 490 Oliveti, G., Arcuri, N., Ruffolo, S., 1998. *First experimental results from a prototype plant for the interseasonal*  
491 *storage of solar energy for the winter heating of buildings*. Solar Energy 62: 281–290.
- 492 Phillips, W.F., 1981. *Effects of stratification on the performance of solar air heating systems*. Solar Energy, 26:  
493 175-180.

- 494 Pinel, P., Cruickshank, C.A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A., 2011. *A review of available methods for seasonal*  
495 *storage of solar thermal energy in residential applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 3341-  
496 3359.
- 497 Pomianowski, M., Heiselberg, P., Zhang, Y., 2013. *Review of thermal energy storage technologies based on PCM*  
498 *application in buildings*. *Energy and Buildings*, 67: 56-59.
- 499 Schmidt, T., Mangold, D., Müller-Steinhagen, H., 2004. *Central solar heating plants with seasonal storage in*  
500 *Germany*. *Solar Energy* 76: 165–174.
- 501 Ucar, A., Inalli, M., 2008. *Thermal and economic comparisons of solar heating systems with seasonal storage*  
502 *used in building heating*. *Renewable Energy*, 33: 2532-2539.
- 503 Xu, J., Wang, R.Z., Li, Y., 2014. *A review of available technologies for seasonal thermal energy storage*. *Solar*  
504 *Energy*, 103: 610-638.
- 505 Zhao, D.L., Li, Y., Dai, Y.J., Wang, R.Z., 2011. *Optimal study of a solar air heating system with pebble bed energy*  
506 *storage*. *Energy Conversion and Management*, 52: 2392-2400.
- 507 **SITI WEB**
- 508 Cabeza, L.F., 2013. *Final report Annex 25: surplus heat management using advanced TES for CO<sub>2</sub> mitigation*.  
509 ECES IA-IEA - <http://www.iea-ec.es/annexes/completed-annexes.html> ultimo accesso eseguito il 20 settembre  
510 2015.
- 511 Dalenbäck, J.O., 2012 - <http://solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx> ultimo accesso eseguito  
512 il 15 ottobre 2015
- 513 DLSC - *Drake Landing Solar Community, Borehole thermal energy storage (BTES)*. <http://dlsc.ca> ultimo accesso  
514 eseguito il 15 giugno 2015.
- 515 Gestore Mercati Energetici - [www.mercatoelettrico.org/it](http://www.mercatoelettrico.org/it) ultimo accesso eseguito il 15 giugno 2015
- 516 Godschalk e Bakema, 2009. *20.000 Ates systems in the Netherlands in 2020*.  
517 <http://www.iftec.es/publicaciones.cgi>, ultimo accesso eseguito il 20 settembre 2015.
- 518 GTES Grugliasco Living Lab - [www.gtes.unito.it](http://www.gtes.unito.it) ultimo accesso eseguito il 15 giugno 2015.
- 519 Rapporto Eurostat, 2014 – *Energy, transport and environment indicators*. ISSN 2363-2372,  
520 [http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3930297/6613266/KS-DK-14-001-EN-N.pdf/4ec0677e-8fec-4dac-a058-](http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3930297/6613266/KS-DK-14-001-EN-N.pdf/4ec0677e-8fec-4dac-a058-5f2ebd0085e4)  
521 [5f2ebd0085e4](http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3930297/6613266/KS-DK-14-001-EN-N.pdf/4ec0677e-8fec-4dac-a058-5f2ebd0085e4), ultimo accesso eseguito il 25 febbraio 2015.
- 522 Snjideers, A.L., 2005. *Aquifer thermal energy storage in the Netherlands – Status beginning of 2005*,  
523 <http://www.iftechinternational.com/nl/publicaties.cgi>, ultimo accesso eseguito il 20 settembre 2015.
- 524 Università di Eindhoven (NL) - [www.tue.nl](http://www.tue.nl) ultimo accesso eseguito il 15 giugno 2015.