



Politecnico
di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

Indagini sperimentali sulle prestazioni e sulla sostenibilità di sistemi e tecnologie per il geo-scambio e l'accumulo di energia termica nel sottosuolo superficiale

This is a PhD Thesis

Original Citation:

Indagini sperimentali sulle prestazioni e sulla sostenibilità di sistemi e tecnologie per il geo-scambio e l'accumulo di energia termica nel sottosuolo superficiale / Anaclerio, F.. - ELETTRONICO. - (2026).

Availability:

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/307060> since: 2026-09-11

Published version

DOI:

Publisher: Politecnico di Bari

Terms of use:

(Article begins on next page)

			DICATEC _h			
			2026	D.R.S.A.T.E.	POLITECNICO DI BARI	14
	Abstract La transizione verso sistemi energetici sostenibili ha reso sempre più centrale il ruolo delle fonti rinnovabili. Tra le varie fonti, l'energia geotermica rappresenta una soluzione strategica affidabile e a basse emissioni di gas serra per la produzione continua di energia. In particolare, la geotermia a bassa entalpia offre un elevato potenziale applicativo, tuttavia ancora poco sfruttato a causa degli elevati costi iniziali di installazione, legati principalmente alle operazioni di perforazione, e della limitata diffusione di informazioni di carattere tecnico e scientifico. In questo contesto, i sistemi basati su pompe di calore geotermiche e geo-scambiatori verticali (Borehole Heat Exchangers, BHE) risultano tecnologie promettenti e ambientalmente sostenibili per il riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria. Tuttavia, la loro efficienza è spesso limitata dai meccanismi di trasferimento di calore prevalentemente conduttivi, che non consentono di valorizzare pienamente il contributo delle acque sotterranee. Il presente lavoro di tesi si propone di investigare e analizzare l'efficienza dello scambio termico in sistemi geotermici innovativi, con particolare attenzione al ruolo rivestito dai meccanismi di convezione termica e delle condizioni idrogeologiche. A tal fine, nella presente tesi, sono stati messi a punto modelli fisici sperimentali di laboratorio per la valutazione delle prestazioni di BHE di nuova concezione aperti e saturi in cui lo spazio attorno al geo-scambiatore risulta saturo di acqua sotterranea anziché essere riempito con materiali sigillanti, quali ad esempio malte bentonitiche, e che sfruttano quindi i moti convettivi delle acque sotterranee che circolano non solo nell'acquifero ma anche all'interno del BHE. L'attività di laboratorio è poi proseguita in campo attraverso la realizzazione di un impianto dimostrativo nel contesto climatico/geologico dell'area metropolitana di Bari. La ricerca condotta, inoltre, ha anche riguardato la sostenibilità dell'accumulo termico in falda e in particolare lo studio dell'effetto della formazione di biofilm sulle dinamiche di accumulo e scambio termico in un mezzo fratturato attraverso un modello fisico di laboratorio. I risultati ottenuti contribuiscono alla comprensione dei meccanismi di trasferimento di calore in presenza di flusso idrico e forniscono indicazioni utili per lo sviluppo di sistemi geotermici più efficienti e sostenibili		Francesco Anaclerio	PhD in Risk and Environmental, Territorial and Building Development Coordinator: Prof. Francesco Fiorito XXXVIII CYCLE Curriculum: GEO 05 DICATECh Department of Civil, Environmental, Land Building Engineering and Chemistry		2026
		In copertina	Indagini sperimentali sulle prestazioni e sulla sostenibilità di sistemi e tecnologie per il geoscambio e l'accumulo di energia termica nel sottosuolo superficiale		Francesco Anaclerio Indagini sperimentali sulle prestazioni e sulla sostenibilità di sistemi e tecnologie per il geoscambio e l'accumulo di energia termica nel sottosuolo superficiale Prof. Nicola Pastore DICATECh Politecnico di Bari Prof. Concetta I. Giasi DICATECh Politecnico di Bari	
			14			

			DICATEC _h			
				D.R.S.A.T.E.	POLITECNICO DI BARI	14
	Abstract La transizione verso sistemi energetici sostenibili ha reso sempre più centrale il ruolo delle fonti rinnovabili. Tra le varie fonti, l'energia geotermica rappresenta una soluzione strategica affidabile e a basse emissioni di gas serra per la produzione continua di energia. In particolare, la geotermia a bassa entalpia offre un elevato potenziale applicativo, tuttavia ancora poco sfruttato a causa degli elevati costi iniziali di installazione, legati principalmente alle operazioni di perforazione, e della limitata diffusione di informazioni di carattere tecnico e scientifico. In questo contesto, i sistemi basati su pompe di calore geotermiche e geo-scambiatori verticali (Borehole Heat Exchangers, BHE) risultano tecnologie promettenti e ambientalmente sostenibili per il riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria. Tuttavia, la loro efficienza è spesso limitata dai meccanismi di trasferimento di calore prevalentemente conduttivi, che non consentono di valorizzare pienamente il contributo delle acque sotterranee. Il presente lavoro di tesi si propone di investigare e analizzare l'efficienza dello scambio termico in sistemi geotermici innovativi, con particolare attenzione al ruolo rivestito dai meccanismi di convezione termica e delle condizioni idrogeologiche. A tal fine, nella presente tesi, sono stati messi a punto modelli fisici sperimentali di laboratorio per la valutazione delle prestazioni di BHE di nuova concezione aperti e saturi in cui lo spazio attorno al geo-scambiatore risulta saturo di acqua sotterranea anziché essere riempito con materiali sigillanti, quali ad esempio malte bentonitiche, e che sfruttano quindi i moti convettivi delle acque sotterranee che circolano non solo nell'acquifero ma anche all'interno del BHE. L'attività di laboratorio è poi proseguita in campo attraverso la realizzazione di un impianto dimostrativo nel contesto climatico/geologico dell'area metropolitana di Bari. La ricerca condotta, inoltre, ha anche riguardato la sostenibilità dell'accumulo termico in falda e in particolare lo studio dell'effetto della formazione di biofilm sulle dinamiche di accumulo e scambio termico in un mezzo fratturato attraverso un modello fisico di laboratorio. I risultati ottenuti contribuiscono alla comprensione dei meccanismi di trasferimento di calore in presenza di flusso idrico e forniscono indicazioni utili per lo sviluppo di sistemi geotermici più efficienti e sostenibili		2026	PhD in Risk and Environmental, Territorial and Building Development		2026
			Francesco Anaclerio	Coordinator: Prof. Francesco Fiorito XXXVIII CYCLE Curriculum: GEO 05 DICATECh Department of Civil, Environmental, Land, Building Engineering and Chemistry		
					Francesco Anaclerio	
					Indagini sperimentali sulle prestazioni e sulla sostenibilità di sistemi e tecnologie per il geoscambio e l'accumulo di energia termica nel sottosuolo superficiale	
			Indagini sperimentali sulle prestazioni e sulla sostenibilità di sistemi e tecnologie per il geoscambio e l'accumulo di energia		Prof. Nicola Pastore DICATECh Politecnico di Bari Prof. Concetta I. Giasi DICATECh Politecnico di Bari	
		In copertina.....				
			14			

			
	D.R.S.A.T.E.	POLITECNICO DI BARI	14
	PhD in Risk and Environmental, Territorial and Building Development		2026
	Coordinator: Prof. Francesco Fiorito		
	XXXVIII CYCLE Curriculum: GEO 05		
	> DICATECh Department of Civil, Environmental, Land Building Engineering and Chemistry		
		Francesco Anaclerio	
		Indagini sperimentali sulle prestazioni e sulla sostenibilità di sistemi e tecnologie per il geoscambio e l'accumulo di energia termica nel sottosuolo superficiale	
		Prof. Nicola Pastore DICATECh Politecnico di Bari Prof. Concetta I. Giasi DICATECh Politecnico di Bari	
			

EXTENDED ABSTRACT (eng)

The transition toward sustainable energy systems has increasingly placed renewable energy sources at the center of scientific research and global energy policies. In this context, geothermal energy represents a strategic solution due to its ability to provide continuous, reliable energy with low greenhouse gas emissions. In particular, shallow geothermal energy offers significant application potential; however, it remains an underutilized resource in Italy due to high initial installation costs—primarily associated with drilling operations—and the limited dissemination of technical and scientific knowledge.

In this framework, systems based on Ground Source Heat Pumps (GHPs) and Borehole Heat Exchangers (BHEs) represent promising technologies for space heating, cooling, and domestic hot water production. Nevertheless, their efficiency is often constrained by heat transfer mechanisms predominantly governed by conduction, which do not fully exploit the contribution of groundwater.

This thesis aims to investigate the heat transfer efficiency of innovative geothermal systems, with particular focus on the role of forced and natural convection of groundwater, as well as hydrogeological conditions. For this purpose, experimental physical models at laboratory scale were developed to evaluate the performance of groundwater backfilled BHEs. Based on the experimental results at laboratory scale, a full-scale demonstration plant was implemented into the climatic and geological context of the Metropolitan area of Bari, in order to assess the efficiency of groundwater backfilled BHE under field-scale condition. The system was designed to evaluate the operational behavior on thermal performance of the investigated technology under realistic environmental and geologic conditions. The research also addressed the sustainability of thermal energy storage in aquifers by investigating the effects of biofilm formation on heat storage and heat transfer processes in fractured media. For this purpose, an additional laboratory-scale physical model was developed to study the interactions between thermo-hydraulic processes and biological phenomena responsible for clogging, with particular attention to their potential impact on the long-term thermal performance of subsurface thermal energy storage systems.

The results obtained contribute to a better understanding of the thermo-hydraulic processes governing heat transfer in the presence of groundwater flow and highlight the potential of innovative saturated borehole heat exchanger configurations for improving the efficiency of shallow geothermal systems. Furthermore, the study provides new insights into the role of biological processes in the operation and long-term sustainability of aquifer thermal energy storage systems, supporting the development of more efficient, reliable, and sustainable geothermal technologies.

Keywords

Shallow geothermal energy; Borehole Heat Exchangers (BHE); Ground Source Heat Pumps (GHP); groundwater flow; natural convection; thermo-hydraulic processes; porous and fractured media; biofilm formation; heat transfer enhancement; aquifer systems; Borehole Thermal Energy Storage (BTES); renewable energy systems.

EXTENDED ABSTRACT *(ita)*

La transizione verso sistemi energetici sostenibili ha reso sempre più centrale il ruolo delle fonti rinnovabili. Tra le varie fonti, l'energia geotermica rappresenta una soluzione strategica affidabile e a basse emissioni di gas serra per una produzione continua di energia. In particolare, la geotermia a bassa entalpia offre un elevato potenziale applicativo, tuttavia ancora poco sfruttato a causa degli elevati costi iniziali di installazione, legati principalmente alle operazioni di perforazione, e della limitata diffusione di informazioni di carattere tecnico e scientifico.

In questo contesto, i sistemi basati su pompe di calore geotermiche e geo-scambiatori verticali (Borehole Heat Exchangers, BHE) risultano tecnologie promettenti e ambientalmente sostenibili per il riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria. Tuttavia, la loro efficienza è spesso limitata dai meccanismi di trasferimento di calore prevalentemente conduttivi, che non consentono di valorizzare pienamente il contributo delle acque sotterranee.

Il presente lavoro di tesi si propone di investigare e analizzare l'efficienza dello scambio termico in sistemi geotermici innovativi, con particolare attenzione al ruolo rivestito dai meccanismi di convezione termica e delle condizioni idrogeologiche. A tal fine, nella presente tesi, sono stati messi a punto modelli fisici sperimentali di laboratorio per la valutazione delle prestazioni di BHE di nuova concezione aperti e saturi in cui lo spazio attorno al geo-scambiatore risulta saturo di acqua sotterranea anziché essere riempito con materiali sigillanti, quali ad esempio malte bentonitiche, e che sfruttano quindi i moti convettivi delle acque sotterranee che circolano non solo nell'acquifero ma anche all'interno del BHE. L'attività di laboratorio è poi proseguita in campo attraverso la realizzazione di un impianto dimostrativo nel contesto climatico/geologico dell'area metropolitana di Bari. La ricerca condotta, inoltre, ha anche riguardato la sostenibilità dell'accumulo termico in falda e in particolare lo studio dell'effetto della formazione di biofilm sulle dinamiche di accumulo e scambio termico in un mezzo fratturato attraverso un modello fisico di laboratorio.

I risultati ottenuti contribuiscono alla comprensione dei meccanismi di trasferimento di calore in presenza di flusso idrico e forniscono indicazioni utili per lo sviluppo di sistemi geotermici più efficienti e sostenibili.

Keywords

Energia geotermica a bassa entalpia; geo-scambiatori di calore (BHE); pompe di calore geotermiche (GHP); flusso di acque sotterranee; convezione naturale; processi termo-idraulici; mezzi porosi e fratturati; formazione di biofilm; incremento dello scambio termico; sistemi acquiferi; accumulo termico geotermico (BTES); sistemi energetici rinnovabili.

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. L'Energia Geotermica	3
1.1 Natura delle risorse geotermiche	3
1.1.1. Sistema geotermico	6
1.1.2. Definizione e classificazione delle risorse geotermiche	8
1.1.3. Storia dello sviluppo della geotermia	10
1.2. Meccanismi di propagazione del calore nel sottosuolo	15
1.2.1. Principi della termodinamica e le leggi della conservazione	15
1.2.2. Termogeologia	17
1.2.3. Trasmissione del calore nel terreno	23
1.2.4. Temperatura del terreno	28
1.2.5. Bilancio energetico del sottosuolo	30
1.2.6. Analogie tra l'idrogeologia e la termogeologia	31
2. Gli impianti geotermici a bassa Entalpia	33
2.1 Aspetti introduttivi sulle pompe di calore geotermiche	34
2.1.1. La pompa di calore	34
2.1.2. Il fluido termovettore	36
2.1.3. Il sistema di distribuzione	37
2.2 Tipologie di impianti	37
2.2.1. Open loop	37
2.2.2. impianti Closed loop	52
2.3 Potenzialità e limitazioni degli impianti geotermici	57
2.3.1. Pregi degli impianti geotermici	57
2.3.2. Problematiche degli impianti geotermici	58
2.4 Considerazioni sul futuro energia geotermica in Italia	60
2.4.2. Quadro normativo	62
2.4.3. Strategie per la transizione energetica, i distretti energetici	63
3. Studio di un sistema di geo scambio termico innovativo	64
3.1. Obiettivo della sperimentazione	64
3.2. Descrizione del setup Sperimentale in laboratorio	65
3.3. Risultati e discussioni della sperimentazione in laboratorio	68
3.4. Descrizione del setup Sperimentale in campo	72
3.5. Risultati e discussioni della sperimentazione in campo	77
4. Esperimenti di laboratorio per lo studio degli effetti causati dal clogging sull'efficienza dello scambio termico nei mezzi fratturati	80
4.1. Aspetti introduttivi	80
4.2. Stato dell'arte del fenomeno del clogging negli ATES	80

4.3 Descrizione del setup sperimentale	83
4.4. Esperimenti condotti	88
4.5. Risultati sperimentazione e discussioni	96
CONCLUSIONI	98
NOTES	100
SITI CONSULTATI	100
RICONOSCIMENTI	101
LISTA DELLE FIGURE	102
LISTA DELLE TABELLE	105
BIBLIOGRAFIA	106
CURRICULUM	109

INTRODUZIONE

La crescente necessità di una transizione verso sistemi energetici sostenibili ha posto le fonti rinnovabili al centro della ricerca scientifica e delle politiche energetiche globali. In questo contesto, l'energia geotermica rappresenta una risorsa strategica grazie alla sua capacità di fornire energia continua, affidabile e a basse emissioni di gas serra. A differenza di altre fonti rinnovabili, essa non è soggetta a variabilità climatica e consente una produzione energetica stabile, rendendola particolarmente adatta a supportare la decarbonizzazione dei sistemi energetici. (Omer 2008)[1].

La limitata diffusione dell'energia geotermica in Italia è stata oggetto di crescente attenzione sia a livello nazionale che internazionale. Secondo l'International Energy Agency (IEA), uno dei principali fattori che rallentano lo sviluppo della geotermia è rappresentato dall'elevato rischio finanziario associato alle attività esplorative e dai complessi processi di autorizzazione e concessione, che incidono negativamente sulla bancabilità dei progetti. Nel contesto italiano, tali criticità risultano amplificate dalla frammentazione delle competenze amministrative tra Stato e Regioni, derivante dal processo di decentramento delle funzioni in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche. Il quadro normativo di riferimento è disciplinato principalmente dal D.Lgs. 11 febbraio 2010, n. 22, che ha riordinato la materia prevedendo procedure differenti in funzione della tipologia e della dimensione degli impianti, ma che ha lasciato ampi margini di regolamentazione agli enti territoriali. Si evidenzia inoltre come il settore geotermico italiano abbia registrato una sostanziale stagnazione della capacità installata negli ultimi quindici anni, a differenza di altre fonti rinnovabili quali il fotovoltaico e l'eolico. Tale andamento è riconducibile non solo ai costi di investimento iniziali e all'incertezza geologica, ma anche alla lunghezza degli iter autorizzativi, alle procedure di valutazione ambientale e ai fenomeni di opposizione territoriale (NIMBY), che aumentano significativamente i tempi di realizzazione degli impianti. (Mase 2023)[2]

La temperatura del sottosuolo al di sotto della profondità di circa (3 – 6 m) è poco condizionata dalle fluttuazioni stagionali che interessano l'ambiente esterno, ma è influenzata dal flusso di calore geotermico. L'energia presente nel sottosuolo, alimentata dal flusso geotermico, può essere recuperata tramite uno scambiatore di calore geotermico, che utilizza tale calore per supportare una pompa di calore che integra l'energia necessaria per riscaldare un ambiente. Lo scambiatore di calore geotermico abbinato a una pompa di calore è l'applicazione diretta più diffusa e ambientalmente sostenibile dell'energia geotermica a bassa entalpia. Si tratta di un sistema di climatizzazione efficiente, e può essere impiegato sia per il riscaldamento che per il raffreddamento, ovvero immettendo calore nel sottosuolo anziché estrarlo dallo stesso come nel caso del riscaldamento.

Le Comunità di Energia Rinnovabili (REC) sono in crescita e possono coinvolgere diverse attività legate alla domanda, offerta, distribuzione, condivisione e consumo di energia rinnovabile. Queste attività possono essere svolte da realtà industriali, agricole e commerciali anche in collaborazione con comunità di cittadini così come con le autorità pubbliche.

Il riscaldamento degli ambienti, così come la produzione di acqua calda sanitaria (ACS), rappresenta buona parte del consumo energetico europeo. Le pompe di calore geotermiche (GHP) sono tecnologie altamente efficienti dal punto di vista energetico per il riscaldamento, la produzione di ACS e il raffrescamento estivo. Si stima che nell'UE un risparmio di energia primaria di 520 TWh e una riduzione delle emissioni di CO₂ di 152 Mt possano essere ottenuti sostituendo le caldaie a gas naturale con le GHP, contribuendo alla riduzione della dipendenza dal gas naturale

proveniente da fonti non UE (International Energy Agency IEA Paris 2022)[3]. Il futuro delle REC richiede sistemi di accumulo di energia termica per gestire la fluttuazione della domanda e dell'offerta di calore/raffrescamento su diverse scale. Per applicazioni su larga scala, l'accumulo termico stagionale basato su cluster di geo scambiatori di calore, i cosiddetti Borehole Thermal Energy Storage (BTES), è il sistema più promettente dal punto di vista tecnico ed economico nonché ambientale.

I geo-scambiatori di calore verticali (Borehole Heat Exchangers - BHEs) utilizzati sia per le GHP e sia per i BTES sono caratterizzati da una bassa efficienza energetica termica, il che significa che è necessario raggiungere profondità considerevoli o aumentare il numero di installazioni per soddisfare la domanda termica. Il costo della perforazione rappresenta fino alla metà dei costi dell'installazione del BHE. Lo stato dell'arte della ricerca e dello sviluppo in questo contesto, quindi, si è concentrato sul miglioramento dello scambio e della capacità di accumulo termico dei BHE mediante ad esempio l'utilizzo di materiali ad alta conducibilità termica e/o scambiatori di calore migliorati nella loro geometria. I metodi sopra menzionati comportano lo scambio di calore tra il BHE e il sottosuolo tramite conduzione, senza sfruttare pienamente la presenza delle acque sotterranee che aumenterebbero l'efficienza nel trasferimento di calore. Inoltre, la presenza di un acquifero caratterizzato da una conducibilità idraulica elevata dà luogo al così detto effetto termosifone che migliora notevolmente i processi di scambio termico. (Gehlin, S., Spittler, J. D. 2016)[4]

Negli acquiferi, lo scambio termico tra la matrice solida e i fluidi circolanti dipende da molteplici fattori, come le proprietà termiche sia della matrice che del fluido, la distribuzione dei pori e/o delle fratture, le condizioni di flusso nonché i parametri chimico-fisici. La previsione del comportamento dello scambio termico, pertanto, negli acquiferi, soprattutto nel lungo periodo risulta complessa. Sebbene negli ultimi decenni siano stati approfonditi gli effetti dei fattori fisici e chimici, il ruolo dei processi biologici, in particolare della crescita microbica e della formazione di biofilm rimane ancora poco studiato e scarsamente quantificata.

Il presente lavoro di tesi ha due obiettivi di ordini differenti. Il primo obiettivo più orientato alla ricerca di base è quello di studiare i meccanismi e le problematiche legate allo scambio e accumulo termico negli acquiferi attraverso un modello fisico di laboratorio. Il secondo obiettivo di carattere più applicativo è quello di studiare l'efficienza dello scambio termico di sistemi geotermici innovativi sia in laboratorio che in campo che sfruttano la presenza di acqua nel sottosuolo.

In particolare:

1. È stato allestito un modello fisico di laboratorio per indagare le prestazioni termiche di un design innovativo di BHE aperto ovvero saturo. L'installazione sperimentale sviluppata rappresenta un framework per stimare l'efficienza del BHE aperto. Sono stati condotti diversi esperimenti in condizioni adiabatiche per valutare l'efficienza termica del BHE innovativo.
2. Sulla scorta dei risultati ottenuti da questa prima fase è stato messo a punto un impianto dimostratore nel contesto geologico/climatico dell'area metropolitana di Bari, ovvero presso le piscine comunali di Modugno volto a validare e dimostrare l'efficienza del BHE innovativo su scala reale.
3. L'ultima fase riguarda una ricerca sperimentale per la valutazione degli effetti della crescita del biofilm sull'efficienza dell'accumulo e scambio termico. In particolare, è stato allestito un modello fisico di laboratorio per valutare tale effetto su un blocco di roccia calcarea fratturato.

Il presente lavoro di tesi è strutturato nel seguente modo. In una parte (capitoli 1, 2) si riporta la parte di letteratura che riguarda lo stato dell'arte della risorsa geotermica.

La seconda parte invece (capitoli 3 e 4) riguarda le fasi sperimentali precedentemente menzionate.

1. L'Energia Geotermica

Per Geotermia si intende la disciplina della Geologia Applicata che studia l'insieme dei fenomeni naturali coinvolti nella produzione e nel trasferimento di calore proveniente dall'interno della terra e rappresenta una delle tante risorse rinnovabili che la natura offre in maniera costante e duratura, durante tutto l'arco dell'anno. L'energia geotermica sfrutta il calore naturale presente nel sottosuolo terrestre, originato principalmente dal decadimento radioattivo e dal calore residuo della formazione del pianeta. Le moderne tecnologie geotermiche, che includono sistemi convenzionali e sistemi geotermici avanzati (Enhanced Geothermal Systems, EGS), permettono applicazioni diversificate che spaziano dalla produzione di energia elettrica all'uso diretto del calore per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici. Tuttavia, lo sviluppo su larga scala di questa risorsa pone ancora sfide di natura tecnica, economica e ambientale, che richiedono un approccio multidisciplinare e un continuo avanzamento della ricerca.

1.1 Natura delle risorse geotermiche

Il termine geotermia deriva dal greco "geo" e "thermòs" e il significato letterale è calore della terra. L'acqua di pioggia si infiltra nel terreno e circola nel sottosuolo attraverso le rocce porose e frantumate venendo riscaldata fino a temperature elevate che spesso portano anche all'evaporazione. L'acqua calda risale in superficie attraverso le faglie e le fratture formando soffioni, fumarole e geyser. Se invece rimane nel sottosuolo intrappolata tra due strati impermeabili, allora si viene a formare un serbatoio geotermico. I pozzi mettono in comunicazione la sorgente geotermica con l'esterno consentendo lo sfruttamento del calore trasportato dal fluido che si dissipa con regolarità verso l'esterno. Questa forma di calore è praticamente "inesauribile" e potrebbe essere sfruttata dall'uomo per produrre energia, ma purtroppo risulta assai disperso e solo raramente concentrato.

Più del 90% in volume della Terra ha una temperatura superiore ai 1000°C. Questo calore ha due origini (Fig.1): un calore esterno dovuto al sole e alla pioggia che interessa i primi 15 m di profondità e un calore interno oltre i 20 m, prodotto dal decadimento nucleare di sostanze radioattive, questo è il calore che viene definito geotermico.

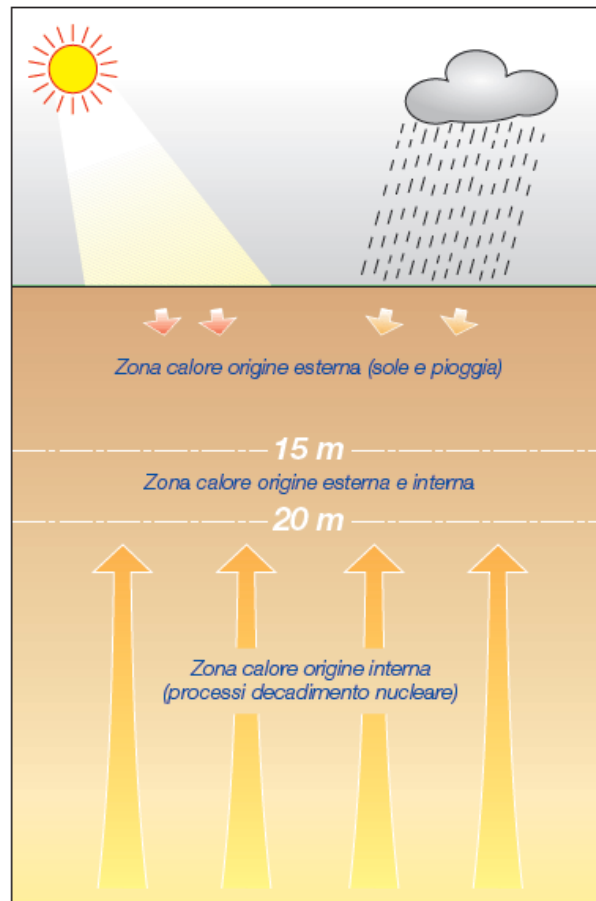


Fig.1 - Origine del calore terrestre (Sistemi a pannelli radianti e pompe di calore ,Caleffi spa, 2008).

Il gradiente geotermico indica la variazione della temperatura con la profondità. Un valore medio è di circa $30^{\circ}\text{C}/\text{Km}$, ma esistono zone ove il gradiente è maggiore, ad esempio le zone assiali delle dorsali oceaniche dove il flusso di calore è da 4 o 6 volte quello normale. In queste zone le masse magmatiche calde sono risalite dal mantello o da parti profonde della crosta e sono arrivate in prossimità della superficie, o addirittura in superficie come per i vulcani.

Ove tali condizioni sono accentuate sussistono premesse favorevoli alla ricerca geotermica.

Mentre la temperatura nell'aria varia con una periodicità giornaliera e annuale, la temperatura nel terreno risente delle variazioni esterne solo nei primi metri superficiali. La variazione di temperatura diminuisce con la profondità ed è trascurabile al di sotto dei 15 metri (Fig.2). Le temperature locali del terreno dipendono dal clima, dalla copertura del terreno, dall'inclinazione e dalle proprietà del suolo. Il terreno assorbe circa la metà dell'energia del sole.

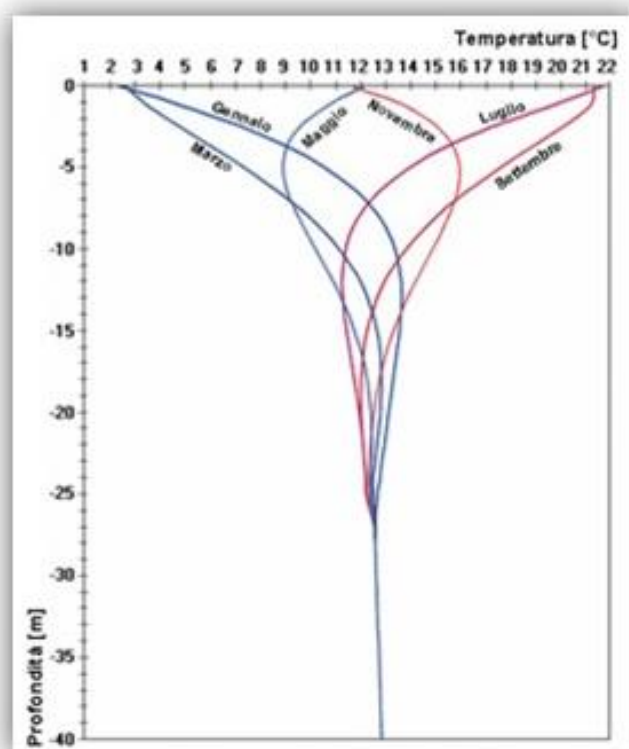


Fig.2 - Andamento della temperatura nel giro di un anno (Geosolution srl).

È proprio la differenza di temperatura tra le zone interne più calde (nucleo e mantello) e quelle superficiali più fredde (crosta terrestre) a creare un flusso di calore dall'interno verso l'esterno della Terra. Si calcola che l'energia geotermica contenuta entro i primi 5 km sia equivalente a circa 500.000 volte gli attuali fabbisogni mondiali. Questo calore è generato essenzialmente dai processi naturali di decadimento nucleare di elementi quali Uranio, Torio e Potassio. Si tratta quindi di un processo in perfetto equilibrio ambientale, presente fin dall'inizio della storia del nostro pianeta e che non ne altera gli equilibri fisici e chimici. L'energia geotermica è quindi una forma inesauribile ed ecologica e generalmente definita come rinnovabile e sostenibile.

Rinnovabile perché la ricarica energetica avviene attraverso l'apporto al sistema di fluidi caldi contemporaneamente allo sfruttamento. Invece è sostenibile perché la risorsa si rigenera a una velocità maggiore di quanto non sia sfruttata. L'utilizzazione di questa energia è limitata a quelle aree nelle quali le condizioni geologiche permettono ad un vettore, come acqua in fase liquida o vapore, di trasportare il calore dalle formazioni calde profonde alla superficie, formando le risorse geotermiche. Questa risorsa può essere impiegata per un impianto di riscaldamento e raffreddamento per regolare il comfort delle nostre case ed ambienti di lavoro, abbattendo l'uso delle fonti tradizionali di combustibile fossile e ridurre quindi le emissioni di CO₂ e polveri sottili, in ottemperanza agli obblighi presi con il protocollo di Kyoto e le norme comunitarie, nonché migliorando le prestazioni energetiche per tutte le unità immobiliari, siano esse ad uso abitativo o lavorativo, di nuova costruzione o ristrutturazione.

In Italia gli impianti geotermici sono una tecnologia non molto consolidata, essendo legata in maniera imprescindibile alle pompe di calore ed a una buona progettazione, che per poter assicurare un rendimento costante e duraturo nel tempo, deve essere rispettosa dell'ambiente circostante e preservarlo il più possibile. Si ha quindi la necessità di fornire validi strumenti di analisi e di sostenibilità, per consentire a questo promettente mercato di svilupparsi in

modo sano, corretto e rispettoso dell'ambiente. Per questo motivo si è cercato di analizzare la situazione in Paesi dove questa impiantistica è presente già da diversi decenni e si sono considerati inoltre atti di convegno, bollettini, opere scientifiche presenti per lo più in internet che cercano di affrontare e caratterizzare aspetti chiave della tecnologia ed infine si è consultata la normativa vigente in materia.

1.1.1. Sistema geotermico

Sistemi geotermici possono formarsi in regioni con gradiente geotermico normale o poco più alto e, soprattutto, nelle regioni prossime ai margini delle zolle crostali, dove il valore del gradiente geotermico può essere anche notevolmente superiore a quello medio. Nel primo caso, questi sistemi hanno temperature basse, di solito non più di 100°C a profondità economicamente utili, mentre nel secondo caso, si può avere una vasta gamma di temperature, da basse sino ad oltre 400°C.

Un sistema geotermico può essere definito schematicamente come un sistema acqueo convettivo, che, in uno spazio confinato della parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore da una sorgente termica al luogo, generalmente la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato) (*Hochstein, 1990*)[5]. Un sistema geotermico è formato da tre elementi: la sorgente di calore, il serbatoio ed il fluido, che è il mezzo che trasporta il calore.

La sorgente di calore può essere una intrusione magmatica a temperatura molto alta (>600°C), che si è posizionata a profondità relativamente piccola (5-10 km), oppure, come in certi sistemi a bassa temperatura, il normale calore della Terra. Il serbatoio è un complesso di rocce calde permeabili nel quale i fluidi possono circolare assorbendo il calore. Il serbatoio generalmente è ricoperto da rocce impermeabili e connesso a zone di ricarica superficiali dalle quali le acque meteoriche possono sostituire, totalmente o parzialmente, i fluidi perduti attraverso vie naturali (per esempio sorgenti) o che sono estratti tramite pozzi. Il fluido geotermico, nella maggioranza dei casi, è acqua meteorica in fase liquida o vapore, in dipendenza dalla sua temperatura e pressione. Quest'acqua spesso trascina con se sostanze chimiche e gas, come CO₂, H₂S ed altri. La (Fig.3) è la rappresentazione schematica e molto semplificata di un sistema geotermico. Le leggi che regolano la convezione dei fluidi sono alla base del meccanismo dei sistemi geotermici. La (Fig.4) descrive schematicamente questo meccanismo, prendendo ad esempio un sistema idrotermale a media temperatura. La convezione si attiva in seguito al riscaldamento ed alla conseguente espansione termica del fluido in un campo gravitazionale; il calore alla base del sistema di circolazione è l'energia che alimenta e muove il sistema. Il fluido caldo e di minor densità tende a salire e ad essere sostituito dal fluido più freddo e di densità maggiore, proveniente dai margini del sistema.

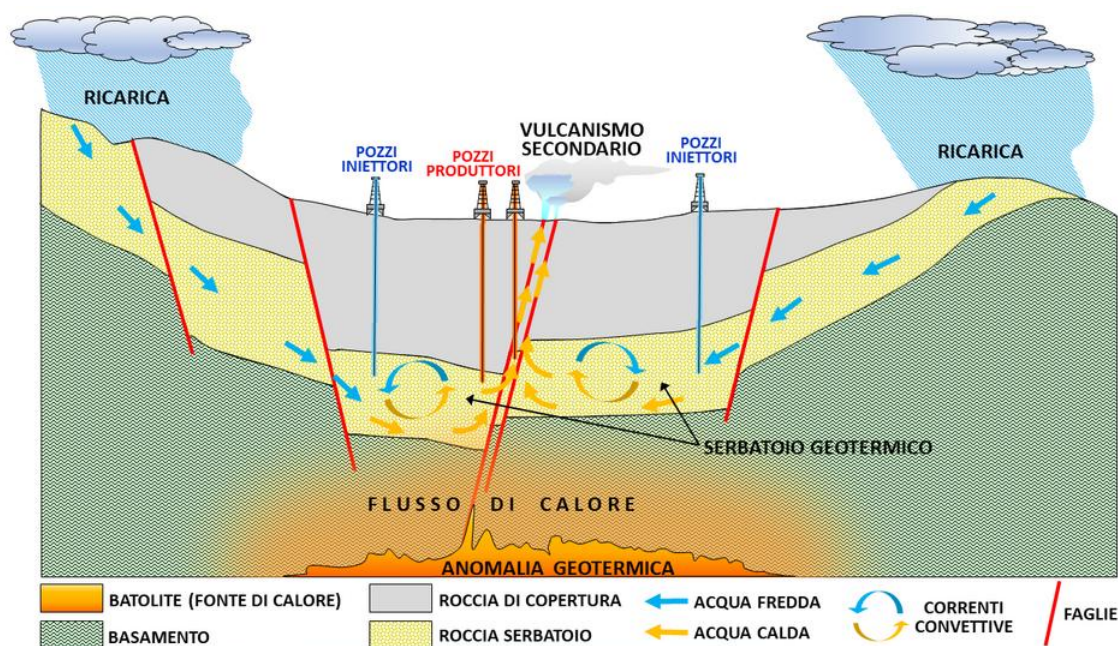


Fig.3 - Rappresentazione schematica di un sistema naturale geotermico, (Antonio Valdisturlo)

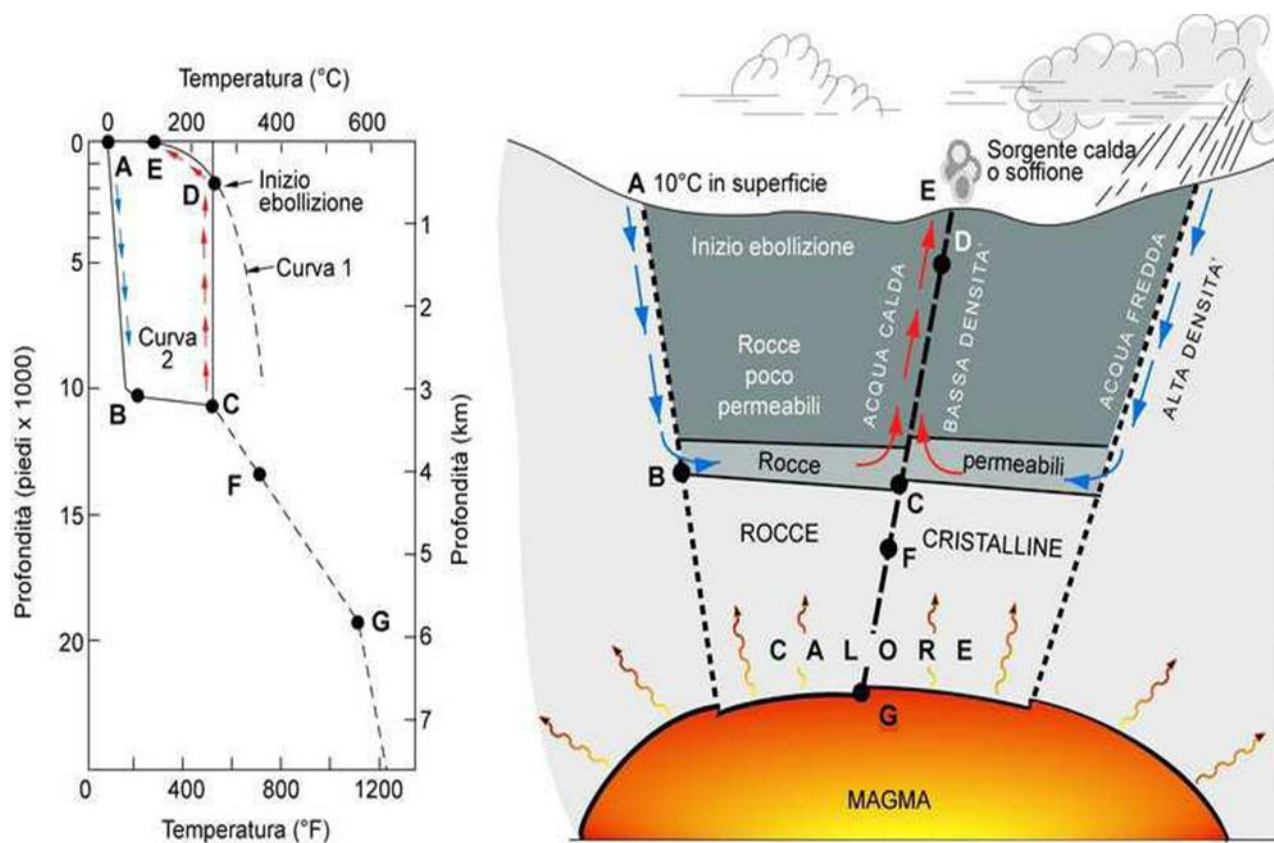


Fig.4 - Modello di un sistema geotermico. La curva 1 è la curva di ebollizione dell'acqua; la curva 2 mostra l'andamento della temperatura del fluido lungo il suo percorso dal punto di ingresso A a quello di uscita E. IGA (International Geothermal Association)

La convezione, per sua natura, tende a far aumentare la temperatura delle parti alte del sistema, mentre la temperatura delle parti inferiori diminuisce (White, 1973)[6]. Il fenomeno descritto può sembrare semplice; in pratica, la co-

struzione del modello di un sistema geotermico reale non è affatto facile. Essa coinvolge diverse discipline e richiede una vasta esperienza, soprattutto se si ha a che fare con sistemi ad alta temperatura. In natura, inoltre, si possono formare sistemi geotermici in varie combinazioni di situazioni geologiche, fisiche e chimiche, dando origine a tipi diversi di sistemi. La sorgente di calore è l'unico dei tre elementi di un sistema geotermico che deve essere naturale. Gli altri due elementi, se esistono le condizioni adatte, possono essere artificiali. Per esempio, i fluidi geotermici estratti dal serbatoio per alimentare la turbina di una centrale elettrica, dopo averne sfruttato l'energia, possono essere immessi di nuovo nel serbatoio attraverso appositi pozzi di reiniezione. In questo modo la ricarica naturale del serbatoio è integrata dalla ricarica artificiale. Da diversi anni, inoltre, la reiniezione dei fluidi sfruttati è stata adottata per ridurre drasticamente l'impatto ambientale degli impianti geotermici.

Descrivere le leggi e i meccanismi che regolano la convezione dei fluidi alla base di questi sistemi non è affatto semplice ed esula dagli scopi di questa tesi, poiché la costruzione del modello reale è molto complessa, richiede una vasta esperienza che può essere il frutto di varie combinazioni: geologiche, fisiche e chimiche. I sistemi idrotermali sono finora gli unici ad essere sfruttati a livello industriale per la produzione di energia elettrica. Esistono poi altri tre tipi di sistemi ancora in fase di studio o di sperimentazione più o meno avanzata:

- i sistemi geopressurizzati, nei quali non si ha alcuna comunicazione con la superficie e in cui il calore si propaga per conduzione;
- i sistemi geotermici in rocce calde e secche, che non contengono in origine neanche il fluido, ma che possono essere artificialmente fratturate dando luogo ad un serbatoio geotermico artificiale;
- i sistemi magmatici dove si sfrutta l'idea di estrarre energia da magmi a profondità accessibile ai mezzi di perforazione.

1.1.2. Definizione e classificazione delle risorse geotermiche

Quando si parla genericamente di risorse geotermiche, di solito ci si riferisce a quelle che più precisamente dovrebbero essere chiamate risorse di base accessibili, intendendo con questo termine tutta l'energia termica contenuta tra la superficie terrestre ed una determinata profondità, in un'area definita e misurata partendo dalla temperatura media annua locale (*Muffler e Cataldi, 1978*)[7]. Le risorse di base accessibili comprendono le risorse utili (= Risorse) quella parte delle risorse che potrebbero essere estratte, economicamente in accordo con la legislazione locale, entro un periodo di tempo definito (meno di 100 anni). Questa categoria comprende le risorse economiche individuate (= Riserve) quella parte delle risorse di una determinata area, che possono essere estratte legalmente ad un costo competitivo con altre fonti commerciali di energia e che sono state confermate da perforazioni o dai risultati dell'esplorazione geologica, geochimica e geofisica.

A seconda delle temperature raggiunte dalle perforazioni, gli utilizzi del calore geotermico possono essere diversi: dalla balneoterapia, all'utilizzo in agricoltura (serre) o piscicoltura, al riscaldamento di edifici mediante perforazioni associate a pompe di calore, alla produzione di energia elettrica. Il classico diagramma di (*Lindal 1973*)[8] mostra i possibili usi dei fluidi geotermici alle varie temperature (Fig.5). Una rielaborazione ad opera di (*Fanelli e Dickson 2004*)[9] si dimostra ancora attuale, con l'aggiunta però della generazione di elettricità con cicli binari e del condizionamento di ambienti mediante pompe di calore.

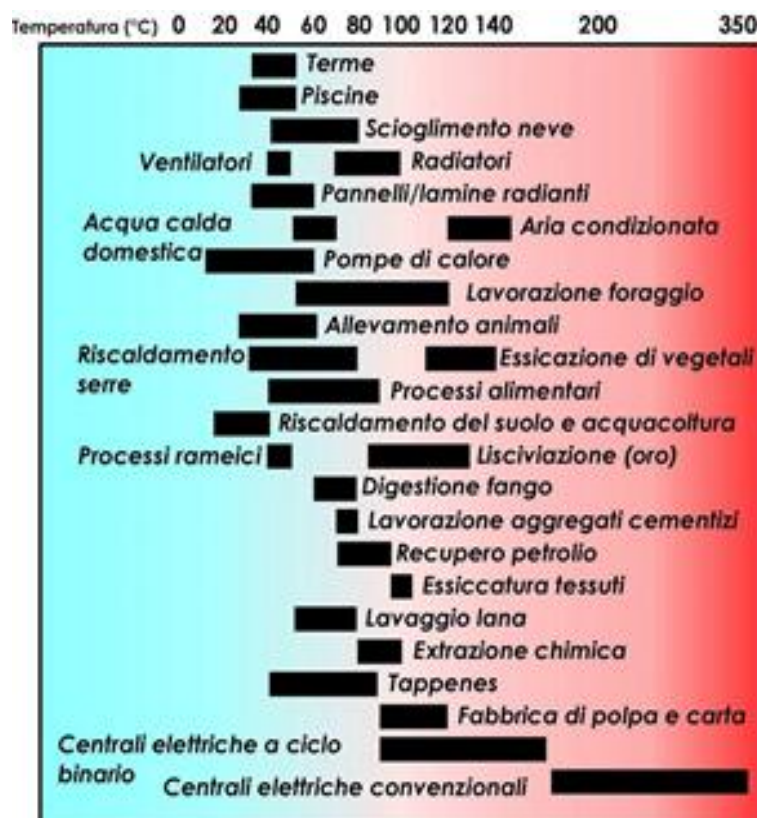


Fig.5 - Diagramma con l'utilizzazione dei fluidi geotermici (Fanelli e Dickson,2004)

Il più comune criterio di classificazione delle sorgenti geotermiche si basa sull'entalpia dei fluidi, che trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde alla superficie. L'entalpia, che può essere considerata più o meno proporzionale alla temperatura, è usata per esprimere il contenuto termico (energia termica) dei fluidi, e dà un'idea approssimativa del loro "valore" (Bloemendal 2015)[10]. In termini tecnico-scientifici, l'entalpia è una funzione di stato che quantifica l'energia totale di un sistema termodinamico a pressione definita, risultando fondamentale per l'analisi dei processi energetici in chimica e fisica. Le risorse sono divise secondo diversi criteri e autori (Tab.1).

Molti autori raggruppano l'utilizzo della risorsa geotermica, in funzione della temperatura crescente del terreno, in questo modo:

- alta entalpia per la produzione di energia elettrica attraverso vapore ad alta temperatura che aziona delle turbine e trasforma il proprio contenuto energetico in energia meccanica;
- media entalpia con utilizzo diretto del calore;
- bassa entalpia basata sul semplice scambio termico con il sottosuolo, attraverso sistemi costituiti da sonde inserite nel terreno e pompe di calore geotermico.

Altri invece propongono una classificazione basata sulla distinzione tra le risorse più adatte alla generazione di elettricità (alta entalpia) e quelle più adatte all'uso diretto del calore (bassa entalpia). Per quanto riguarda il concetto di uso diretto del fluido geotermico, (Lienau 1998)[11] afferma che per basse temperature può adoperarsi per: riscaldamento, usi industriali, piscine, agricoltura e acquacoltura. Le pompe di calore possono essere o meno impiegate per fornire riscaldamento in questa tipologia, l'unica avvertenza è munirsi di uno scambiatore di calore per tenere sotto controllo la composizione chimica del fluido emunto, limitando le incrostazioni e le corrosioni a questa appa-

recchiatura e salvaguardando così il resto dell'impianto. Tuttavia quando si parla di fluidi geotermici è bene, comunque, indicare la loro temperatura, o almeno un intervallo di temperatura, perché i termini bassa, media o alta possono avere significati diversi e creare errori di interpretazione.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
<i>Bassa Entalpia</i>	< 90	< 125	< 100	≤ 150	≤ 190
<i>Media Entalpia</i>	90-150	125-225	100-200	-	-
<i>Alta Entalpia</i>	> 150	> 225	> 200	> 150	> 190

Tab.1 - Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°C). ((a) Muffler and Cataldi (1978), (b) Hochstein (1990), (c) Benderitter and Cormy (1990), (d) Nicholson (1993), (e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000))

1.1.3. Storia dello sviluppo della geotermia

Il rapporto uomo-geotermia ha origini antichissime, già dai primordi l'uomo si è confrontato con i fenomeni geotermici. Prove archeologiche attestano che gli indiani delle Americhe utilizzavano già 10.000 anni fa il calore delle sorgenti termali per cuocere cibi, scaldarsi e riprendere vigore dopo una battaglia. La frequentazione delle terme era inoltre una pratica molto diffusa nell'impero romano e ottomano perché nel tempo le località termali erano diventate veri e propri luoghi di culto. La curiosità di trovare una spiegazione al fenomeno fece maturare l'approccio razionale. L'osservazione dei vulcani, delle sorgenti termali, delle fumarole aveva fatto immaginare che alcune parti interne della terra fossero calde. Questi fenomeni sono generati dalla risalita superficiale dei fluidi geotermici ad alte temperature, costituiti prevalentemente da acqua meteorica penetrata nel sottosuolo nel corso di centinaia di migliaia di anni che si è riscaldata a contatto con rocce calde e permeabili.

Soltanto nel sedicesimo e diciassettesimo secolo, quando furono scavate le prime miniere profonde, ci si rese conto che la temperatura aumentava con la profondità. Dal 1870 il regime geotermico è stato studiato con metodi scientifici moderni, ma soltanto nel ventesimo secolo, dopo la scoperta del ruolo svolto dal calore radiogenico, è stato possibile comprendere pienamente fenomeni come il bilancio termico della Terra e ricostruire la storia termica del nostro pianeta. Tutti i modelli termici della Terra, infatti, devono tener conto del calore prodotto in continuazione dal decadimento degli isotopi radioattivi a lunga vita dell'uranio, del torio e del potassio, presenti nell'interno del globo terrestre. A quella radiogenica, si aggiungono, in proporzioni non esattamente definite, altre fonti di calore, come il calore primordiale del pianeta. Comunque, teorie e modelli termici realistici non sono stati disponibili sino agli anni '80, quando è stato dimostrato che non c'è equilibrio tra il calore prodotto dal decadimento degli isotopi radioattivi presenti nell'interno della Terra ed il calore disperso dalla sua superficie verso lo spazio, e che il nostro pianeta si sta lentamente raffreddando.

Per dare un'idea della grandezza dei fenomeni di cui si parla, si può fare riferimento al bilancio termico di (Stacey e Loper 1988)[12], nel quale il flusso di calore totale dalla superficie terrestre è valutato $42 \cdot 10^{12} \text{W}$ (conduzione, convezione e radiazione). Di questa grandezza, $8 \cdot 10^{12} \text{W}$ provengono dalla crosta terrestre, che rappresenta soltanto il 2% del volume totale della Terra, ma è ricca di isotopi radioattivi, $32,3 \cdot 10^{12} \text{W}$ derivano dal mantello, che è l'82% del volume totale della Terra, e $1,7 \cdot 10^{12} \text{W}$ provengono dal nucleo, che costituisce il 16% del volume totale del pianeta

e non contiene isotopi radioattivi. Poiché il calore radiogenico del mantello è stimato in $22 \cdot 10^{12} \text{W}$, il raffreddamento di questa parte della Terra è $10,3 \cdot 10^{12} \text{W}$. Calcoli più recenti, basati su un numero maggiore di dati, hanno portato ad un valore del flusso di calore totale dalla superficie del 6% più alto di quello utilizzato da Stacey e Loper, modificando leggermente le conclusioni di questi ultimi.

Il raffreddamento del pianeta, comunque, è molto lento. La temperatura del mantello è scesa, al più, di $300\text{-}350^\circ\text{C}$ in tre miliardi di anni e, alla sua base, è di circa 4000°C . È stato stimato che il calore totale contenuto nella Terra, assumendo una temperatura superficiale media di 15°C , sia dell'ordine di $126 \cdot 10^{23} \text{MJ}$ e che quello contenuto nella crosta sia dell'ordine di $5,4 \cdot 10^{21} \text{MJ}$ (Armstead, 1983)[13]. L'energia termica della Terra è quindi enorme, ma soltanto una parte di essa può essere sfruttata. Sino ad oggi, l'utilizzazione di questa energia è stata limitata a quelle aree nelle quali le condizioni geologiche permettono ad un vettore (acqua in fase liquida o vapore) di trasportare il calore dalle formazioni calde profonde alla superficie o vicino ad essa, formando quelle che chiamiamo risorse geotermiche. Nuove vie potrebbero però essere aperte in un futuro prossimo da metodi innovativi e tecnologie d'avanguardia, alcuni già in fase di sperimentazione.

In numerosi settori, soprattutto in passato, la pratica ha spesso preceduto la teoria. Molte risorse, tra queste anche quelle geotermiche, sono state sfruttate, all'inizio, senza conoscerne esattamente la natura e solo in un secondo momento sono state studiate scientificamente e ne è stata sviluppata la tecnologia. I fluidi geotermici erano già utilizzati, per il loro contenuto energetico, nella prima parte del diciannovesimo secolo. (Fig.6)

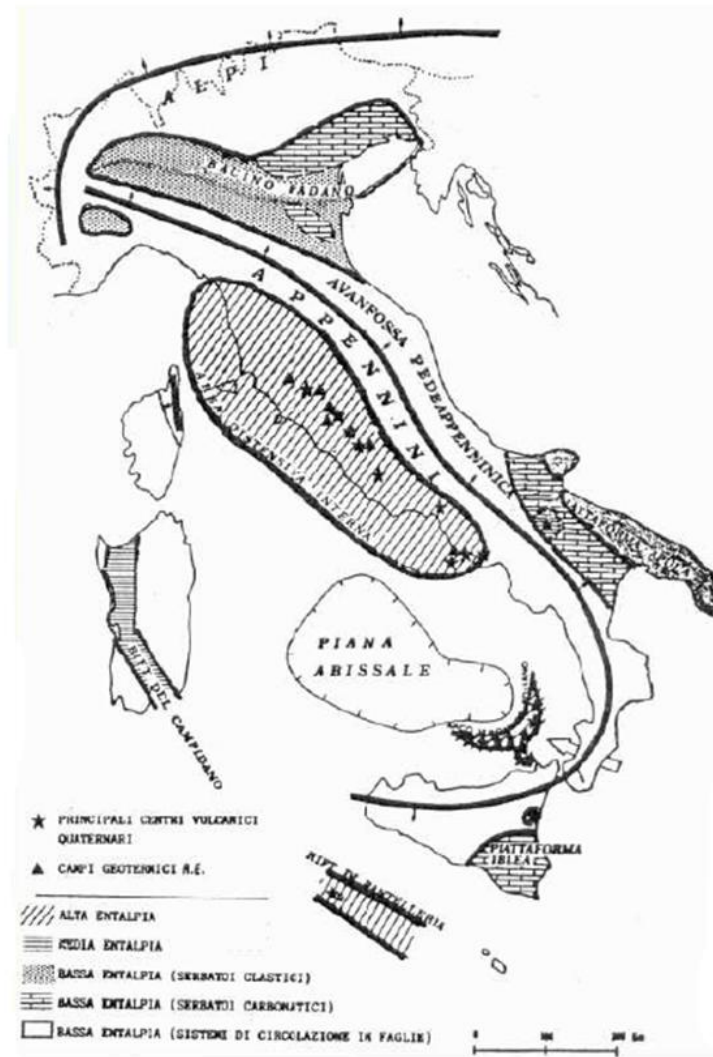


Fig.6 - Carta delle potenzialità geotermiche italiane (consiglio nazionale geologi.it)

In quel periodo, nella zona che poi ha avuto il nome di Larderello (Toscana), era stata costruita una piccola industria chimica per estrarre l'acido borico dalle acque calde boriche, che sgorgavano naturalmente dal suolo o erano estratte da pozzi di piccola profondità. L'acido borico era ottenuto facendo evaporare le acque calde ricche di boro in bollitori metallici, usando, come combustibile, il legname ricavato dei boschi vicini. Nel 1827 Francesco Larderel, proprietario di questa industria, ideò un sistema per sfruttare il calore degli stessi fluidi borici nel processo di evaporazione, invece di bruciare il legname dei boschi, che si andavano esaurendo rapidamente. Nello stesso periodo si cominciò anche ad utilizzare l'energia meccanica del vapore naturale. Questo venne usato per sollevare l'acqua in semplici sistemi a gas lift e, in seguito, per il funzionamento di pompe ed argani impiegati nelle operazioni di perforazione o nell'industria dell'acido borico. L'industria chimica di Larderello detenne, tra il 1850 ed il 1875, il monopolio della produzione dell'acido borico in Europa. Nella medesima area geotermica, tra il 1910 ed il 1940, si avviò, ampliandosi progressivamente, l'utilizzazione del vapore a bassa pressione per il riscaldamento di edifici residenziali ed industriali, e di serre.

Mentre questo accadeva in Italia, anche in altri paesi si sviluppava l'utilizzazione industriale dell'energia geotermica: nel 1892 a Boise (Idaho, USA) veniva inaugurato il primo sistema di riscaldamento urbano; nel 1928 l'Islanda, un altro paese all'avanguardia nell'utilizzazione di questa fonte energetica in Europa, cominciò a sfruttare i fluidi geotermici, soprattutto acqua calda, per il riscaldamento di edifici. Il primo tentativo di produrre elettricità dall'energia contenuta nel vapore geotermico è stato fatto a Larderello nel 1904. Il successo di questo esperimento mostrò il valore industriale dell'energia geotermica e segnò l'inizio di una forma di sfruttamento, che è ora diffuso in molti paesi.

La produzione di elettricità a Larderello fu un successo commerciale, oltre che della tecnica, tanto che, nel 1942, la potenza geotermoelettrica installata aveva raggiunto 127.650 kW. Successivamente l'esempio italiano fu seguito da numerosi altri paesi.

Dopo la seconda guerra mondiale, che portò alla distruzione quasi totale di tutte le centrali e gli impianti chimici, molti paesi furono attratti dall'energia geotermica, considerandola competitiva rispetto ad altre forme di energia ma anche perché aveva un costo inferiore rispetto alle altre forme energetiche.

In (Fig.7) c'è la descrizione dell'andamento dell'energia geotermica mondiale dal 1980 al 2023. Negli ultimi quarant'anni la capacità installata è cresciuta da circa 2,1 GW a oltre 16 GW, con un aumento di quasi 8 volte dal 1980 al 2023. La produzione elettrica geotermica mondiale è passata da circa 13.100 GWh a quasi 97.000 GWh, seguendo un trend di crescita costante, ma moderato rispetto ad altre rinnovabili (ad esempio solare ed eolico), in parte per le sfide tecniche e di investimento legate alla geotermia.

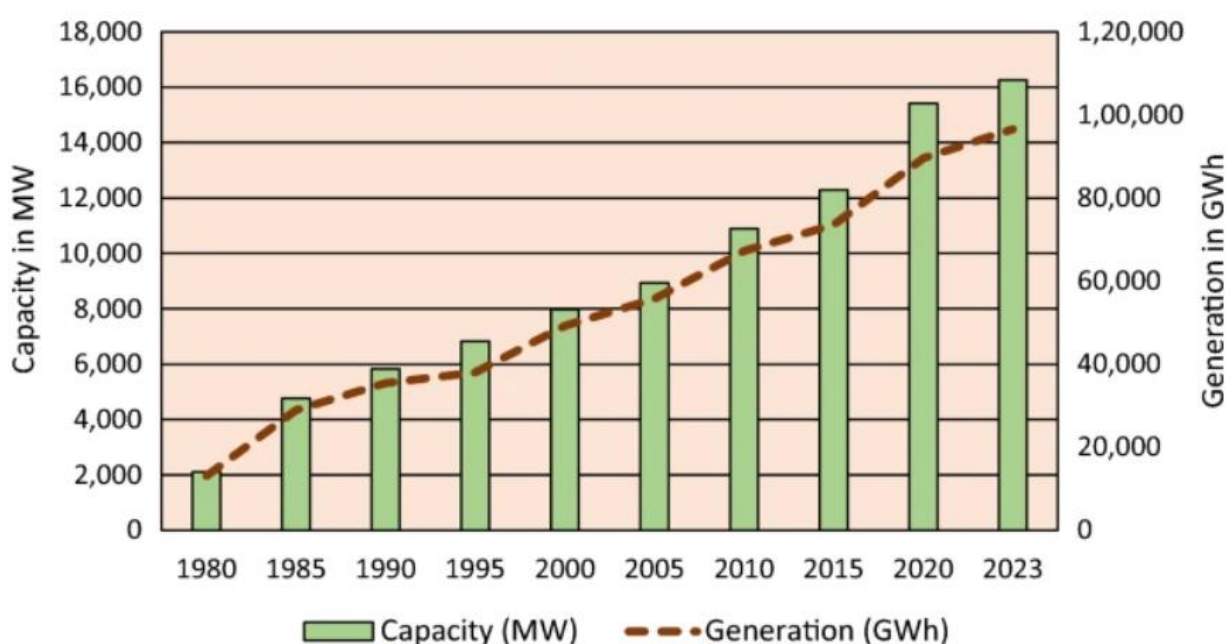


Fig.7 - Sviluppo negli anni dell'energia geotermica Gutiérrez-Negrín (2024)

Negli ultimi anni in Italia si sta affermando un notevole interesse per la realizzazione di impianti di climatizzazione per edifici attraverso l'energia geotermica a bassa entalpia. Ancora oggi Larderello produce il 10% dell'energia geotermica mondiale, dando energia ad un milione di case italiane. Sebbene questa tecnologia si sia consolidata e dif-

fusa in molti paesi occidentali, le metodologie di posa in opera, le modalità di trasferimento del calore e le proprietà dei materiali impiegati presentano ancora numerose incertezze.

Negli anni il settore geotermico italiano ha visto uno sviluppo costante soprattutto nel XX secolo, ma con una crescita modesta rispetto ad altre fonti rinnovabili. Nel 2023 l'Italia contava circa 34 impianti con una capacità installata di circa 915 MW e una produzione annua di circa 5,7 TWh di energia elettrica, corrispondente a circa 1,6-2 % della produzione elettrica nazionale e a una quota significativa della generazione rinnovabile locale, soprattutto in Toscana. (Ministero dell'Ambiente e della sicurezza Energetica). Negli ultimi decenni la geotermia elettrica in Italia è rimasta relativamente stabile in capacità installata, con pochi nuovi impianti aggiunti e un livello di produzione che varia leggermente anno su anno in funzione degli sviluppi tecnici e operativi, parallelamente vi è una crescita delle applicazioni geotermiche per usi diretti (come teleriscaldamento, impianti termali, pompe di calore geotermiche), anche se queste sono ancora meno diffuse rispetto ad altri paesi europei. Nonostante la stabilità negli impianti esistenti, si evidenzia che l'Italia possiede un potenziale geotermico molto più ampio rispetto all'attuale sfruttamento, con progetti di sviluppo in fase di proposta che potrebbero portare a una capacità installata molto maggiore entro il 2040 se sostenuti da politiche adeguate e iter autorizzativi semplificati.

Inoltre, ricerche e analisi economiche suggeriscono che la geotermia potrebbe contribuire in modo significativo alla decarbonizzazione del sistema energetico nazionale, coprendo una parte rilevante del fabbisogno elettrico e termico futuro.

Passando all'Europa, secondo una classificazione recentemente proposta, il territorio europeo può essere diviso in maniera approssimata in 4 aree:

- Aree molto buone: con le migliori prospettive di sviluppo per la produzione geotermoelettrica e copre circa lo 0,2% del territorio europeo ovvero Antille Francesi, Islanda, Azzore (Portogallo), Canarie (Spagna), estremo est della Russia, la fascia preappenninica toscana-laziale, dove si trovano i campi di Larderello, isole Eolie, isole dell'Egeo e Anatolia occidentale.
- Aree buone: circa il 2,3% del territorio e comprende il Massiccio Centrale della Francia, Graben del Reno in Germania, il Campidano in Sardegna, il bacino Pannoniano (Ungheria e Romania), l'isola di Lesbo (Grecia) e la Siberia Orientale.
- Aree moderate: per un ulteriore 12,5%
- Aree povere: il rimanente 85%

Dopo dettagliate ricerche e in base alle più aggiornate conoscenze delle caratteristiche litologiche delle rocce presenti nel sottosuolo, sono stati avviati progetti dimostrativi che hanno rivelato la possibilità di estrarre energia geotermica dal calore delle rocce che non contengono acqua (hot dry rock), perché impermeabili. Sono rocce che si ritrovano comunemente a varie profondità e che possono essere fratturate artificialmente per diventare permeabili e diventare così veri e propri serbatoi geotermici.

La tecnica è estremamente semplice. Con una perforazione si raggiunge la roccia calda da fratturare mediante l'iniezione di acqua a forti pressioni. Si crea così un serbatoio in cui viene pompata acqua fredda che si scalderebbe circolando nelle rocce calde. Con un altro pozzo l'acqua calda e il vapore prodotto raggiungeranno la superficie e saranno utilizzati per produrre calore o elettricità.

In Norvegia, a Oslo, la compagnia Rock Energy ha lanciato un progetto pilota che esplorerà la possibilità di creare impianti geotermici a 5000 metri di profondità alla temperatura di 200°C con l'obiettivo di contribuire al quadro di

sviluppo geotermico europeo creando campi geotermici artificiali. Questo particolare sistema, chiamato EGS (Enhanced Geothermal System), sul quale investe anche Google rende possibile catturare energia dalla crosta terrestre in qualsiasi punto del globo, anche in zone non vulcaniche o comunque prive di serbatoi geotermici.

L'utilizzo di CO₂ nei Sistemi Geotermici Avanzati (EGS) — noto anche come CO₂ Plume Geothermal (CPG), prevede l'iniezione di anidride carbonica nel sottosuolo non solo per estrarre calore, ma anche per stoccarla permanentemente. Questo approccio a ciclo chiuso converte il fluido termovettore, unendo la produzione di energia alla cattura e allo stoccaggio del carbonio. La CO₂ viene catturata da fonti industriali e iniettata nel sottosuolo (a profondità comprese tra i 2 e 4 km dove viene riscaldata naturalmente dalle rocce roventi, successivamente la CO₂ surriscaldata sale in superficie, (il fluido caldo circola naturalmente senza bisogno di pompe esterne), e aziona una turbina per generare elettricità. Il gas viene raffreddato, condensato e reiniettato nel circuito, rimanendo intrappolato permanentemente nel sottosuolo

Il successo di un progetto di questo tipo potrebbe rivoluzionare completamente il sistema attuale di approvvigionamento energetico.

1.2. Meccanismi di propagazione del calore nel sottosuolo

Il calore viene definito in termodinamica come quella forma di energia che si propaga, attraverso i confini di un sistema, in conseguenza di una differenza di temperatura. Il carattere energetico del calore viene stabilito dal primo principio della termodinamica, mentre il senso della sua spontanea propagazione, nella direzione delle temperature decrescenti, è indicato dal secondo principio. La termodinamica classica inoltre permette di valutare la quantità complessiva di calore scambiato durante un processo in cui un sistema passa da uno stato di equilibrio a un altro. La trasmissione del calore si occupa dello studio dei fenomeni che accompagnano la propagazione del calore, e il calcolo dei valori del flusso termico. Questa scienza riguarda la descrizione dei meccanismi di propagazione termica mediante appropriate relazioni sia teoriche che empiriche, tra il flusso termico, i parametri del sistema (geometria, proprietà fisiche, portate, ecc.), e le condizioni termiche dell'ambiente.

Alla base delle analisi di trasmissione del calore, oltre ai due principi della termodinamica, vi sono le leggi di conservazione della massa e della quantità di calore e le relazioni di trasmissione appropriate allo specifico problema. Queste ultime, sono fondamentalmente costituite dalle leggi di Fourier, di Newton e di Stefan-Boltzman, in riferimento rispettivamente ai tre meccanismi in cui i fenomeni di trasmissione del calore possono essere classificati: conduzione, convezione e irraggiamento. La conduzione e l'irraggiamento sono meccanismi fisici fondamentali, mentre la convezione è in realtà un processo combinato dovuto alla conduzione (e irraggiamento) e al movimento delle particelle fluide. L'advezione invece è una forma speciale di convezione, in cui il calore risale con le rocce a causa di eventi tettonici, erosione o rimbalzo post-glaciale.

1.2.1. Principi della termodinamica e le leggi della conservazione

Il primo e il secondo principio della termodinamica posso essere formulati in riferimento al concetto di sistema (definita quantità di materia limitata da una superficie chiusa reale e/o immaginaria) e al concetto di volume di controllo (definita come regione dello spazio il cui confine è attraversato dai flussi di massa, di energia e di quantità di moto). Il primo principio stabilisce che la variazione nel tempo τ dell'energia totale (E) di un sistema è uguale alla somma

degli scambi di calore (Q) e lavoro (L) effettuati dal sistema con l'ambiente circostante nello stesso tempo. Si fa riferimento alla convenzione di ritenere positivo il calore ricevuto dal sistema e negativo il calore fatto su di esso, la precedente formulazione si esprime:

$$\frac{dE}{d\tau} = \frac{\delta Q}{d\tau} - \frac{\delta L}{d\tau} \quad (1.1)$$

In molte applicazioni lo scambio termico riguarda sistemi con baricentro fermo e lavoro scambiato trascurabile. Per essi la precedente formula diventa:

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{\delta Q}{d\tau} = q \quad (1.2)$$

Essendo U l'energia interna del sistema e q il flusso termico scambiato. Per un generico volume di controllo V , delimitato da una superficie S , l'espressione del primo principio, in condizioni di regime permanente, a basse velocità e in assenza di componenti di lavoro può essere scritta più convenientemente nella forma:

$$-\int_{(c.s)} q'' \cdot \mathbf{n} dA = \int_{(c.s)} h_p V \cdot \mathbf{n} dA \quad (1.3)$$

che è la base della maggior parte delle analisi di scambio termico. Il termine a primo membro rappresenta il flusso scambiato attraverso la superficie di controllo, essendo q'' il vettore flusso termico per unità di superficie ed $\mathbf{n}$ il vettore unitario normale alla stessa, diretto verso l'esterno; il segno negativo deriva dalla convenzione usualmente adottata per il segno degli scambi di calore e lavoro. Il termine a secondo membro rappresenta il flusso energetico convettivo, essendo $h = u + p\rho$ l'entalpia per unità di massa del fluido entrante o uscente dal volume di controllo, u la sua energia interna specifica; con V si indica il vettore velocità e con ρ la densità. Mentre il primo principio esprime l'idea della conservazione dell'energia, il secondo principio della termodinamica permette di definire la direzione di evoluzione dei flussi spontanei. Esso si esprime attraverso l'introduzione di una funzione di stato denominata entropia (S) che interviene nella relazione fondamentale:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (1.4)$$

secondo cui, in un qualunque processo, la variazione entropica del sistema è maggiore o uguale (processi reversibili) al rapporto tra il calore scambiato δQ e la temperatura attuale T della porzione di confine del sistema attraverso cui avviene lo scambio.

La variazione di entropia nel tempo sarà conseguentemente maggiore o uguale al rapporto tra flusso termico scambiato e la temperatura T prima definita:

$$\frac{dS}{d\tau} \geq \frac{1}{T} \frac{\delta Q}{d\tau} \quad (1.5)$$

In riferimento a un volume di controllo, si può esprimere la precedente disuguaglianza nella forma:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{(c.v)} s \rho dv + \int_{(c.s)} s \rho V \cdot \mathbf{n} dA \geq - \int_{(c.s)} \frac{q'' \cdot \mathbf{n}}{T} dA \quad (1.6)$$

in cui s è l'entropia per unità di massa. Introducendo la produzione entropica per unità di tempo $\sigma_{(c.v)}$, dovuta ai fenomeni di irreversibilità presenti nel volume di controllo, il bilancio entropico in condizioni di regime stazionario si può esprimere:

$$\int_{(c.s)} s \rho V \cdot \mathbf{n} dA \geq - \int_{(c.s)} \frac{q'' \cdot \mathbf{n}}{T} dA + \sigma_{(c.v)} \quad (1.7)$$

Nelle applicazioni in cui sono presenti processi di trasmissione del calore, le prestazioni più efficienti dei sistemi corrispondono alle condizioni di minima produzione di entropia; in altri termini, la potenza utile dissipata è direttamente proporzionale alla produzione di entropia per unità di tempo durante il processo. Le leggi di conservazione della massa e della quantità di moto che occorre considerare per un'analisi generale di trasmissione del calore, possono anch'esse essere precisate in riferimento sia al sistema chiuso, sia al volume di controllo. La legge di conservazione della massa stabilisce, che in assenza di conversioni massa/energia, la massa m di un sistema chiuso rimane costante:

$$\frac{dm}{d\tau} = 0 \quad (1.8)$$

ovvero $m=\text{cost}$ In riferimento ad un volume di controllo, la conservazione della massa può esprimersi secondo la:

$$\frac{\partial m_{(c.v)}}{\partial \tau} = m_e - m_u \quad (1.9)$$

in cui $m_{(c.v)}$ rappresenta la massa attuale presente nel volume di controllo e m_e e m_u le portate istantanee in entrata e in uscita dallo stesso volume. In termini generali la precedente formula si può scrivere nella forma.

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{(c.v)} \rho dv = - \int_{(c.s)} \rho V \cdot n dA \quad (2.0)$$

In condizione di regime stazionario le equazioni precedenti si riducono a stabilire l'uguaglianza della portata in entrata e in uscita dal volume di controllo. La legge di conservazione della quantità di moto, o seconda legge di Newton, esprime l'uguaglianza tra la risultante delle forze agenti sul sistema e il valore istantaneo della variazione nel tempo della sua quantità di moto (lineare). Per un sistema soggetto a forze di risultante F , si può scrivere:

$$F = \frac{dM}{d\tau} \quad (2.1)$$

Essendo M la quantità di moto del sistema. Con riferimento a un volume di controllo, la precedente assume la forma:

$$F = \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{(c.v)} \rho V dv + \int_{(c.s)} V \rho V \cdot n dA \quad (2.2)$$

In questi termini la legge di conservazione della quantità di moto stabilisce che la risultante delle forze agenti sul volume considerato è uguale al valore istantaneo della variazione nel tempo della quantità di moto del volume di controllo, più il flusso netto della quantità di moto associata alla massa che attraversa la superficie limitante lo stesso volume. In condizioni di regime permanente la assume la forma:

$$F = \int_{(c.s)} V \rho V \cdot n dA \quad (2.3)$$

1.2.2. Termogeologia

La temperatura sulla superficie della terra è determinata da un equilibrio tra l'energia solare radiante, la radiazione termica nello spazio, il flusso di calore geotermico e le eventuali interferenze tra questi fattori (Fig.8). A causa del basso calore che scorre dall'interno della terra ($0,05 - 0,12 \text{ Wm}^{-2}$ rispetto alle radiazioni solari che arrivano fino a 1000 Wm^{-2}) il contributo all'equilibrio energetico sulla superficie è piuttosto scarso. Ogni volta che lo stato naturale viene modificato dalla sottrazione o dall'apporto di calore, il deficit o surplus termico deve essere riequilibrato con

un pari apporto di calore. Il trasporto di calore attraverso la conduzione e convezione (l'irraggiamento viene ignorato nel sottosuolo) si alimenta da tutte le fonti disponibili. Appare anche evidente che il contributo del flusso di calore geotermico al bilanciamento termico complessivo del sottosuolo, varia di molto con la profondità.

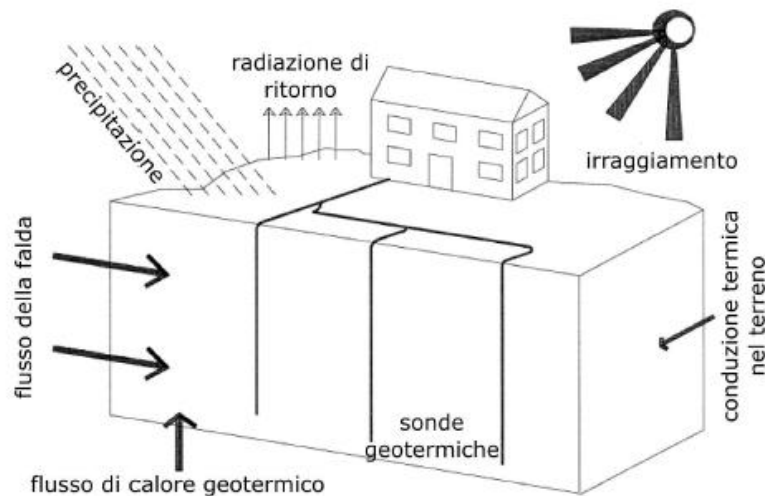


Fig.8 - Regime termico del sottosuolo in un sistema a bassa entalpia (Ordine dei Geologi)

Nel caso di impianti vicino alla superficie ad una profondità compresa tra 10-20 m, l'energia utilizzata per uguagliare il deficit o surplus termico consiste quasi esclusivamente nella radiazione solare e nella percolazione dell'acqua, così l'influenza del gradiente geotermico può essere ignorata. Solo a profondità comprese tra 20 -100 m si può osservare un importante contributo di questo gradiente che non può più essere trascurato. Il sottosuolo può essere quindi paragonato ad un enorme deposito di calore, che viene riscaldato durante l'estate per poi essere sfruttato opportunamente durante l'inverno, in quanto la maggior parte delle terre sono a base di silicati che possiedono un enorme potenziale per immagazzinare calore. Inoltre hanno una conduttività termica modesta: sufficiente a non far dissipare velocemente quanto immagazzinato e a permetterne il prelievo attraverso scambiatori di calore ben progettati. Ne deriva che conduttività termica e calore specifico sono due proprietà termogeologiche fondamentali, che vengono valutate da dati opportunamente tabulati per il dimensionamento di impianti residenziali. Invece nelle grandi installazioni oltre a queste tabelle si realizzano delle specifiche misure in sito e/o in laboratorio, perché una stima eccessiva può comportare costosi ed inutili sovradimensionamenti, mentre una sottovalutazione può compromettere il funzionamento dell'impianto.

Proprietà termofisiche del terreno

Conduttività termica

La conduzione di calore attraverso un corpo è regolata dalla legge di Fourier che oltre ad introdurre il concetto di gradiente termico come la mancanza di equilibrio termico e la conseguente trasmissione di calore per contrastarla, presenta il coefficiente di conducibilità o conduttività termica funzione della temperatura e tipica del materiale. Quindi questo coefficiente descrive l'abilità di trasferire calore attraverso la conduzione.

$$Q = \lambda S \frac{dT}{dz} \quad (2.4)$$

dove: Q è il flusso di calore; S è l'area della sezione in m^2 ; T è la temperatura in $^{\circ}C$ o K ; z è la profondità in m , perciò $\frac{dT}{dz}$ è il gradiente di temperatura nel suolo; λ è la conducibilità termica delle terre in $Wm^{-1}K^{-1}$ ovvero la quantità di calore che passa nell'unità di tempo attraverso una sezione unitaria di suolo in risposta a uno specifico gradiente di temperatura.

La conducibilità termica è quindi una misura dell'attitudine del suolo a favorire la propagazione del calore, dipende dalla porosità, umidità, contenuto di materia organica. Per quanto concerne i terreni, già nella seconda metà del XIX secolo, si era cominciato a misurarla:

- nel 1860 Thompson e altri avevano fatto le prime determinazioni della diffusività e conducibilità termica dei sedimenti e dei terreni;
- nel 1870 i professori dell'attuale università di Newcastle e Tyne presentarono una serie di determinazioni di conducibilità termica delle rocce.

Calore specifico e Capacità termica

Il calore specifico può essere calcolato secondo la massa C_s o il volume C_v . La quantità di energia che si deve fornire per innalzare di un grado la temperatura di un kg di suolo, viene definita con il termine di calore specifico C_s ed è misurata in $JK^{-1}Kg^{-1}$ mentre la quantità di energia che si deve fornire per innalzare di un grado la temperatura di un volume unitario di suolo $JK^{-1}m^{-3}$ è definita come C_v . In generale il calore specifico è la capacità di qualsiasi mezzo, sia esso solido, liquido o gas, di accumulare calore. L'acqua per esempio ha un calore specifico particolarmente elevato che si attesta in $4180JK^{-1}Kg^{-1}$ a $20^{\circ}C$; molti sedimenti invece hanno un calore specifico di $800JK^{-1}Kg^{-1}$. Questo significa che se una massa di $1kg$ di roccia si raffredda di $2^{\circ}C$ allora si perdono:

$$m S_c \Delta T = 1 \cdot 800 \cdot 2 = 1600 J \quad (2.5)$$

Dove il prodotto $m S_c$ è definito dalla fisica come capacità termica, ovvero il calore necessario, per far variare di $1K$ o equivalentemente $1^{\circ}C$, la temperatura del corpo stesso (è misurato in JK^{-1}). Nella pratica progettuale viene sovente adoperato il calore specifico volumetrico C_v , misurato in $JK^{-1}m^{-3}$ e definito in questo modo:

$$C_v = \rho S_c \quad (2.6)$$

Dove ρ è la densità del materiale in Kgm^{-3} . Per molti tipi di roccia S_{vc} è compreso tra $2,0- 2,4 MJK^{-1}m^{-3}$, così $1m^{-3}$ di roccia può rilasciare fino a $10 MJ$ di energia, semplicemente facendo scendere la sua temperatura di $4K$. Viceversa bisogna aggiungere un importo analogo di energia per far aumentare di $4K$ il medesimo metro cubo di materiale. Questo calore viene in definitiva immagazzinato come energia molecolare o cinetica. Il rapporto fra il calore specifico per unità di volume C_v e il calore specifico per unità di massa C_s è uguale alla densità apparente (o massa dell'unità di volume):

$$\rho = \frac{C_v}{C_s} \quad (2.7)$$

è misurata in Kgm^{-3} e varia da 800 (torba) a 1800 (sabbia compatta). Il calore specifico è funzione della temperatura ed in piccola parte della densità del materiale e del contenuto d'acqua (Tab.2), inoltre bisogna ricordare che una quantità addizionale di calore può essere conservata o ceduta da una sostanza durante il cambiamento di fase, questa quantità prende il nome di calore latente e tornerà utile quando si andrà a descrivere il funzionamento della pompa di calore.

<i>Tipologia di suolo</i>	<i>C_s</i>
<i>Suolo argilloso</i>	<i>840 JKg⁻¹K⁻¹</i>
<i>Suolo argilloso saturato con acqua al 50%</i>	<i>2090 JKg⁻¹K⁻¹</i>
<i>Suolo argilloso saturato con acqua al 100%</i>	<i>3350 JKg⁻¹K⁻¹</i>

Tab. 2 - Calore specifico al variare dell'umidità

Diffusività termica

Il coefficiente di diffusività termica α è definito dal rapporto tra conducibilità termica λ e calore specifico volumetrico, ovvero:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_v} \quad (2.8)$$

Si misura in m^2s^{-1} ed è una caratteristica intrinseca del corpo in quanto dipende esclusivamente da parametri relativi al materiale di cui è composto e varia in funzione del contenuto d'acqua e delle lavorazioni (Fig.9). Rappresenta la riluttanza di una sostanza a trasmettere il calore e dà informazioni su quanto rapidamente il calore si diffonde all'interno del corpo, può essere vista come l'analogo termico della viscosità cinematica.

Roccia	densità ρ 10^3 kg m^{-3}	conduttività termica λ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	calore specifico volumetrico S_{VC} $\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Rocce magmatiche			
basalto	$2,6 \div 3,2$	$1,3 \div 2,3$ (1,7)	$2,3 \div 2,6$
diorite	$2,9 \div 3,0$	$2,0 \div 2,9$ (2,6)	2,9
gabbro	$2,8 \div 3,1$	$1,7 \div 2,5$ (1,9)	2,6
granito	$2,4 \div 3,0$	$2,1 \div 4,1$ (3,4)	$2,1 \div 3,0$
peridotite	3,0	$3,8 \div 5,3$ (4,0)	2,7
riolite	$\simeq 2,6$	$3,1 \div 3,4$ (3,3)	2,1
Rocce metamorfiche			
gneiss	$2,4 \div 2,7$	$1,9 \div 4,0$ (2,9)	$1,8 \div 2,4$
marmo	$2,5 \div 2,8$	$1,3 \div 3,1$ (2,1)	2,0
metaquarzite	$\simeq 2,7$	$\simeq 5,8$ (5,8)	2,1
micascisto	$\simeq 2,6$	$1,5 \div 3,1$ (2,0)	2,2
argilloscisto	2,7	$1,5 \div 2,6$ (2,1)	$2,2 \div 2,5$
Rocce sedimentarie			
calcare	$2,6 \div 2,7$	$2,5 \div 4,0$ (2,8)	$2,1 \div 2,4$
marna	$2,5 \div 2,6$	$1,5 \div 3,5$ (2,1)	$2,2 \div 2,3$
quarzite	$\simeq 2,7$	$3,6 \div 6,6$ (6,0)	$2,1 \div 2,2$
alite	$2,1 \div 2,2$	$5,3 \div 6,4$ (5,4)	1,2
arenaria	$2,2 \div 2,7$	$1,3 \div 5,1$ (2,3)	$1,6 \div 2,8$
antracite	—	$0,3 \div 0,6$ (0,3)	$1,3 \div 1,8$
siltite	$2,5 \div 2,6$	$1,1 \div 3,5$ (2,2)	$2,1 \div 2,4$
Terreni non consolidati			
ghiaia (asciutta)	$2,7 \div 2,8$	$0,4 \div 0,5$ (0,4)	$1,4 \div 1,6$
ghiaia (satura d'acqua)	$\simeq 2,7$	$\simeq 1,8$ (1,8)	$\simeq 2,4$
morena	—	$1,0 \div 2,5$ (2,0)	$1,5 \div 2,5$
sabbia (asciutta)	$2,6 \div 2,7$	$0,3 \div 0,8$ (0,4)	$1,3 \div 1,6$
sabbia (satura d'acqua)	$2,6 \div 2,7$	$1,7 \div 5,0$ (2,4)	$2,2 \div 2,9$
argilla (asciutta)	—	$0,4 \div 1,0$ (0,5)	$1,5 \div 1,6$
argilla (satura d'acqua)	—	$0,9 \div 2,3$ (1,7)	$1,6 \div 3,4$
torba	—	$0,2 \div 0,7$ (0,4)	$0,5 \div 3,8$
Altre sostanze			
bentonite	—	$0,5 \div 0,8$ (0,6)	$\simeq 3,9$
calcestruzzo	$\simeq 2,0$	$0,9 \div 2,0$ (1,6)	$\simeq 1,8$
ghiaccio (a -10°C)	0,919	2,32	1,87
plastica (PE)	—	0,39	—
aria ($0 \div 20^\circ\text{C}$, secca)	0,0012	0,02	0,0012
acciaio	7,8	60	3,12
acqua ($+10^\circ\text{C}$)	0,999	0,59	4,15

Fig.9 - Conduttività termica e calore specifico volumetrico del sottosuolo alla temperatura di 20°C VDI 2000

Densità di flusso di calore nel suolo

La densità del flusso di calore nel suolo (G) è la conduzione di energia per unità di superficie in risposta a un gradiente di temperatura. Per piccole variazioni

$$G \approx -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

Tuttavia non è possibile misurare accuratamente il gradiente di temperatura se non c'è sufficiente distanza fra i sensori, pertanto G è stimato come

$$G \approx -\lambda \left(\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \right) \quad (2.9)$$

dove la distanza fra z_2 e z_1 è tale da consentire di misurare una differenza fra T_2 e T_1 . L'equazione assume che λ sia costante con la profondità nel suolo. La densità di flusso di calore nel suolo è positiva quando il flusso è rivolto verso il basso (Fig.10). Quando $\Delta G = G_2 - G_1$ è positivo, allora una maggiore quantità di calore sta lasciando gli strati più profondi rispetto alla quantità di calore che sta arrivando agli strati superficiali e il suolo si sta raffreddando. Se

$\Delta G = G_2 - G_1$ è negativo, allora una maggiore quantità di calore arriva alla superficie rispetto a quella che lascia la superficie e il suolo si sta riscaldando.

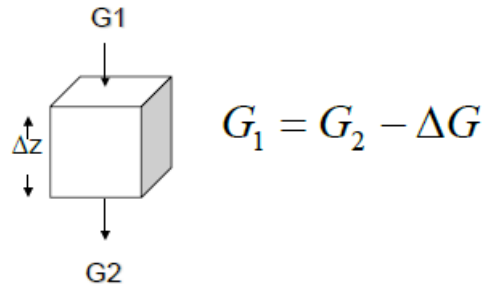


Fig.10 - Gradiente termico

Variazione nel calore immagazzinato

La variazione netta di calore immagazzinato per unità di tempo ($\Delta Q/\Delta t$) in Js^{-1} in un volume di suolo (V) è dato da:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = c_v \frac{\partial T}{\partial t} \cdot V \approx c_v \frac{T_f - T_i}{t_f - t_i} V \quad (3.0)$$

dove T_f è la temperatura finale al tempo t_f e T_i è la temperatura iniziale al tempo t_i . Poiché la variazione nella densità di flusso di calore nel suolo (ΔG) è uguale al tasso netto di calore

immagazzinato diviso per la superficie di suolo e $V/A = \Delta z$, possiamo calcolare ΔG in Wm^{-2} :

$$\Delta G = -\frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{1}{A} = -c_v \left(\frac{T_f - T_i}{t_f - t_i} \right) \frac{V}{A} = -c_v \left(\frac{T_f - T_i}{t_f - t_i} \right) \Delta z \quad (3.1)$$

Il segno negativo è necessario perché ΔG è negativo quando il suolo si sta scaldando, se G_2 è misurato e ΔG è calcolato, allora G alla superficie è:

$$G_1 = G_2 - \Delta G = G_2 + c_v \left(\frac{T_f - T_i}{t_f - t_i} \right) \Delta z \quad (3.2)$$

Misurazioni

Stabilire le proprietà termiche del sottosuolo non è un'impresa facile, perché, oltre a variare nel tempo, cambiano anche in relazione all'utilizzo della sonda geotermica. Inoltre la terra, essendo un mezzo trifase (solido, liquido e aeriforme), viene influenzata anche dai seguenti fattori:

- Densità, se aumenta, migliora il contatto tra i grani e quindi la conduttività termica del mezzo poroso aumenta. In genere la resistività di un terreno a grana grossa è maggiore di quella di un terreno a grana fine, a parità di contenuto di umidità. Inoltre i suoli rocciosi poi hanno conduttività superiore a quella dei terreni sabbiosi e argillosi.
- Contenuto d'acqua, dal momento che la conducibilità dell'acqua è quasi 30 volte superiore a quella dell'aria, un terreno che aumenta il contenuto d'acqua a discapito dell'aria migliora di conseguenza la propria conducibilità.
- Compattamento del terreno ha un effetto benefico sulla resistività. La sua determinazione però è alquanto problematica, perché oltre a variare nel tempo, è influenzata dalla piovosità, dall'evaporazione, dalla vege-

tazione e dalle differenze di temperatura presenti nel terreno (tende a spostarsi dove il terreno è più freddo).

Si deve quindi procedere ad una vera e propria modellazione del comportamento termico del sottosuolo che può effettuarsi mediante metodi analitici (empirici o derivati da modelli cinematici) e misure dirette in laboratorio o in sito (a regime stazionario o variabile). Fra i metodi a regime stazionario si utilizza l'ASTM E1530, standard per i test di laboratorio, che permette di misurare e confrontare le proprietà termiche di diversi materiali in condizioni controllate e la loro capacità di mantenere i necessari livelli di conducibilità termica, richiede però tempi molto lunghi per essere eseguito. Mentre fra quelli a regime variabile il più noto è quello della sonda termica o (ago) termico che permette di valutare la conduttività termica del terreno in modo rapido e conveniente, misurando il gradiente dell'aumento di temperatura di un ago inserito nel terreno da analizzare che emette energia termica con flusso costante. Tuttavia il metodo universalmente utilizzato, per la stima delle proprietà termiche in un campo sonde, è il Ground Response Test (GRT) che permette in cantiere di ottenere misure affidabili in tempi ragionevoli e con costi non eccessivi.

Il test fornisce un'informazione reale sulle effettive condizioni termiche del sottosuolo, dove si va ad installare il sistema.

1.2.3. Trasmissione del calore nel terreno

Restano ora da approfondire i meccanismi che assicurano al suolo di assorbire o cedere calore ed il modo in cui si forza il calore a trasferirsi in zone in cui sia più facile estrarlo o reintrodurlo. Il calore si trasmette quando tra due corpi vi è un contatto diretto o attraverso altri corpi. Esistono tre meccanismi principali che operano in presenza di un salto termico tra sistema e ambiente o all'interno dello stesso sistema e sono i seguenti:

- conduzione;
- convezione;
- irraggiamento

Nell'ambiente sottosuolo, soprattutto a limitate profondità, la conduzione attraverso i minerali o i fluidi nei pori e la convezione attraverso l'acqua di falda sono i due più importanti dispositivi di flusso di calore. In particolare la conduzione interessa la parte solida e liquida del suolo, dal momento che la conduttività termica dell'aria presente nei vuoti è molto bassa. La convezione dà un contributo importante quando si instaurano rapide infiltrazioni d'acqua e/o si è in presenza di un non trascurabile moto di falda. Il calore latente del vapore acqueo poi contribuisce in modo significativo alla trasmissione del calore nei suoli lontani dalla saturazione, così come nei cicli di gelo/disgelo del terreno. In alcuni casi anche l'irraggiamento può essere preso in considerazione, soprattutto nei suoli secchi ad alte temperature (*Basta e Minchio, 2007*)[14].

Conduzione

Il calore si trasmette in un solido, liquido o gas, attraverso processi di interazione molecolare, ovvero si manifesta come una diffusione di uno stato di agitazione molecolare, da un punto ad un altro. Quando si raggiunge l'equilibrio allora la temperatura è uguale in tutti i punti. Il processo è regolato dalla equazione di Fourier e la conduttività descrive l'abilità del materiale a condurre il calore. La conducibilità termica delle rocce e di altri materiali geologici tende a cadere all'interno di un range piuttosto ristretto di

$1-3\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Inoltre emerge che nei materiali comuni che formano le rocce, il quarzo e i silicati hanno la più alta conducibilità termica, circa $6\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Di conseguenza la conducibilità termica dei terreni sarà condizionata in maggior misura dalla presenza di questo minerale. In termogeologia si tende a considerare la conducibilità come una costante, ma essa è di fatto dipendente dalla temperatura, ciò comunque si può trascurare perché le temperature variano in un range piuttosto ristretto. Nell'edilizia per quantificare il flusso termico per conduzione di un materiale si utilizza la seguente formula:

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{s} \quad (3.3)$$

Dove: q è il flusso termico in Wm^{-2} , riferito all'unità di superficie S in m^2 , s è lo spessore in m del materiale, T_1 e T_2 sono le temperature dei due corpi nel verso delle T decrescenti. Tuttavia i manufatti utilizzati per le costruzioni sono eterogenei e si ricorre allora a coefficienti di conduttività equivalenti opportunamente tabellati e forniti dalle case costruttrici, in questo modo si tratta il materiale come fosse omogeneo e fittizio.

Il trasporto conduttivo è governato dalla legge di Fourier, secondo cui il flusso è proporzionale al gradiente di temperatura:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \Phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

Qui di seguito il significato delle variabili delle due equazioni: z = altezza [m]; r = raggio [m];

Φ = angolo longitudinale; λ = conducibilità termica [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$], ρc = capacità termica volumetrica [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$], intesa come la quantità di calore da fornire ad un corpo per elevare di 1 grado Kelvin la sua massa; q = potenza termica scambiata per unità di volume [W/m^3]; T = temperatura [K]; t = tempo [s].

Convezione

L'equazione generale del trasporto di calore (o bilancio di energia) che descrive gli effetti combinati di conduzione e convezione all'interno di un fluido in movimento è governata dal principio di conservazione dell'energia e si esprime tramite l'equazione di conservazione dell'entalpia.

L'equazione si scrive in forma vettoriale come:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + q \quad (3.6)$$

L'espressione integra in un'unica formulazione i due contributi termici:

Convezione (Termine di avvezione): Rappresentato dal membro sinistro, descrive l'energia termica trasportata fisicamente dal movimento macroscopico del fluido. Se il fluido è fermo ($\mathbf{v} = 0$), questo contributo si annulla.

Conduzione (Termine di diffusione): Rappresentato dal membro destro, descrive la diffusione del calore a livello microscopico dovuta al gradiente termico, che segue la legge di Fourier.

Sorgente: Il termine q rappresenta eventuali fonti o pozzi di calore interni (es. effetto Joule, reazioni chimiche).

Nei fluidi e gas la trasmissione di calore avviene con spostamento di materia, tramite correnti convettive. I fluidi quindi contengono calore: per esempio l'acqua cede circa 4180 Jm^{-1} per ogni $^{\circ}\text{C}$ di temperatura. Così se si muove dell'acqua calda dal boiler di casa al bagno per esempio, si sta spostando anche del calore, il fenomeno prende il nome di convezione. Se poi si crea con un'azione meccanica il movimento di calore attraverso il fluido, allora si parla di convezione o avvezione forzata, perché il calore fluisce a causa di una forza imposta dall'esterno sul fluido vettore (si pensi alle pompe per l'acqua o ai ventilatori per l'aria). Newton propose una semplice formula per quantificare il calore di convezione scambiato dal solido e assorbito dal liquido che è la seguente:

$$q^* = \bar{\lambda}(T_c - T_f) \quad (3.7)$$

dove: q^* è il calore trasportato dal corpo alla temperatura T_c al fluido alla temperatura T_f ed è misurato in Wm^2 ; $\bar{\lambda}$ è la conducibilità termica esterna che dipende dalla natura del fluido, dalla sua velocità e dalle proprietà della superficie del corpo.

La formula del raffreddamento di Newton, non è una vera e propria legge, ma può essere assunta come una approssimazione operativa che si adatta a tutte quelle situazioni dove la differenza di temperatura tra il corpo ed il fluido è abbastanza limitata.

La termogeologia analizza la convezione forzata che si viene a creare nel flusso delle acque sotterranee, dove si può asserire che il fluido si sposta secondo un gradiente di carico, dominato per lo più dalle forze gravitazionali e portando con sé una grande quantità di calore (circa $4,2 \cdot 10^3 \text{ JK}^{-1}\text{m}^{-1}$). Con riferimento alla (Fig.11) si può osservare come durante l'emungimento si abbassa la linea di falda, formando un cono di depressione attorno al pozzo. Quest'acqua può essere usata a scopo idro-potabile, a uso domestico o industriale, ma anche per estrarne il calore trasportato. Si possono anche considerare delle celle di convezione naturale che vengono a formarsi nelle acque di falda (o persino nei gas del suolo) in prossimità o all'interno dei pozzi o delle sonde geotermiche.

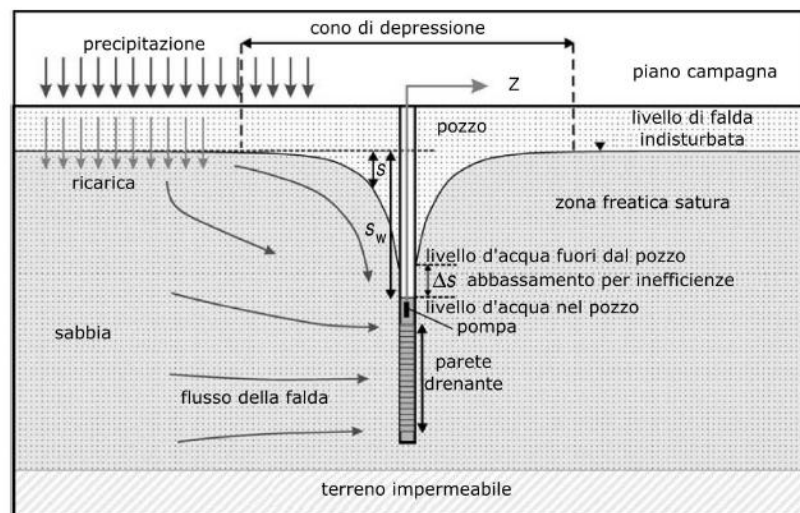


Fig.11 - Modello concettuale pozzo di prelievo in falda (A. Filocamo 2010)

La convezione naturale nel sottosuolo rappresenta un meccanismo fondamentale di trasferimento di calore e massa che si instaura in presenza di gradienti termici e variazioni di densità nei fluidi interstiziali, tipicamente acqua o

aria contenute nei pori di terreni e rocce. A differenza della conduzione, che avviene per diffusione molecolare, la convezione naturale è governata dal moto del fluido stesso, indotto da forze di galleggiamento (buoyancy) dovute a differenze di temperatura. Da un punto di vista matematico, il fenomeno è descritto dall'accoppiamento tra l'equazione di conservazione dell'energia e le equazioni del moto del fluido; in mezzi porosi, esse vengono spesso semplificate attraverso la legge di Darcy modificata per includere gli effetti termici:

$$v = -\mu k(\nabla p - \rho g e_z) \quad (3.8)$$

dove v è la velocità del fluido, k la permeabilità del mezzo, μ la viscosità dinamica, p la pressione, ρ la densità del fluido, g l'accelerazione di gravità ed e_z la direzione verticale. La dipendenza della densità dalla temperatura può essere espressa tramite l'approssimazione di Boussinesq:

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (3.9)$$

dove β è il coefficiente di espansione termica. Combinando queste relazioni con l'equazione del calore, si descrive l'innescio dei moti convettivi quando il numero di Rayleigh nel mezzo poroso:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T K H}{\nu\alpha} \quad (4.0)$$

La convezione inizia tipicamente quando: $Ra > Ra_{crit} \approx 4\pi^2 \approx 40$

In tal caso, il sistema evolve da un regime puramente conduttivo a uno convettivo, con formazione di celle che intensificano il trasporto di calore e soluti. La comprensione quantitativa di tali equazioni è essenziale per applicazioni geotermiche, idrogeologiche e ambientali nel sottosuolo.

Irraggiamento

Un corpo a temperatura T emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche, che si propagano nello spazio circostante, e non necessita di un mezzo per propagarsi. Quindi è un fenomeno che interessa ogni aggregato materiale, non importa se solido, liquido o gassoso, e avviene anche nel vuoto. Il potere emissivo di un corpo ha il significato di energia emessa per unità di tempo e per unità di superficie ed è funzione della quarta potenza della sua temperatura, secondo la legge di Stefan-Boltzmann:

$$\varepsilon = \sigma e T^4 \quad (4.1)$$

Dove: e è una costante universale pari a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$; e è una grandezza detta emissività che può variare tra 0 e 1 (dipendendo dalle proprietà della superficie, se $e = 1$ allora si ha il massimo potere emissivo e la superficie è detta superficie nera); T è la temperatura del corpo. È attraverso il meccanismo dell'irraggiamento che il sole trasmette energia all'atmosfera terrestre nella misura di 1366 W m^{-2} . Questa è riferita al piano, occorre quindi considerare che sulla terra colpisce una calotta sferica per 1440 minuti, riducendosi del 75%. L'atmosfera filtra in una certa misura i raggi solari provocando:

- una riflessione dei raggi

- un assorbimento che ne provoca un aumento di temperatura

Circa metà della radiazione attraversa invece l'atmosfera senza modificazioni e prende il nome di radiazione netta. Metà della radiazione netta contribuisce infine all'evaporazione delle masse d'acqua e parte viene riemessa dal terreno sempre sotto forma di onde elettromagnetiche (radiazione di ritorno). Di conseguenza l'energia disponibile è circa un quarto di quella complessivamente emessa. Secondo (*Linacre e Geerts 1997*)[15] le medie annuali di radiazione netta sono: 100Wm^{-2} per le regioni tropicali, $40\text{-}80\text{Wm}^{-2}$ per le temperate e minore di 40Wm^{-2} per quelle nordiche dell'Eurasia e del Nord America. La radiazione netta scalda la terra che ne cede una parte per evapotraspirazione, cioè la quantità d'acqua (riferita all'unità di tempo) che dal terreno passa nell'aria allo stato di vapore per effetto congiunto della traspirazione, attraverso le piante, e dell'evaporazione.

Al terreno resta quindi una quantità di calore ulteriormente ridotta, che può essere trascurata nel lungo termine e rimossa per esempio da un impianto geotermico. Rispetto al flusso tipico del calore geotermico, minore di $0,1\text{Wm}^{-2}$, il calore assorbito dal terreno per la radiazione solare netta è di almeno due ordini di grandezza più grande, per questo gli impianti geotermici sfruttano per lo più il suolo come fosse un grande collettore solare e un magazzino. Non deve stupire quindi che la gran parte dei criteri di progettazione si concentri su tassi di estrazione di calore pari a $10\text{-}20\text{Wm}^{-2}$, valori compatibili con la quantità di radiazione solare utile e atmosferica che si è in grado di raccogliere con un impianto geotermico.

Come qualsiasi corpo caldo, il terreno scambia calore per conduzione con i corpi freddi, ivi immersi, i quali subiscono un aumento di temperatura fino alla stabilizzazione con gli strati di sottosuolo interessati che, molto limitatamente, si raffreddano. Ciò si verifica, per esempio, nei tubi o nei pali di fondazione conficcati nel terreno. La presenza di un fluido freddo all'interno delle tubazioni accentua tale processo: il fluido si riscalda tornando in superficie, per poi raffreddarsi nuovamente a temperatura ambiente e ripetere così il ciclo. In questo caso, al fenomeno della conduzione si unisce quello della convezione tra il fluido termovettore ed il bulbo in cui esso scorre.

La variazione di temperatura ∂T generata è molto ridotta e dipende in parte dalle condizioni atmosferiche, ma soprattutto dal flusso di calore geotermico presente nel terreno. Anche perforando molto in profondità, a causa delle dispersioni durante la risalita del fluido, il risultato è sempre dell'ordine di pochi gradi e non si può pensare di utilizzare il semplice processo per il riscaldamento di un immobile. Le equazioni precedenti rappresentano rispettivamente quella generale della conduzione del calore (equazione di Fourier) in coordinate cilindriche e l'equazione relativa alla conduzione del calore per assi simmetrici. La conduzione in una sonda geotermica avviene generalmente in tre materiali distinti: attraverso le pareti del collettore, attraverso la malta cementizia e nel terreno. Il fenomeno della convezione regola, invece, lo scambio termico nell'anulus tra il fluido freddo ed il tubo caldo, dove, però, avvengono anche fenomeni di dispersione termica.

Questo è il motivo principale della dimensione limitata di tali tubi, il cui diametro può variare da 20 a 40 mm. Nel caso di trasporto di calore in un mezzo poroso saturo (tipico nei terreni della pianura padana), dove è frequente la presenza di falde freatiche e artesiane anche a profondità inferiori a 100 m, il flusso di energia è la somma dei flussi di calore attraverso la fase fluida e solida.

La conducibilità termica $[\lambda]$, in prima approssimazione, assumendo il mezzo omogeneo e isotropo e condizioni di equilibrio termico, può essere scritta come:

$$\lambda = n\lambda_f + (1 - n)\lambda_s(4.2)$$

in cui n è la porosità, mentre λ_f e λ_s sono rispettivamente la conduttività termica del fluido e quella della matrice solida. Queste considerazioni iniziali portano a definire il problema a lungo termine correlato ad una sonda geotermica. Il flusso geotermico q_{geo} , assunto costante, è responsabile del gradiente di temperatura. Questo è uno stato di equilibrio che definisce le condizioni naturali. Il campo di temperatura nella terra è stazionario e dipende solo dalla profondità z . Il flusso geotermico attraversa il terreno ed è totalmente dissipato nell'ambiente. L'estrazione del calore può essere caratterizzata dalla quantità media di estrazione:

$$q_1 = \frac{Q}{H} \quad (4.3)$$

dove H è la lunghezza attiva della sonda, cioè la lunghezza per la quale il calore è estratto. Abbastanza in profondità oltre la sonda, il flusso geotermico non sarà influenzato e rimarrà costante. Sulla superficie, un flusso dipendente dal tempo e dal raggio $q_{surf}(r,t)$ inizierà a fluire dall'ambiente al suolo. Si sovrapporrà al flusso geotermico naturale che normalmente attraversa la superficie del suolo. La potenza termica $Q_s(t)$ risulta dall'integrazione di questo flusso di calore attraverso la superficie del terreno. $Q_s(t)$ è una delle due fonti di energia della sonda.

È chiamata la fonte di energia di contorno poiché il calore arriva sia dal flusso geotermico, sia dall'ambiente. Il contributo netto dell'ambiente è definito dall'integrazione del flusso totale alla superficie del terreno, cioè $q_{surf}(r,t) - q_{geo}$, attraverso l'area per cui fluisce, quindi $q_{surf}(r,t) - q_{geo}$ è positivo.

L'altra fonte di calore è $Q_g(t)$ ovvero la potenza termica estratta dalla capacità termica del suolo. Questa fonte di calore può rimanere solo se la temperatura del suolo decresce col tempo. Per quanto riguarda l'influenza della superficie sulla temperatura del terreno, si è dimostrato che le oscillazioni stagionali possono essere trascurate già a una ventina di metri di profondità e la temperatura si assesta intorno al valore medio annuale della temperatura superficiale. La legge che regola l'andamento nel tempo dell'onda di calore è (Pahud, SUPSI 2002)[16]

$$T(z, t) = T_0 + dT_0 e^{-\frac{z}{\delta}} \cos \left[w(t - t_0) - \frac{z}{\delta} \right] \quad (4.4)$$

$T(z, t)$ = temperatura del terreno [°C] alla profondità z [m] e al tempo t [s]; T_0 = temperatura media del terreno [°C]; dT_0 = variazione dell'ampiezza dell'onda di calore in superficie [°C]; t_0 = tempo per il quale la temperatura resta mas-

sima in superficie [s]; $\delta = \sqrt{\frac{2\alpha}{w}} = \sqrt{\frac{\alpha T}{\pi}}$ = profondità di penetrazione [m]; T = periodo dell'onda di calore [s]; $w = \frac{2\pi}{T}$ = frequenza dell'onda [s⁻¹]; α = diffusività termica del mezzo $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \left[m^2/s \right]$.

1.2.4 Temperatura del terreno

Le rocce ed i sedimenti che costituiscono la Terra hanno alti valori di calore specifico/volumetrico S_{vc} , ma modesti valori di conduttività termica λ , perciò la loro diffusività termica α sarà piuttosto bassa. Perciò l'onda di calore si propagerà molto lentamente, senza raggiungere profondità significative (sempre che non vi sia advezione di acque sotterranee), con un andamento della temperatura rappresentato in (Fig.12).

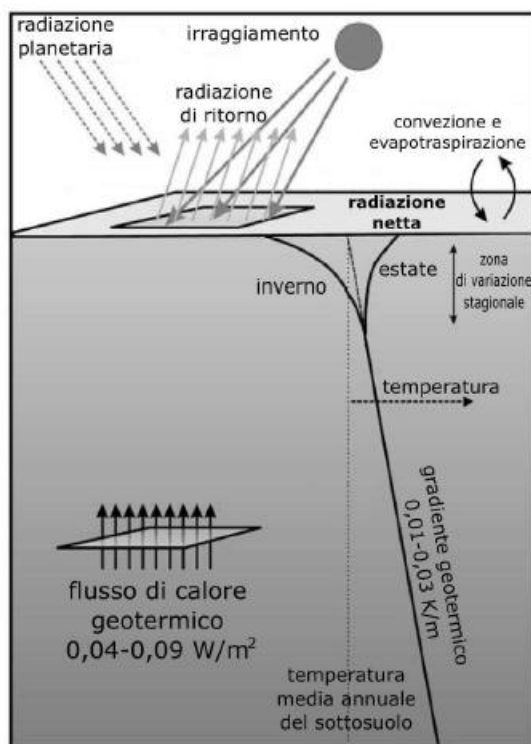


Fig.12 - Schema che mostra l'andamento della temperatura all'aumentare della profondità (Dipartimento Protezione Civile della Provincia di Trento 2012)

Profilo superficiale

Scendendo dalla superficie terrestre fino ad una certa profondità (variabile fra 5-20 m) la temperatura misurabile varia durante l'anno in funzione della temperatura media meteorologica, fino ad una profondità dove la temperatura registrata rimane costante per tutto l'anno con un valore pari alla temperatura media annuale locale. In parole povere la temperatura del terreno è più calda di quella dell'aria esterna in inverno, ma più fredda in estate. È quindi possibile definire una superficie di omotermia che normalmente segue nel sottosuolo il profilo topografico sovrastante con smussamenti delle asperità altimetriche e locali variazioni riconducibili a fenomeni geologici circoscritti.

Profilo profondo

Al di sotto della superficie omeoterma la temperatura terrestre aumenta con un incremento che, mediamente, corrisponde a circa 3 °C ogni 100 m di profondità, ma può variare sensibilmente in funzione della posizione in cui ci si trova. Il campo normale di variazione del gradiente geotermico solitamente è compreso fra 1,5 °C/100m e 5,0 °C/100m. Il valore del gradiente geotermale è funzione della conduttività termica delle rocce; rocce molto porose, quindi includenti elevati volumi di acqua, sono caratterizzate da bassa conduttività termica.

Calcolo del gradiente geotermico

Al di sotto della superficie di omotermia il gradiente geotermico può essere calcolato, conoscendo (o stimando) le temperature a due profondità, con la seguente formula:

$$\text{Gradiente Geotermico} = \frac{T_2 - T_1}{D_2 - D_1} \quad (4.5)$$

Con T_1 = Temperatura misurata alla profondità D_1 ; T_2 = Temperatura misurata alla profondità $D_2 < D_1$.

1.2.5 Bilancio energetico del sottosuolo

Molte sono le quantità di calore che vanno ad interessare il terreno e che contribuiscono a caratterizzarne la temperatura. Per semplificare il tutto si può ipotizzare di considerare un volume di terra di volume V_t e calore specifico volumetrico S_{vc} assegnato e scriverne il bilancio termico imponendo le seguenti condizioni al contorno:

- un flusso costante di calore geotermico alla sua base (Q_g);
- l'eventuale presenza di un flusso di falda che attraversa il volume (Q_{we} entrante da sinistra e Q_{wu} uscente a destra, come rappresentato in (Fig.13), portando con sé un carico di calore (questo flusso si può considerare costante nel lungo periodo);
- la temperatura media annuale della superficie all'interfaccia suolo-atmosfera (Q_s), può essere considerata nel lungo periodo come una costante e costituirà la condizione al contorno della parte superiore.

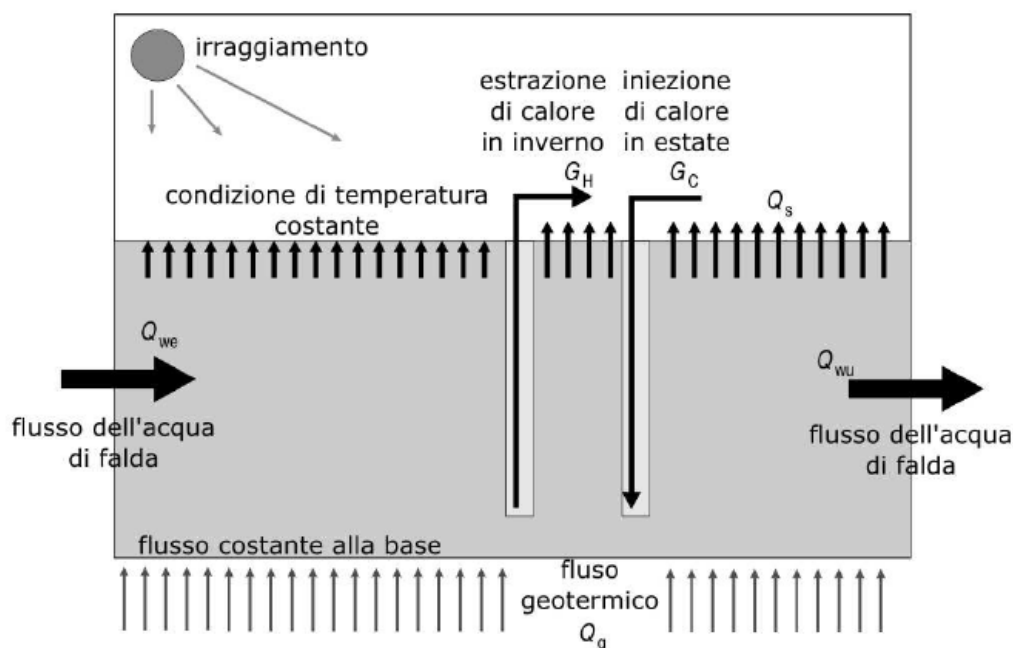


Fig.13 - Porzione del sottosuolo e contributi energetici per il suo equilibrio termico (Nicola Rainone 2010)

Il volume di terreno è in una situazione di equilibrio termico e si può a questo punto pensare di togliere del calore G_h (modalità riscaldamento) o di immetterne in quantità G_c (modalità raffreddamento). Chiaramente, durante un anno, si può estrarre calore in inverno e cederlo in estate. Se $G_h > G_c$ nel corso di un anno, si avrà un riscaldamento netto a lungo termine ed il terreno tenderà a raffreddarsi. Viceversa se $G_h < G_c$ si avrà un raffreddamento netto a lungo termine ed il terreno tenderà a riscaldarsi. In alcune circostanze particolarmente fortunate, il calore immesso in estate bilancia quello estratto in inverno, con conseguente minor danno al bilancio a lungo termine del terreno e

quindi alla sua temperatura. Se ora si analizza il calore immagazzinato nel terreno, un suo aumento è rappresentato da $Vt \Delta T Svc$, dove ΔT è la sua variazione di temperatura.

In condizioni naturali a lungo termine si avrà:

$$Q_{wu} + Q_s = Q_{we} + Q_g \quad (4.6)$$

Si presume però che esista un equilibrio e che la temperatura del terreno non cambi con il tempo. Tuttavia se si comincia ad estrarre il calore in uno schema di riscaldamento netto a lungo termine, si avrà:

$$G_H + Q_{wu} + Q_s > G_C + Q_{we} + Q_g \quad (4.7)$$

Quindi il calore immagazzinato si esaurirà e la temperatura scenderà, di conseguenza:

- Q_s diminuisce ed al limite diventa negativo, un flusso di calore (in definitiva solare) è indotto dalla superficie, più il gradiente di temperatura tra superficie e sottosuolo è maggiore, tanto più Q_s diventa negativo;
- Q_{wu} diminuisce.

L'estrazione di calore porta il sistema ad un nuovo stato di equilibrio termico, chiaramente caratterizzato da una temperatura minore. Se G_H dovesse essere troppo elevato, la temperatura del volume di terra potrebbe continuare a scendere fino al suo congelamento. La situazione allora presenterebbe evidenti problematiche geotecniche, ambientali e operative. Pertanto la fonte di calore del terreno diventa sostenibile solo se si ha una buona conoscenza del bilancio di calore del terreno, altrimenti l'impianto avrà una durata limitata nel tempo. Al contrario in uno schema di raffreddamento netto a lungo termine:

$$G_H + Q_{wu} + Q_s < G_C + Q_{we} + Q_g \quad (4.8)$$

il terreno inizierà a scaldarsi, con un aumento di Q_s ed in qualche caso anche Q_{wu} . Il terreno raggiungerà un nuovo equilibrio, con una temperatura maggiore che può essere più o meno sostenibile. Se però la temperatura supera i limiti imposti nella progettazione, l'impianto può diventare sempre più inefficiente ed infine inutilizzabile.

Deriva termica del terreno

La misura della variazione di temperatura del terreno negli anni, causata dallo sbilanciamento dei carichi estivi/invernali e da come le sonde o i pozzi sono disposti tra di loro, prende il nome di deriva termica. Il tutto si tramuta in una perdita di efficienza del sistema geotermico che ne preclude il funzionamento a lungo termine.

1.2.6 Analogie tra l'idrogeologia e la termogeologia

L'idrogeologia e la termogeologia hanno molti aspetti simili che vale la pena sottolineare. L'idrogeologia si occupa in qualche caso di indagare l'accumulo di acqua sotterranea della terra, attraverso pozzi di perforazione e la porta in superficie con qualche tipo di pompa, dove può essere utilizzata. La termogeologia cerca di sfruttare il serbatoio di calore della terra mediante fori di trivellazione e lo rende utilizzabile ai fini della climatizzazione con una pompa di calore. Vi è una similitudine matematica diretta che riguarda il flusso dell'acqua sotterranea ed il flusso di calore del

sottosuolo. L'acqua sotterranea fluisce da un'area ad alta energia ad una a bassa, secondo l'equazione dei Bernoulli, che definisce il concetto di carico idraulico H in m come una misura dell'energia potenziale dato da:

$$H = z + \frac{P}{\gamma} \quad (4.9)$$

dove: H è il carico idraulico in m; z è la profondità in m; P è la pressione in Nm^{-2} ; γ è il peso specifico dell'acqua pari a $9,81\text{kNm}^{-3}$. In modo simile dalla termodinamica si afferma che il calore tende a fluire da un oggetto caldo ad uno freddo, mediante la legge di Fourier che quantifica il flusso di calore trasportato attraverso un blocco di un assegnato materiale. L'idrologia ha una legge simile definita legge di Darcy che definisce la portata d'acqua attraverso un blocco di materiale poroso:

$$Z = KS \frac{dh}{dx} \quad (5.0)$$

dove: Z è la portata in m^3s^{-1} ; K è la permeabilità delle terre in ms^{-1} ; S è l'area della sezione in m^2 ; h è il carico in m e $\frac{dh}{dx}$ è il gradiente adimensionale.

Un idrogeologo sarà interessato a quantificare le proprietà del terreno per verificare se si tratta di un materiale adatto alla perforazione di un pozzo. Due proprietà sono fondamentali: la conducibilità idraulica K in ms^{-1} proprietà intrinseca del mezzo poroso, che descrive la quantità d'acqua che può fluire in essa; il coefficiente di immagazzinamento specifico S_0 descrizione della porosità, cioè quanta acqua sotterranea viene rilasciata dagli spazi nei pori o nelle fratture in una unità di volume di roccia per 1m di carico idraulico.

Un acquifero possiede una sufficiente permeabilità e un coefficiente di accumulo adeguato per l'estrazione d'acqua sotterranea. Anche nella termogeologia si ha a che fare con due parametri che descrivono l'abilità di un corpo di roccia di accumulare e trasmettere calore: capacità volumetrica di calore S_{VC} in $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ descrizione di quanto calore viene rilasciato da un volume di roccia al variare della temperatura di 1K o 1°C ; conducibilità termica λ in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ definizione ricavata dalla legge di Fourier. Tutte le terre hanno un'adeguata conducibilità termica e una capacità volumetrica di calore sufficiente ad una estrazione economica del calore, ciò che penalizza gli impianti è semmai la loro dimensione, come sarà evidenziato in seguito (Fig.14).

	Idrogeologia		Termogeologia	
Campo di interesse	flusso d'acqua sotterraneo		flusso di calore del sottosuolo	
legge fisica	legge di Darcy $Z = KS \frac{dh}{dx}$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	legge di Fourier (solo conduzione) $Q = \lambda S \frac{dT}{dz}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
proprietà intrinseca	K = permeabilità	m s^{-1}	λ = conducibilità termica	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
misura del potenziale	H = carico idraulico	m	T = temperatura	K
misura dell'accumulo	S_0 = immagazzinamento specifico	—	S_{VC} = calore specifico	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$
zona di sfruttabilità	acquifero		tutti i terreni	
mezzo di sfruttamento	pozzo e pompa		foro di trivellazione e PdC	
misura di efficienza	perdita di pozzo		resistenza termica della sonda	

Fig.14 - Schema riassuntivo analogie tra idrogeologia e termogeologia (Banks2008).

2. Gli impianti geotermici a bassa Entalpia

L'impianto geotermico è un sistema di climatizzazione che utilizza come fonte termica il terreno, appoggiandosi se necessario ad una pompa di calore. Si dimostra molto versatile, essendo applicabile in qualsiasi tipo di sottosuolo ed in qualsiasi regione d'Italia. Inoltre la stessa sorgente termica invernale può essere utilizzata come serbatoio termico estivo, con lo stesso impianto cioè è possibile non solo riscaldare un edificio, ma anche raffreddarlo, sfruttando il freddo del sottosuolo, tramite una particolare tecnica chiamata (active cooling) se si utilizza la Pompa di Calore PdC o (free cooling) se non la si utilizza. Esistono poi molteplici tipologie di impianti che ricadono in due categorie principali: a circuito aperto o chiuso, come ben raffigurato in (Fig15).

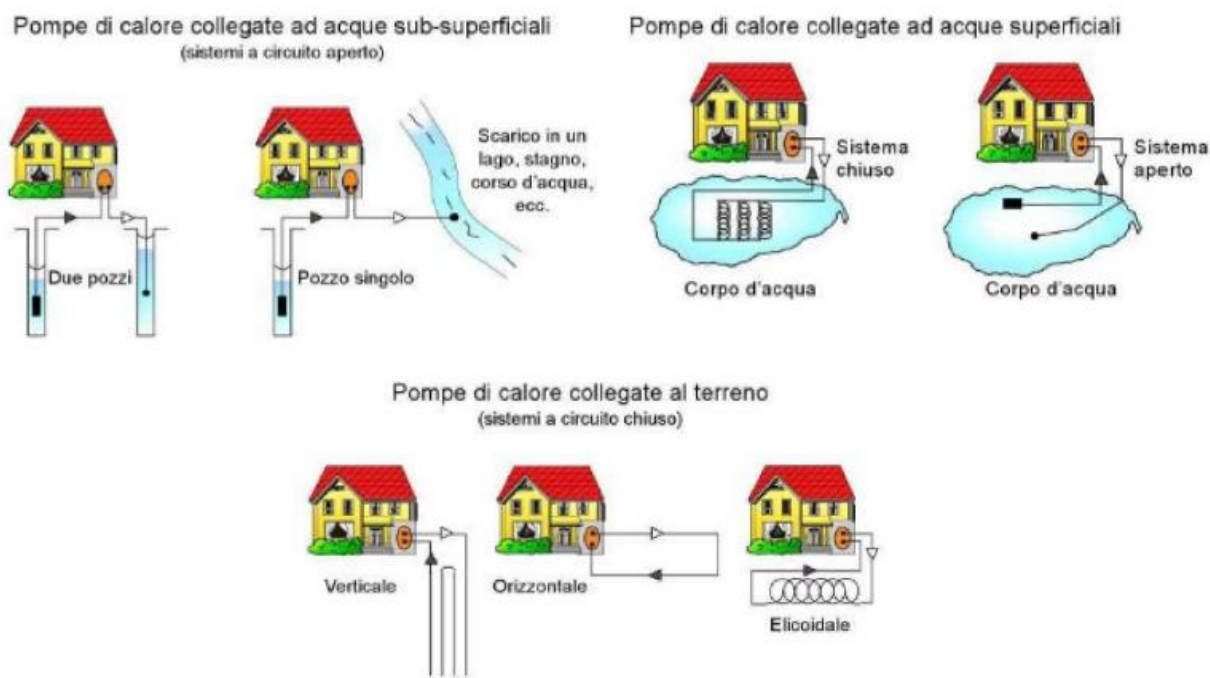


Fig.15 - Schemi semplificati di sistemi con pompe di calore (Fanelli e Dickson 2004)

Scegliere il corretto impianto per una specifica installazione richiede di considerare svariati fattori, in particolare:

- geologia e idrogeologia del sottosuolo (un'adeguata permeabilità è obbligatoria per gli impianti a circuito aperto);
- area e utilizzazione sulla superficie (gli impianti a circuito chiuso orizzontale richiedono un'abbondante spazio esterno);
- sorgenti di potenziale calore nelle vicinanze;
- caratteristiche termiche dell'edificio.

Nella fase di progettazione, una volta scelta la sorgente più adatta, si passa al dimensionamento della sala tecnica, stabilendo i parametri chiave più adatti alle dimensioni dell'impianto, in modo tale da ottenere una prestazione ottimale al minimo costo. In particolare:

- il fluido termovettore che permette all'impianto di cedere o iniettare il calore al sottosuolo;
- la pompa di calore per portare il calore ad un livello di temperatura opportuno;
- il sistema di distribuzione del calore all'interno dell'edificio (pavimento o pareti radianti, bocchette di ventilazione, ventilconvettori, etc).

2.1 Aspetti introduttivi sulle pompe di calore geotermiche

2.1.1. La pompa di calore

La PdC è una macchina termodinamica a ciclo inverso che lavora tra 2 livelli termici, uno interfacciato con la sorgente fredda ed uno ad alta temperatura, il cosiddetto serbatoio caldo. In realtà il termine PdC andrebbe correttamente ad indicare il solo funzionamento in riscaldamento, cioè l'effetto utile che si considera è quello che viene indicato come Q_2 (flusso termico lato condensatore). In realtà molte di queste apparecchiature sono invertibili e funzionano anche come refrigeratore, quindi si va a sfruttare come effetto utile quello indicato come Q_1 (flusso termico lato evaporatore); uno schema utile della pompa di calore è rappresentato in (Fig.16) nella pagina seguente.

Rispetto agli usuali impianti di riscaldamento, la PdC offre il vantaggio di fornire più energia (calore), di quanta ne viene richiesta per funzionare. Ne esistono di molti tipi e si possono suddividere in base:

- al tipo di ciclo termodinamico: a compressione di vapore, a compressione termica, ad assorbimento/adsorbimento;
- al tipo di alimentazione: elettrica, a gas, a calore di recupero;
- al tipo di sorgente termica: aria, acqua superficiale o sotterranea, terreno, solare termico, calore di recupero.

In questa sede la pompa di calore presa come modello di riferimento, sarà la più semplice e anche la più presente sul mercato, ovvero quella ad alimentazione elettrica e a compressione di vapore.

Il circuito chiuso che la costituisce è composto da 3 diversi componenti, tutti percorsi da un fluido particolare chiamato frigorigeno:

1) I due scambiatori di calore:

- l'evaporatore che si interfaccia con la sorgente fredda,
- il condensatore invece con il serbatoio caldo;

2) il compressore che porta il fluido dalla bassa alla alta pressione;

3) la valvola di laminazione che permette di invertire il processo.

Il condensatore e l'evaporatore non sono altro che tubi posti a contatto con un fluido di servizio (che può essere acqua o aria) nei quali scorre il fluido frigorigeno. Questo cede calore al condensatore e lo sottrae all'evaporatore. I componenti del circuito possono essere sia raggruppati in un unico blocco, sia divisi in due parti (sistemi split) raccordati dai tubi nei quali circola il fluido frigorigeno.

Durante il funzionamento, il fluido subisce le seguenti trasformazioni:

1. Compressione: il fluido frigorigeno allo stato gassoso e a bassa pressione, proveniente dall'evaporatore, viene portato ad alta pressione; nella compressione si riscalda assorbendo una certa quantità di calore.

2. Condensazione: il fluido refrigerante, proveniente dal compressore, passa dallo stato gassoso a quello liquido cedendo calore all'esterno.
3. Espansione: passando attraverso la valvola di espansione il fluido refrigerante liquido si trasforma parzialmente in vapore e si raffredda.
4. Evaporazione: il fluido refrigerante assorbe calore dall'esterno ed evapora completamente.

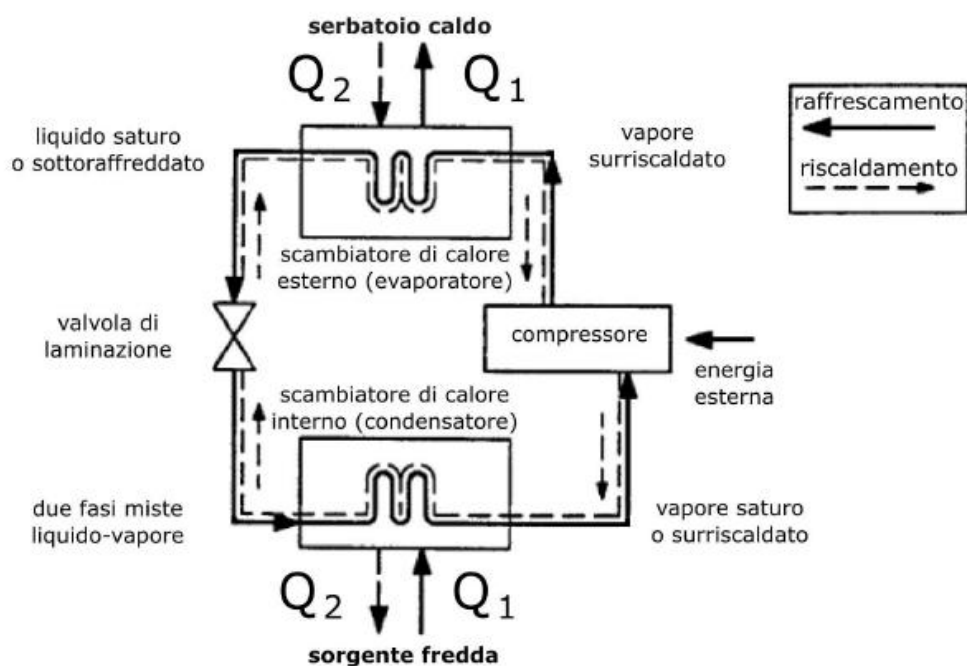


Fig.16 - Schema semplificato funzionamento di una PdC (Manuale fisica tecnica M. Spiga 2012)

L'insieme di queste trasformazioni costituisce il ciclo della pompa di calore: fornendo energia con il compressore al fluido refrigerante, questo, nell'evaporatore, assorbe calore dal mezzo circostante e, tramite il condensatore, lo cede al mezzo da riscaldare. Come tutte le macchine, anche la PdC sarà caratterizzata da alcuni parametri caratteristici:

- la potenza (termica e/o frigorifera) espressa in kW;
- l'efficienza energetica, descritta dal coefficiente di prestazione (COP) che misura l'efficienza di una pompa di calore, un coefficiente adimensionale.

Il COP in termini fisici di flusso di calore è la potenza assorbita tramite compressore ed esprime un termine ideale, cioè il valore massimo di COP che si può ottenere dal punto di vista termodinamico. Misura l'efficienza di un impianto a pompa di calore, in riscaldamento ed in raffreddamento. Il valore medio annuale dei COP per un assegnato impianto è definito dal Fattore di Performance Stagionale (SPF) che per le pompe di calore geotermiche raggiungere valori molto alti.

$$\text{COP} = \frac{\text{ENERGIA FORNITA}}{\text{ENERGIA ELETTRICA CONSUMATA}} \quad (5.1)$$

IN RISCALDAMENTO
$$\text{COP}_H = \frac{|Q_2|}{|L|} = \frac{|Q_2|}{|Q_2| - Q_1} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (5.2)$$

IN RAFFRESCAMENTO
$$\text{COP}_C = \frac{Q_1}{|L|} = \frac{Q_1}{|Q_2| - Q_1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (5.3)$$

Al denominatore si può vedere il salto di temperatura tra la sorgente fredda e quella calda. Se questa differenza diminuisce, il COP aumenta: più vicine sono le temperature delle 2 sorgenti, più alta è l'efficienza (in analogia ai serbatoi idraulici). La pompa di calore in regime di riscaldamento si comporta come una caldaia. Chiaramente ci sarà dal punto di vista fisico generale un valore di COP limite per cui la PdC è conveniente rispetto alla caldaia (il calcolo viene evidenziato nella Fig.17) e da un COP limite $< 2,91$).

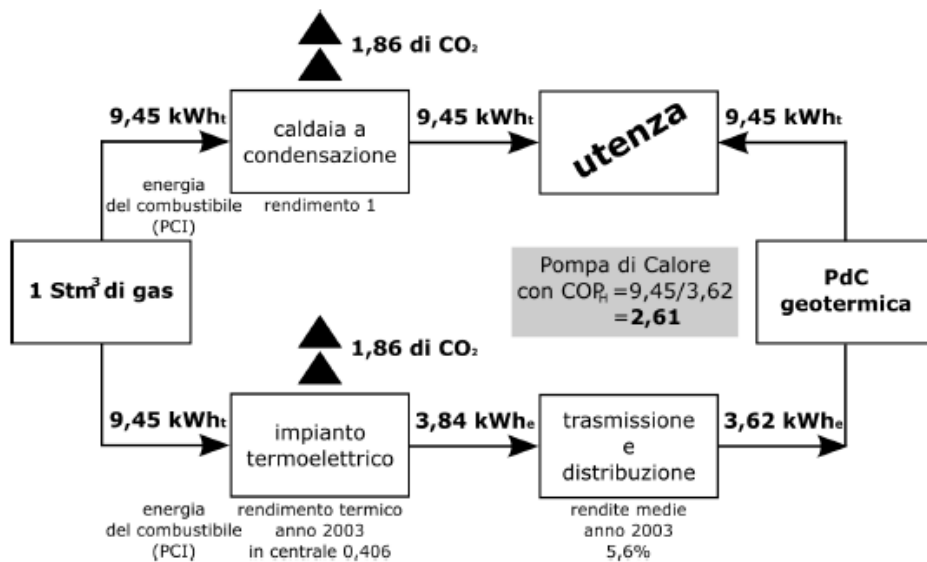


Fig.17- Calcolo del COP minimo termodinamico per assicurare la convenienza rispetto ad un impianto a caldaia a gas (Centro studi Galileo 2019)

2.1.2 Il fluido termovettore

Il fluido termovettore trasporta il calore ceduto dalla sorgente nel terreno all'impianto e viceversa, a seconda delle temperature raggiunte e delle caratteristiche chimiche può andare: direttamente all'impianto; allo scambiatore di calore o alla pompa di calore. Negli impianti a circuito aperto, per esempio, può essere costituito dall'acqua emunta dai pozzi, che poi se non è di qualità adeguata dovrà scambiare il proprio calore in un opportuno scambiatore di calore per non corrodere o danneggiare la PdC (in questi casi è necessario fare delle analisi chimiche e biologiche per stabilire la qualità dell'acqua ed il suo carico inquinante). Negli impianti a circuito chiuso invece si può utilizzare come fluido termovettore acqua pura o addizionata con sostanza anticongelante.

In questi casi allora si aggiunge una sostanza anticongelante che permette di evaporare anche a temperature più basse e assorbire sufficientemente calore dal terreno, facendo così fronte a tutti i carichi invernali. Dal punto di vista tecnico ed ambientale, la sostanza anticongelante (in genere glicole etilenico o propilenico) può innescare fenomeni

di corrosione ed in caso di perdite andare ad inquinare il sottosuolo e le eventuali falde acquifere, con danni assolutamente non trascurabili. Inoltre dopo un certo periodo di tempo la sostanza va reintegrata. L'accoppiata acqua ed anticongelante richiede quindi maggiore manutenzione ed attenzione ed è preferibile quindi sovradimensionare il circuito scambiatore a terreno (anche se questo fa aumentare il costo iniziale di installazione e quindi anche il tempo di ritorno dell'investimento) ed utilizzare acqua pura come fluido termovettore: ciò permette di avere più alte efficienze energetiche della PdC (Zarrella, 2020)[17].

2.1.3 Il sistema di distribuzione

Il sistema geotermico diventa conveniente quando il salto termico è il più contenuto possibile, si useranno quindi impianti di riscaldamento che funzionano a bassa temperatura (30 -40°C rispetto a quelli tradizionali che richiedono invece temperature dell'ordine di 70°C). Le due alternative possibili sono quindi: i sistemi diffusi pannelli radianti, in cui la trasmissione del calore avviene per irraggiamento, e i sistemi concentrati ventilconvettori, in cui la trasmissione del calore avviene per moto convettivo. Per tali motivi è conveniente pensare allo sfruttamento di energia geotermica solo nel caso di nuove costruzioni o ristrutturazioni complete, dove è possibile prevedere l'installazione di un impianto di distribuzione adatto.

2.2 Tipologie di impianti

Le pompe di calore che adottano la geotermia per la climatizzazione degli edifici hanno il vantaggio, rispetto per esempio agli impianti che sfruttano l'aria esterna, di poter contare su una sorgente che presenta una variazione di temperatura molto contenuta durante la giornata e la stagione di funzionamento, ottimizzando quindi il SPF. Nel seguito si affronteranno gli impianti a circuito aperto e chiuso, rispettivamente open e closed loop, citando i criteri di dimensionamento forniti dalle norme UNI 11466, affiancata dalle direttive per la sostenibilità UNI 11468 del 2012.

2.2.1 Open loop

I sistemi a ciclo aperto o idrotermici da falda sotterranea (conosciuti all'estero con l'acronimo GWHP) pur essendo stati i primi ad essere installati, sono quelli meno approfonditi dal punto di vista progettuale. Questo sistema è caratterizzato dal fatto che il principale portatore di calore, l'acqua, circola liberamente nel sottosuolo o in superficie, a seconda se la presa avviene in falda in laghi o fiumi. I sistemi che utilizzano le risorse idriche sotterranee sono i più utilizzati e la parte tecnica di questi sistemi è costituita dai pozzi, per estrarre o iniettare acqua nel sottosuolo. In molti casi, sono richiesti due pozzi, uno per estrarre l'acqua, e uno per lo scarico nello stesso acquifero di produzione. Anche se apparentemente sembrano molto semplici, questi sistemi richiedono una corretta progettazione, che comprende: la conoscenza del flusso delle acque sotterranee con tutte le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche dell'acquifero interessato, la realizzazione dei pozzi, la selezione dell'eventuale scambiatore di calore e lo smaltimento di quanto emunto, in modo da risultare efficienti ed affidabili nel tempo.

Negli impianti a circuito aperto, d'altra parte i pozzi in falda richiedono manutenzione e sono limitati a quei siti con una discreta disponibilità di acquiferi.

Le principali richieste sono:

- sufficiente permeabilità, per permettere la produzione della portata richiesta dell'acqua con un piccolo abbassamento;
- buone proprietà chimiche, per esempio basso contenuto di ferro, per evitare problemi di incrostazione, intasamenti e corrosione.

L'installazione di un sistema open loop richiede l'esistenza di una falda acquifera idonea a sostenere i carichi richiesti per la climatizzazione, quindi si procederà a descrivere i vari depositi nel sottosuolo esistenti in natura e a caratterizzarne le caratteristiche idrauliche fondamentali.

Un altro aspetto fondamentale da non sottovalutare è rappresentato dalla perforazione dei pozzi e da tutte le precauzioni da prendere in fase di progetto e realizzazione.

Senza entrare troppo nel dettaglio si elencheranno le tecnologie di perforazione, le procedure di chiusura del pozzo e la scelta delle pompe. Si elencheranno e descriveranno le tre tipologie principali di impianto, trattando molto dettagliatamente il sistema indiretto "doublette", cioè quello che comprende la presenza di uno scambiatore di calore per intercettare gli inquinanti presenti in falda salvaguardando così la PdC e la reimmissione delle acque in un pozzo di iniezione o scarico. Si accenneranno anche ai possibili problemi correlati, ovvero il feedback idraulico e la migrazione termica che devono essere presi in considerazione in fase di progettazione.

La scelta di approfondire questo sistema a discapito degli altri, è stata operata perché minimizza l'impatto ambientale e ne permette la realizzazione in molteplici situazioni, anche quando le condizioni qualitative e quantitative della falda sono limitate. Gli impianti idrotermici da acqua di falda comprendono tre configurazioni impiantistiche di base (rappresentate in Fig.18), ognuna relegata a particolari situazioni di esercizio:

- a) Open loop diretto: l'acqua emunta va direttamente alla PdC, impiegato negli edifici residenziali e raramente nelle piccole applicazioni commerciali. Risente molto della qualità delle acque e dei problemi indotti da essa, il più comune dei quali è l'intasamento dello scambiatore di calore primario fra l'acqua e il refrigerante. È consigliabile solo per piccoli applicativi in cui la praticità e l'economicità escludono l'uso di uno scambiatore di calore di isolamento, oppure quando la qualità delle acque sotterranee è eccellente (la cui valutazione però deve essere attentamente documentata).
- b) Sistema standing column (dotato di un unico pozzo profondo per la presa e lo scarico). Questo sistema viene realizzato in terreni rocciosi ed in acquiferi scadenti dove però la qualità dell'acqua è molto buona. I pozzi quindi raggiungono profondità notevoli, comprese tra i 300 -450m, ed i sistemi funzionano a temperature comprese tra quelle dei sistemi open e closed loop. In genere un 10% della portata uscente non torna al pozzo, per evitare eccessivi incrementi o abbassamenti della temperatura media a seconda del ciclo di climatizzazione.
- c) L'open loop indiretto utilizza uno scambiatore di calore intermedio tra i circuiti lato pompa e lato PdC, così non solo si escludono i problemi che possono affliggere la macchina termica dovuti alla qualità dell'acqua, ma anche la conseguente gestione differenziata delle due parti rende le prestazioni del sistema ottimali.

Se l'acqua viene smaltita in un pozzo di iniezione il sistema viene denominato "doublette". Questi sistemi offrono una efficienza energetica paragonabile ai sistemi a circuito chiuso, ad un costo di impianto notevolmente ridotto.

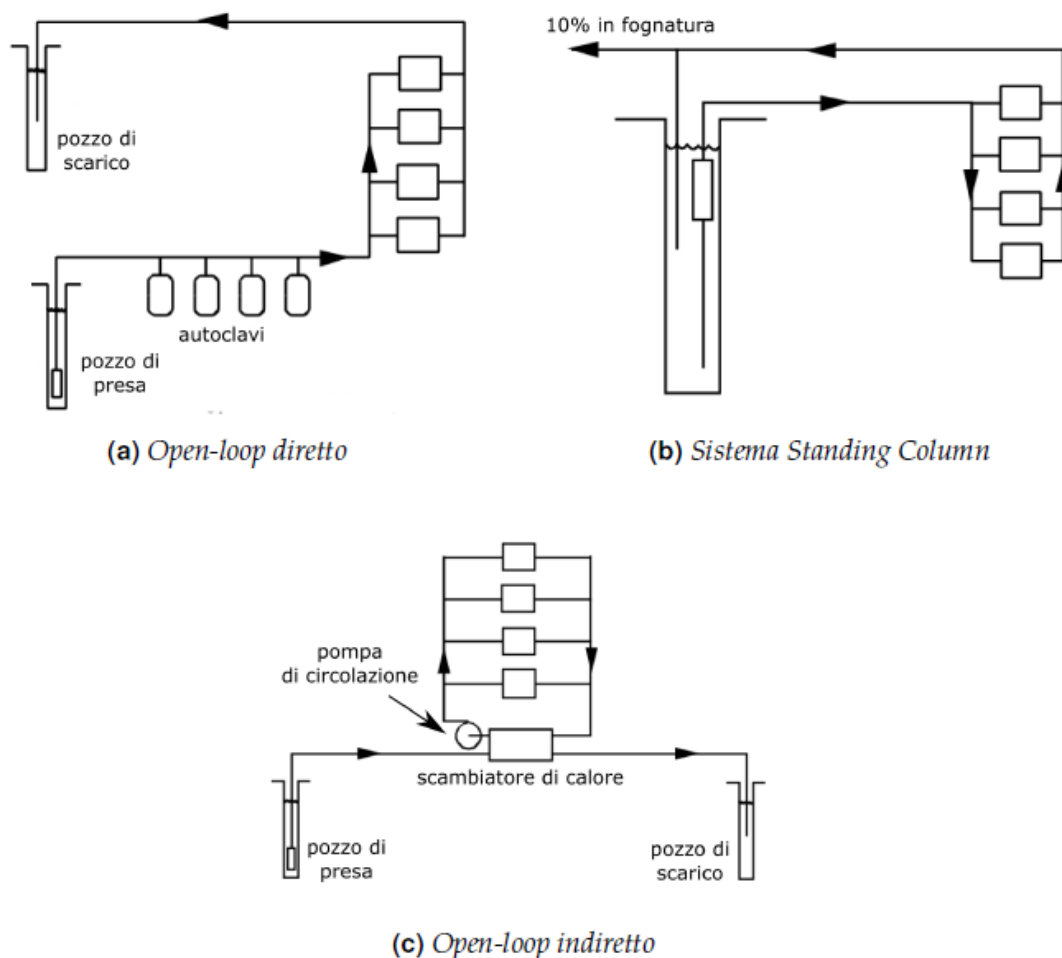


Fig.18 - Configurazioni impiantistiche per impianti idrotermici (Alessandro Baietto e co 2010)

Prove di pompaggio

Per descrivere un'acquifero si può ricorrere alle prove di pompaggio che, in regime di moto vario o permanente quando il processo si è stabilizzato, forniscono un valido sistema per ottenere dati utili in tal senso. Alle prove si può attendere in vario modo: sottraendo portata e procedendo alla sua misura fino a raggiungere uno stato di stabilità; oppure, al contrario, immettendo una portata e procedendo ai rilievi per ogni stabile livello dell'acqua all'interno del pozzo. In dettaglio le due strade si possono così riassumere:

- 1) Con una successione di attingimenti ciascuno a portata costante per un adeguato numero di ore (da 24 a 72 ore a seconda dell'acquifero), rilevando a diverse distanze in altri pozzi se esistenti o in piezometri le quote piezometriche, Provvedendo anche a rilevare l'andamento delle quote al cessare del pompaggio, con un'ulteriore prova per verificare la fondatezza dei rilievi svolti durante il pompaggio.
- 2) Con pompaggi ad incremento di portata e a intervalli di tempo costanti e regolari: ogni 2 ore, per esempio; e rilevando, naturalmente, nel pozzo e in quelli prossimi l'andamento piezometrico.

Scambiatori di calore

Gli scambiatori di calore sono dispositivi che in modo efficiente trasferiscono il calore tra due fluidi. Le forme più comuni possiedono una parete divisoria che fa circolare sui due lati i fluidi. In un efficiente scambiatore la superficie di separazione sarà la più grande possibile per ottimizzare il trasferimento di calore per conduzione, e viceversa la resistenza termica sarà la minima possibile. Probabilmente la forma più semplice di uno scambiatore di calore è costituita da due tubi coassiali, nei quali circolano con verso opposto i due fluidi a differenti temperature.

Nei sistemi open loop si impiega quasi esclusivamente il tipo a piastre (lo schema strutturale è riportato in (Fig.19). Questi scambiatori sono costituiti da un pacco di piastre rettangolari tutte uguali, ottenute da lamiera per stampaggio secondo varie forme di corrugazioni superficiali. I fluidi lambiscono le piastre, percorrendo i canali che si formano tra di esse. Le piastre sono sostenute da un telaio e fortemente pressate da una testata mobile di questo. Sono modulari e quindi facilmente smontabili per pulitura o modifiche; hanno basse cadute di pressione e, in caso di perdite, assicurano l'impossibilità del trafilamento da un fluido verso l'altro, grazie al doppio effetto della guarnizione.

Per quanto riguarda i materiali, le piastre ed i collegamenti sono prodotti in acciaio inox 304 o 316, mentre le guarnizioni sono in materiale plastico elastomerico (in genere butile e neoprene). Se le acque sotterranee contengono più di 150 ppm di cloruro, è consigliato l'uso dell'acciaio 316, invece per concentrazioni superiori alle 375 ppm (acqua marina) sono preferibili quelle in titanio (Rafferty, 2001)[18].

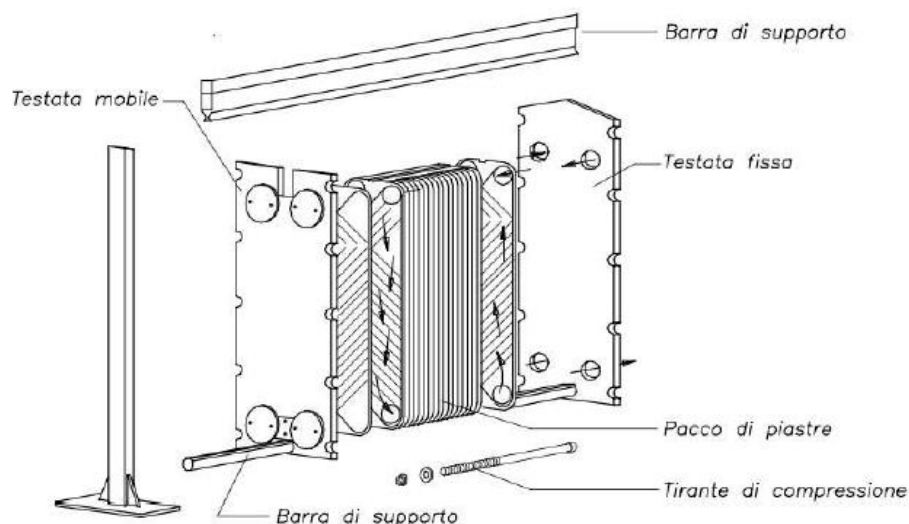


Fig.19 - Schema strutturale di uno scambiatore di calore a piastre (Catalogo Tempcro.srl 2012)

Naturalmente non è escluso che possa corrodersi o rovinarsi e quindi si deve provvedere affinché il collegamento e il posizionamento di questo dispositivo sia agevole, per consentirne un facile accesso per la manutenzione o l'eventuale sostituzione.

Il rischio di intasamento da particolato può essere ridotto con l'installazione di filtri rimovibili a monte dello scambiatore, mentre le incrostazioni chimiche o biologiche possono essere ridotte in questo modo:

- mantenendo un'alta pressione all'interno del circuito delle acque sotterranee per evitare degassamento di CO₂ all'interno dello scambiatore;
- evitando che le acque sotterranee entrino in contatto con l'ossigeno atmosferico (ad esempio privilegiando l'installazione di sistemi chiusi);

- aggiungendo piccole quantità di prodotti chimici biocidi o riducendo le sostanze chimiche, per impedire rispettivamente la formazione di biofilm e l'ossidazione del ferro;
- facendo manutenzione periodica, la quale potrebbe comportare il lavaggio dello scambiatore con acido o con detergenti o reagenti per rimuovere l'accumulo di depositi di idrossido di calcite e/o manganese e/o ferro.

Caratteristiche del pozzo e sua realizzazione

La costruzione di un pozzo prevede, prima di tutto, una serie di studi e ricerche di varia natura da svolgere nell'area interessata. Gli elementi saranno presi in parte dalla letteratura tecnica, in parte da esperienze precedenti realizzate nella zona e infine anche, da indagini dirette quali un pozzo di prova.

Il processo d'esplorazione e ricerca consiste nei seguenti passi:

- scegliere il sito o i siti per eseguire il pozzo di prova;
- ottenere rappresentativi campioni delle formazioni attraversate, classificando le carote estratte dal punto di vista idrogeologico;
- determinare il livello idraulico statico di ogni formazione permeabile;
- analizzare la qualità delle acque

Per definire fra i possibili ed eventuali, l'acquifero da cui attingere.

Il metodo d'esplorazione può essere diverso da caso a caso in dipendenza dalle formazioni idrogeologiche da attraversare e naturalmente dal valore della portata da estrarre. Nessun procedimento è applicabile in tutte le situazioni, inoltre capita che due diversi metodi di perforazione possano essere usati per uno stesso pozzo di prova, in funzione della profondità da esplorare e dello stato della parte superficiale della formazione. In ogni caso i due più importanti criteri da seguire nella perforazione sono quelli di ottenere alle varie profondità campioni accurati, e dunque significativi, di procedere in modo relativamente rapido.

Il tipo o la modalità di perforazione possono modificare la qualità dei campioni estratti: taluni forniscono indicazioni sulla granulometrica dell'acquifero; altri individuano meglio le profondità del contatto o dei contatti tra le diverse formazioni. Nel caso di formazioni non consolidate il campione estratto può suggerire la migliore scelta del filtro da impiegare: tipo e aperture delle fessure. In una formazione relativamente compatta, il campione e la presenza d'acqua affluente al foro a una definita profondità, individuano le fessure o faglie o la presenza di una formazione permeabile nel contesto roccioso. I metodi di perforazione sono ovviamente meccanici con varie tecniche e modalità di avanzamento, in funzione delle profondità da raggiungere e dei diametri da adottare. Ma anche i metodi geofisici, le indagini gravimetriche e i procedimenti elettrici offrono eccellenti modi di esplorazione specie se applicati, ovviamente per problemi di significativa rilevanza, per ricercare e definire le risorse che un sito possa presentare.

I sistemi di perforazione sono essenzialmente due: a percussione e a rotazione, ma ne esiste anche uno misto a roto-percussione. Generalmente lo scavo di pozzi con percussione avviene a secco; con circolazione quelli perforati a rotazione. Le perforazioni avvengono in modo relativamente rapido con terreni incoerenti (sabbie e ghiaie) e coesivi (limi, argille). In formazioni rocciose gli avanzamenti sono lenti ed in qualche caso difficili, si ricorre allora al sistema a roto-percussione che garantisce una apprezzabile rapidità.

In molte situazioni le operazioni per la costruzione di un pozzo consistono nella: perforazione (drilling); infissione del tubo forma (casing); collocazione entro l'acquifero dello schermo drenante (well screen), un cilindro variamente forato e sul contorno del materiale filtrante (filter pack); eventuale tampone o intasamento con boiacca di cemento o

argilla iniettata (grouting) nello spazio anulare tra il foro di scavo e il tubo forma per proteggere l'acqua dall'inquinamento esterno, con profondità anche di 15m; liberazione della fase fine dei materiali disposti intorno al filtro estraendo con pompaggio la portata massima. Tutte queste operazioni possono avvenire in serie temporale o a seconda dei casi in parallelo e ovviamente in funzione del tipo di perforazione, come rappresentato in (Fig.20)

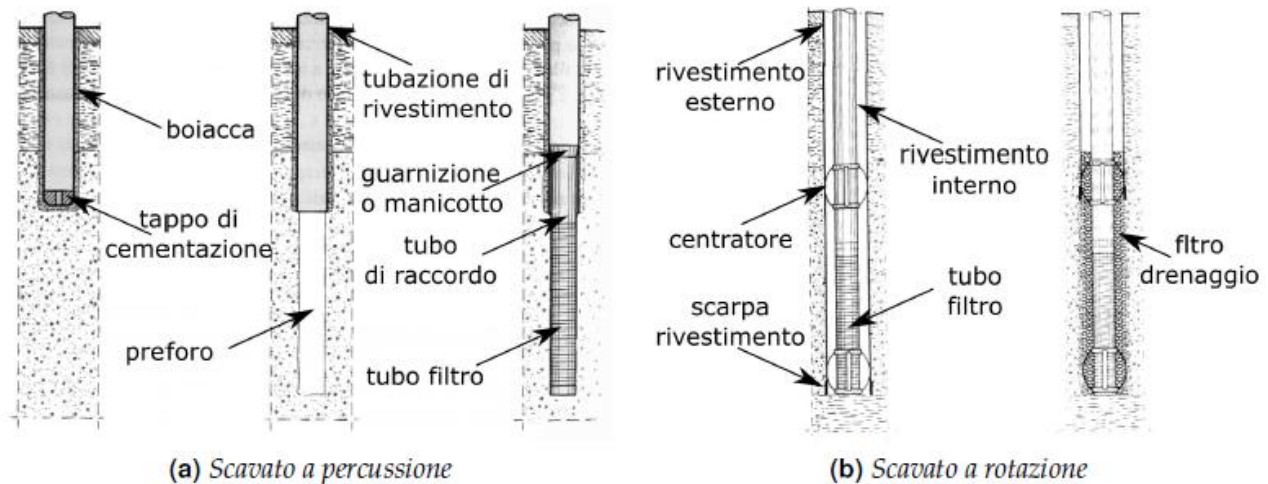


Fig.20 - Diverse fasi della costruzione di un pozzo (Acquedotti e Fognature Luigi Da Deppo 2006)

Una volta realizzato il foro del pozzo e raggiunta la profondità prevista e quindi la falda da cui attingere, si deve provvedere a installare il pozzo vero e proprio. Esso è essenzialmente costituito da una tubazione con funzione di rivestimento e da un tratto terminale filtrante: un tubo finestrato con varie modalità. L'ufficio svolto dalla tubazione è quello di contenere il materiale, eventualmente non coesivo, disposto intorno al foro, specie nel caso dei pozzi a percussione realizzati con un tubo forma, da estrarsi, naturalmente, completata la collocazione dell'insieme tubazione e tratto filtrante.

Il diametro della condotta è ovviamente minore di quello del pozzo: almeno di 10 e 5 cm rispettivamente nei pozzi a percussione e a perforazione. La colonna è solitamente realizzata d'acciaio trattato contro la corrosione, spesso di acciaio inox, usando i diametri della serie unificata, ma con l'avvertenza di non usare materiali diversi per evitare la formazione di pile anche nel rapporto con i terreni attraversati. I giunti tra i tubi sono variamente realizzati con saldatura testa a testa, con manicotti di vario tipo e con filettatura. Per quanto riguarda i filtri, questi possono essere di varia forma e disposizione delle fessure, le dimensioni delle aperture sono dell'ordine del mm (0,8 -2,5mm). Il rapporto tra la superficie aperta e quella totale è abbastanza variabile: da pochi punti per cento fino al 30 -35%. La scelta del tipo di filtro è strettamente legata alla distribuzione granulometrica del materiale entro il quale defluisce la falda. Per avere un'ordine di grandezza delle misure indicative del diametro dei pozzi, in funzione della portata da emungere, sono state riportate alcune misure (Fig.21).

Poi in fase di progettazione esecutiva, bisognerà prendere in considerazione le caratteristiche tecniche e le curve caratteristiche della pompa che si intende utilizzare.

Portata emungibile ℓs^{-1}	Diametro		
	nominale girante pompa mm	ottimale del pozzo mm	minimo del pozzo mm
< 6	102 (4")	152 (6")	127 (5")
5-11	127 (5")	203 (8")	152 (6")
10-22	152 (6")	254 (10")	203 (8")
19-44	203 (8")	305 (12")	254 (10")

Fig.21 - Diametro del pozzo e portata emungibile(Acquedotti Luigi Da Deppo 2006)

Completamento del pozzo

Praticata la perforazione si deve provvedere alla realizzazione del pozzo vero e proprio.

L'operazione richiede, specie per alcuni interventi, molta cura per assicurare il corretto sfruttamento delle falde e per evitare che esse possano essere contaminate per percolazione dalla superficie di sostanze inquinanti o dagli strati attraversati.

Le operazioni consistono essenzialmente nelle seguenti fasi:

- Rivestimento del foro;
- Cementazione per sottrarre la falda a eventuali inquinamenti;
- Creazione del drenaggio intorno al tratto filtrante variamente finestrato;
- Scelta del filtro;
- Spurgo e avviamento del pozzo.

Ogni metodo di perforazione impone differenti modalità di esecuzione e successione di queste operazioni, oltretutto entrano in gioco altri parametri in rapporto alla profondità raggiunta, alla tubazione di rivestimento sia a unico diametro sia con una successione a diametri decrescenti o telescopica. Un altro elemento importante che costituisce il pozzo è la pompa, che può essere: sommersa o ad albero verticale. La pompa sommersa, come indicato dal nome, ha il motore situato nella parte più bassa del pozzo, l'acqua viene aspirata attraverso la colonna sovrastante e rispetto al secondo tipo permette di estrarre maggiori quantità di acqua a parità di diametro della pompa. Non necessita della perfetta verticalità del pozzo, ma bisogna prestare attenzione negli acquiferi sabbiosi, in quanto le velocità elevate tendono a causare abrasione. La pompa ad albero verticale lavora a velocità decisamente più contenute e necessita di una lubrificazione aggiuntiva (si usa olio lubrificante in modeste quantità), è legata indissolubilmente all'albero verticale e a tutti i problemi connessi alla sua installazione e alla profondità da raggiungere. Secondo (Basta e Minchio 2007)[19], la scelta del tipo di pompa da impiegare dipende dalla coppia di variabili portata e profondità e sono preferibili i modelli a velocità variabile per ottimizzare la portata da prelevare al variare della richiesta termica; riassumendo:

- con pozzi poco profondi e basse portate sono preferibili le pompe ad albero verticale;
- con pozzi profondi e portate più elevate sono invece consigliate le sommerse.

Pozzo di presa

Le informazioni necessarie per la progettazione di un pozzo da cui estrarre le acque da mandare all'impianto geotermico sono le seguenti:

1. La profondità del pozzo, che sarà legato alla profondità dell'acquifero, al livello statico delle acque sotterranee in falda ed in certa misura alla conducibilità idraulica dei suoli. I pozzi possono trovarsi a pochi metri di profondità in depositi alluvionali o alla profondità di alcune centinaia di metri.
2. Il diametro del pozzo, funzione della portata che a sua volta influenza il diametro della pompa richiesta (deve ovviamente adattarsi alle dimensioni del pozzo).
3. Il rendimento del pozzo sarà limitato dalle proprietà idrauliche della falda e dal carico desiderato per il riscaldamento e/o raffreddamento.
4. La litologia della falda che determina il tipo di pozzo richiesto e quindi il suo costo (per perforazione e sigillatura). Non sempre è possibile ottenere il permesso per scavare un pozzo, specie se ci si trova in acquiferi di pregio o in fasce di rispetto. In genere le autorità competenti richiedono il rispetto di molteplici condizioni per rilasciare la concessione d'uso, che si possono così riassumere:

- una valutazione di impatto ambientale o un'indagine sulle caratteristiche/qualità dell'acqua;
- una prova di pompaggio che attesti che il volume d'acqua richiesto non comporti rischi ambientali e pregiudichi gli altri eventuali utilizzatori locali;
- l'evidenza che l'acqua estratta sia utilizzata in modo appropriato ed efficiente.

Rendimento, profondità e abbassamento indotto

Le grandezze di maggiore interesse che descrivono un acquifero (K , S_0 , T_0) e il materiale che lo compone sono stati già introdotti, resta ora da approfondire come valutare la relazione funzionale tra portata e abbassamento del livello statico. Si tratterà il caso ideale di un acquifero confinato. Durante il pompaggio la superficie piezometrica attorno al pozzo di presa si deprime, creando un campo radiale di flusso (e gradiente idraulico) verso il foro di pompaggio. La superficie in cui si stabilizza il livello delle acque sotterranee prelevate viene chiamata cono di depressione; la differenza verticale tra la superficie piezometrica iniziale e quella che si è formata a seguito dell'estrazione viene chiamata abbassamento indotto s_a . L'idrogeologo americano Carlo V. Theis (una delle figure chiave dell'idrogeologia moderna) dedusse nel 1935 una formula per il flusso radiale transitorio (dipendente dal tempo) delle acque sotterranee, nei riguardi di un pozzo di presa.

La formula prevede il rapporto tra la trasmissività (T_0), la portata (Z), l'immagazzinamento specifico (S_0) e l'abbassamento indotto (s_a) a una determinata distanza radiale (r) dal pozzo ed in un tempo (t) misurato a pompaggio avviato:

$$s(r, t) = \frac{Z}{4\pi T_0} W(u) \quad (5.4)$$

L'equazione è nota come curva di Theis e il polinomio $W(u)$ può così esprimersi:

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2,2!} + \frac{u^3}{3,3!} - \frac{u^4}{4,4!} + \frac{u^5}{5,5!} \quad (5.5)$$

$$u = \frac{r^2 S_0}{4T_0 t} \quad (5.6)$$

$W(u)$ converge rapidamente e di solito può essere calcolato prendendo in considerazione i primi, per esempio, cinque termini dello sviluppo in serie. Consente il calcolo manuale dell'abbassamento per un assegnato r , S_0 , T_0 e t .

Si può già osservare che:

- la portata è approssimativamente proporzionale alla trasmissività;
- l'abbassamento è approssimativamente proporzionale alla portata;
- l'abbassamento è inversamente proporzionale alla trasmissività;
- l'abbassamento aumenta con il tempo di pompaggio;
- l'abbassamento diminuisce con l'aumentare della distanza dal pozzo.

Cooper e Jacob (1946) semplificarono notevolmente l'equazione di Theis, se si assume che u sia piccolo (minore di 0,01), allora i termini dell'espansione polinomiale elevati a potenza diventano trascurabili e rimane:

$$s_a = \frac{Z}{4T_0\pi} \left[-0,5772 - \ln \left(\frac{r^2 S_0}{4T_0 t} \right) \right] = \frac{2,3Z}{4\pi T_0} \log \left(\frac{2,25T_0 t}{r^2 S_0} \right) \quad (5.7)$$

Nella falda infinita e omogenea ipotizzata da Theis, il cono dell'abbassamento continua ad espandersi indefinitamente, nella realtà però questo non avviene. La falda raggiungerà una nuova condizione di stabilità, che bilancerà la quantità d'acqua estratta.

Molti anni prima di Theis, Adolph Thiem (1887) aveva trovato una soluzione stabile per il flusso di acque sotterranee radiali verso un pozzo. La seguente equazione differenziale (derivata dalla legge di Darcy in coordinate radiali) riassume i suoi risultati:

$$Z = 2\pi r T_0 \frac{dh}{dr} \quad (5.8)$$

dove h è il carico idraulico in m e r è la distanza radiale dal pozzo di presa, sempre in m.

Integrando tra due distanze radiali, r_1 e r_2 , si ottiene:

$$h_2 - h_1 = s_1 - s_2 = \frac{Z}{2\pi T_0} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (5.9)$$

dove h_1 e h_2 sono i carichi delle acque sotterranee che sottintendono alle rispettive distanze radiali, espressi in m; s_1 e s_2 sono gli abbassamenti indotti sempre in m. Se si considera il pozzo di presa come una di queste due distanze, si può affermare che l'abbassamento previsto (per la portata Z assegnata) è s_w , dove r_w è il raggio del pozzo di presa:

$$s_w - s_2 = \frac{Z}{2\pi T_0} \ln \frac{r_2}{r_w} \quad (6.0)$$

Logan (1964) escogitò la più famosa e azzardata approssimazione nel campo dell'idrogeologia, stabilendo r_2 a una distanza r_e tale da rendere l'abbassamento s_2 praticamente nullo. Inoltre, ha ipotizzato che il rapporto r_e/r_w sia spesso pari a 2000. Così, ha ottenuto l'approssimazione Logan tra la portata (Z) e l'abbassamento indotto (s_w).

$$T_0 = \frac{Z}{2\pi s_w} \ln \frac{r_e}{r_w} = 1,22 \frac{Z}{s_w} \quad (6.1)$$

Le ipotesi che hanno portato a queste assunzioni sono alquanto dubbie, tra l'altro Charles Theis dimostrò che non sono nemmeno raggiungibili in una falda ideale; sembra anche che Logan se lo fosse inventato di sana pianta il valore 2000. In realtà, la formula può rivelarsi utile come prima stima del rapporto tra la trasmissività e il rendimento. Sempre per il calcolo della distanza radiale di falda indisturbata, Sichardt (1930) ha trovato:

$$r_e = C_r(h_1 - h_2)\sqrt{K} \quad (6.2)$$

con $C_r = (1500 - 2000)$ misurato in $s^{1/2} m^{-1/2}$

Conoscendo la trasmissività della falda acquifera e definito un abbassamento compatibile con il pozzo (ad esempio la parte superiore dello schermo drenante), si può stimare il rendimento massimo del pozzo. Allo stesso modo, se la falda acquifera è spessa e molto trasmissiva, si potrebbe pensare di stimare la profondità (D) necessaria per la perforazione nell'acquifero in funzione di una assegnata portata. Dal momento che la trasmissività è il prodotto della conducibilità idraulica per lo spessore della falda acquifera, e supponendo che il pozzo sarà idraulicamente efficiente, si può trovare:

$$KD = 1,22 \frac{Z}{s_w}, \quad \text{quindi } D = 1,22 \frac{Z}{Ks_w} \quad (6.3)$$

In questo caso, il pozzo a profondità ridotta non è idraulicamente efficiente come nel caso di completo attraversamento della falda, l'abbassamento (e quindi i costi di pompaggio) per un determinato rendimento sarebbero maggiori. Si stanno sacrificando così i costi di esercizio (energia elettrica o combustibile per la pompa) per un costo di perforazione minore.

Tutte le equazioni utilizzate presuppongono che la presa sia al 100% efficiente e che la falda sia "ideale" cioè infinita, omogenea ed isotropa, cosa che nella realtà non avviene mai.

Pozzi Reali

In un pozzo vero e proprio il filter pack ed il well screen producono moto turbolento e resistenza idraulica e molti altri fattori contribuiscono poi a ulteriori perdite di carico (Fig.22) nella pagina successiva. Queste aumentano in generale con l'aumentare della portata, ma in modo non lineare. Mentre l'approssimazione di Logan prevede una proporzionalità semplice tra abbassamento e portata, una equazione più realistica potrebbe essere la seguente:

$$s_w = BZ + CZ^n = \left(\frac{1,22}{T_0} + B' \right) Z + CZ^n \quad (6.4)$$

dove B rappresenta le perdite di carico lineari, entità naturali nella falda, dovute alla resistività idraulica, ma possono anche includere una componente B' minore di perdite lineari; C rappresenta le perdite non lineari (in genere perdite del pozzo); n è un fattore esponenziale, che spesso vale 2.

In realtà tutte queste approssimazioni aiutano a fare una prima stima del comportamento del pozzo. È una pratica comune utilizzare una versione modificata dell'approssimazione di Logan, con il coefficiente 1,22 aumentato (piuttosto arbitrariamente) a 2, per tener conto delle possibili perdite:

$$Z = \frac{T_0 s_w}{2} \quad (6.5)$$

Si ricorda che l'approccio di Logan è una approssimazione, serve solo per ottenere una prima stima della portata e dell'abbassamento indotto e non vale per la progettazione definitiva, che si servirà di analisi numeriche più complesse.

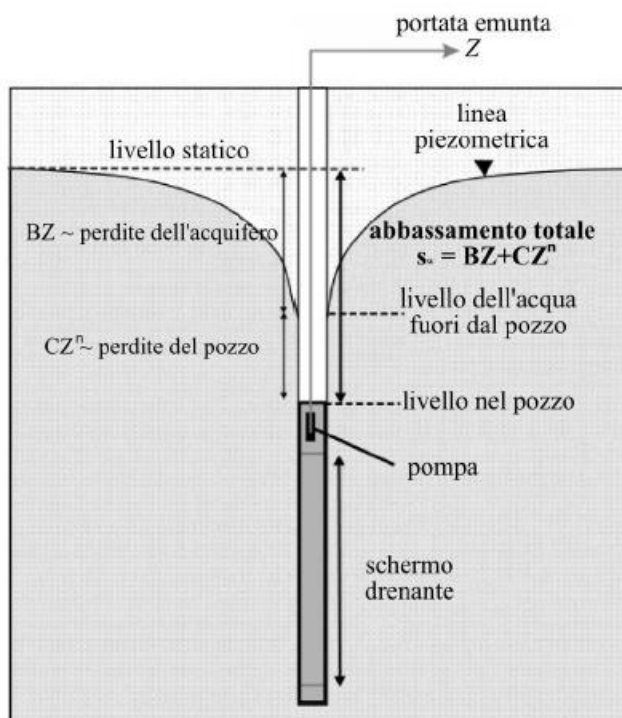


Fig.22 - Perdite reali dovute all'acquifero e al pozzo di presa (idrogeologia applicata Vincenzo Francani 2005)

Smaltimento delle acque sotterranee

Dopo che l'acqua ha ceduto o acquistato calore, si deve stabilire come smaltirla. Se le acque sotterranee in mandata avevano una temperatura iniziale per esempio, di 11°C e le si sono utilizzate per il riscaldamento, è possibile ritrovarsi con un fluido a temperatura di 6°C.

Al contrario se si sono utilizzate per il raffreddamento, le acque reflue saranno più calde.

Molte autorità ambientali prevedono due distinti permessi – una licenza per l'estrazione e una per il consenso allo scarico – che devono essere richiesti per un'operazione che comporti l'estrazione e lo smaltimento delle acque sotterranee. Di solito le possibilità di destinazione per lo scarico sono le seguenti:

- In fognatura se si ha uno scarico pluviale a portata di mano ed inoltre se è assicurata la compatibilità della portata con la disponibilità della rete fognaria. Deve essere inoltrata una richiesta all'ente specifico.
- In un corpo idrico superficiale si deve richiedere il permesso alla competente autorità di bacino ed è necessario eseguire qualche forma di valutazione di impatto ambientale, che dovrà rispondere alle seguenti domande: come la temperatura (calda o fredda) delle acque di scarico incide sull'ecologia del corpo idrico superficiale, e sull'utilità degli altri utenti? Infatti la quantità di calore delle acque reflue è considerata come un potenziale inquinante da molte autorità ambientali.

Le acque sotterranee scaricate sono geochimicamente compatibili con l'acqua del recipiente? Le acque sotterranee possono a seconda dei casi, essere: povere di ossigeno disciolto, ricche di ferro disciolto o salate. Tutti questi fat-

tori potrebbero incidere in modo significativo sull'ecosistema di un corso d'acqua. La portata delle acque sotterranee può aumentare il rischio di esondazione del corso d'acqua? Se lo scarico avviene a mare o in un estuario, può in alcuni casi essere meno strettamente regolamentato. Nella stessa falda acquifera di estrazione è la migliore scelta possibile, perché ha poche o nessuna incidenza sulle risorse idriche (non c'è sottrazione di acqua dalla falda acquifera) e spesso riduce il rischio di abbassamenti del suolo, che possono verificarsi in alcuni terreni a causa della prolungata estrazione delle acque sotterranee.

Questa soluzione può quindi essere interessante per l'ambiente e assicurare le agenzie di regolamentazione che hanno il compito di garantire che le risorse idriche siano protette. In alcuni paesi l'operazione di estrazione e reiniezione nella stessa falda non richiede alcuna licenza. In altri la licenza può essere più facilmente ottenibile rispetto a quella per il solo emungimento.

L'acqua iniettata può necessitare di sterilizzazione, per evitare l'intasamento batterico del filtro del pozzo o della falda acquifera, ma dovrà avere: un contenuto molto basso di particelle in sospensione, una bassa pressione e il suo contenuto di gas dovrà essere controllato in modo tale che le bolle che si liberano non intasino la falda acquifera e ne diminuiscano la permeabilità. Infine si deve prestare attenzione che la reiniezione dell'acqua sotterranea non sia così vicina al pozzo di presa da realizzare un "cortocircuito", che si verifica quando l'acqua reiniettata fredda (o calda, se si tratta di un sistema di raffreddamento) va ad influenzare il pozzo di produzione.

Se ciò dovesse avvenire, la temperatura inizia a scendere (o a salire) con il passare del tempo, compromettendo l'efficienza del sistema. In un'altra falda acquifera se vi è più di una falda acquifera sottostante il sito è possibile prelevare le acque sotterranee da un acquifero e disporre la reiniezione o infiltrazione in un altro. Se si fa questo, si depauperava un acquifero e si ricarica un altro corpo idraulicamente distinto. L'autorità di regolamentazione si comporta più o meno nello stesso modo dello smaltimento delle acque superficiali e si dovrà verificare che l'estrazione della prima falda acquifera non comprometta eccessivamente le sue risorse a discapito anche degli altri eventuali utenti e verificare l'impatto ambientale.

Allo stesso modo l'autorità di regolamentazione dovrà accertare che:

- l'iniezione di acqua non causerà un aumento inaccettabile dei livelli delle acque sotterranee nella seconda falda acquifera;
- l'acqua iniettata sia geochimicamente compatibile con l'acqua naturale del secondo acquifero;
- qualsiasi bulbo di calore (cioè il calore o il freddo trasportato dalle acque sotterranee) non costituisca un inquinamento termico inaccettabile e non causi un impatto negativo verso altri utenti. Nello stesso pozzo di presa è il caso del sistema standing column.

Pozzo di scarico

Il pozzo di iniezione può essere considerato come l'opposto di un pozzo di presa, in cui la portata di pompaggio Z cambiata di segno si sostituisce nelle formule di Theis, Cooper-Jacob o di Logan. Il tutto si traduce in un pompaggio negativo, con la conseguente crescita della linea piezometrica che potrebbe rivelarsi come uno dei principali ostacoli al sistema, soprattutto se la piezometrica risultante raggiunge la superficie del terreno.

Se ciò dovesse verificarsi si deve o iniettare in pressione l'acqua in eccesso in un pozzo ben sigillato, o utilizzare un maggior numero di pozzi di iniezione convenzionali. Questi pozzi richiedono un'attenta progettazione e costruzione per molteplici aspetti. L'iniezione dell'acqua deve essere priva di particelle, per evitare l'intasamento dello schermo drenante o della falda. Si deve inoltre garantire un ambiente microbiologicamente inattivo per prevenire la crescita batterica sulla parete del well screen o del foro: è prassi applicare una sterilizzazione ai raggi UV nell'acqua inietta-

ta. Inoltre non deve contenere bolle di gas o concentrazioni dei gas disciolti che potrebbero disciogliersi nella falda acquifera andando ad ostruire i pori o le fratture del terreno e compromettendo così il funzionamento del pozzo, allo stesso modo delle particelle sedimentate o del biofilm.

Inoltre bisogna anche considerare la possibilità di precipitazione chimica e di intasamento del conferimento e dello schermo drenante, infine il contatto tra l'acqua e l'ossigeno atmosferico può aumentare il rischio di precipitazione di ferro e manganese.

Come sempre le analisi chimiche delle acque sotterranee sono utili anche per prevedere questi rischi. La pressurizzazione e la sigillatura dell'opera di presa riducono al minimo il contatto tra l'acqua e l'atmosfera e possono ridurre al minimo il rischio di intasamento chimico. Nonostante tutte queste precauzioni i pozzi di iniezione non si comporteranno idealmente: di solito c'è un certo rischio di deterioramento delle prestazioni che obbligano in fase progettuale ed esecutiva ad aumentare cautelativamente il numero di pozzi di iniezione (o la profondità del pozzo), in modo da accettare che una portata assegnata ritorni in falda, più di quanto sarebbe richiesto per la sua produzione.

Campo pozzi

Alcuni schemi open loop sono basati su un singolo pozzo, molti però richiedono la perforazione di molteplici pozzi per ottenere la portata richiesta. In questo caso sarà opportuno verificare se:

- Le proprietà idrauliche dell'acquifero sono sufficienti a sostenere una tale estrazione di progetto;
- I pozzi all'interno del campo non vadano in conflitto idraulico tra loro.

D'altra parte, se il sistema utilizza pozzi di iniezione per far tornare l'acqua di scarico nella falda acquifera originale, la portata disponibile potrebbe anche essere superiore a quella ottenuta in sola produzione. Il problema non è di facile soluzione e richiede in molti casi una modellazione numerica.

Feedback idraulico e migrazione di calore

Considerando un impianto idrotermico doublette in raffreddamento e assumendo di emungere acqua fredda ad una temperatura iniziale di T_{presa} e di reiniettarla nello stesso acquifero alla stessa portata Z ma ad una temperatura $T_{scarico}$ in un pozzo di scarico situato ad una distanza L in direzione del gradiente idraulico della falda, il calore immesso nelle acque sotterranee (G) è dato da:

$$G = (T_{scarico} - T_{presa}) S_{VCw} Z \quad (6.6)$$

Dove S_{VCw} è il calore specifico volumetrico dell'acqua. Il carico di raffreddamento (Q_1) consegnato all'edificio viene stimato così:

$$Q_1 = (T_{scarico} - T_{presa}) S_{VCw} \frac{Z}{1 + \left(\frac{1}{SPF_c}\right)} \quad (6.7)$$

dove SPF_c è il fattore di performance stagionale per il sistema di raffreddamento. Questo dovrebbe essere molto alto ($1/SPF_c \approx 0$) per i sistemi di raffreddamento, mentre SPF_c può essere circa 2 - 3 per i sistemi muniti di pompe di calore. Nella migliore delle ipotesi, se si colloca il pozzo di presa a monte di quello di scarico (dove il gradiente idraulico è minore), tutto il calore iniettato sarà portato via dal flusso di acque sotterranee (Fig.23) e il sistema funzionerà in modo sostenibile.

Naturalmente, il bulbo di calore prodotto dalla reiniezione può avere un impatto negativo su altri utenti che si servono della falda o sull'ambiente sottostante. Tuttavia, se il pozzo di iniezione si trova troppo vicino a quello di produzione (Fig. 23a), si può evidenziare una cortocircuitazione termica tra i due pozzi. Secondo Clyde e Madabhushi (1983) questo si verificherà se

$$L < 1 + \frac{2Z}{T_0 \pi i} \quad (6.8)$$

dove: i è il gradiente idraulico naturale e adimensionale) e T_0 è la trasmissività della falda acquifera.

Se l'interasse tra i due pozzi è minore di questo valore critico, vi è la possibilità che una parte del calore reiniettato ritorni nel pozzo di emungimento. Ciò aumenterà la temperatura delle acque captate e diminuirà l'efficienza del sistema o addirittura, nel peggiore dei casi, lo renderà insostenibile. La formula dà tuttavia delle distanze troppo elevate, infatti assumendo $T = 150 \text{ m}^3$ al giorno, $Z = 864 \text{ m}^3$ al giorno e $i = 1\%$, allora dall'equazione risulta che la distanza L deve essere di almeno 367 m per evitare il rischio di feedback idraulico o termico. In molti casi è impossibile ottenere una distanza così elevata tra i due pozzi e si deve accettare il rischio di feedback termico. Comunque un tale sistema può essere ancora sostenibile e può avere una durata soddisfacente, perché:

- Il ritorno del calore nel pozzo di presa non avviene immediatamente. In realtà, potrebbero volerci molti anni (anche se negli acquiferi fessurati o carsici si potrebbe ridurre a settimane o mesi).
- Solo una piccola parte dell'acqua estratta può provenire da quella reiniettata.
- Se si sfrutta l'impianto in riscaldamento ed in raffreddamento, si è in grado di far funzionare il sistema in modo reversibile, recuperando efficacemente il calore delle acque reflue estive durante la stagione invernale e viceversa, senza arrecare alcun danno termico al sistema.

Per valutare il rischio di ritorno termico, si deve quindi considerare la velocità con cui le acque sotterranee viaggiano nel sottosuolo, tra i pozzi di iniezione e di estrazione. Prima di fare questo, però, si deve notare che, se in fase di installazione si è posto il pozzo di presa a valle del gradiente idraulico, è molto probabile che si svilupperà una cella chiusa termica (Fig.25), con tutta l'acqua calda iniettata che va ad alimentare il pozzo di presa.

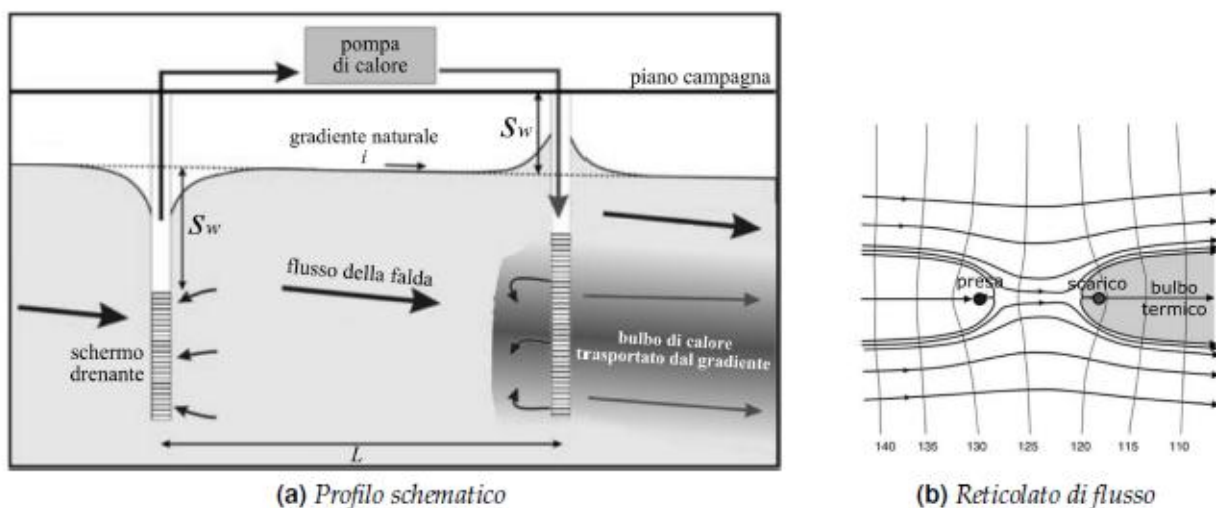


Fig.23 - Un sistema doublette dove il pozzo di presa è a monte del gradiente e quello di restituzione a valle, la distanza L è tale da non generare feedback idraulico. Nel reticolato, le frecce mostrano il flusso dell'acqua, mentre le linee numerate rappresentano i contorni della falda con valori del carico idraulico (decrescente da sinistra a destra) (An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, David Banks 2012)

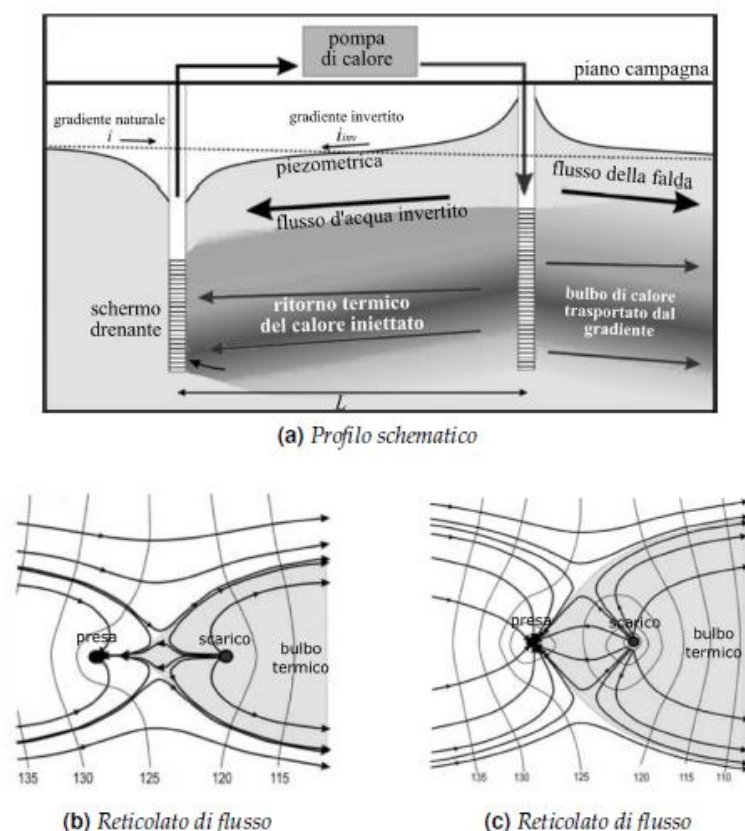


Fig.24 - Un sistema doublette come figura precedente dove nel reticolato (b) si è leggermente al di sotto del valore limite di L e c'è una minima influenza termica, mentre nel (c), L è ampiamente sottodimensionata

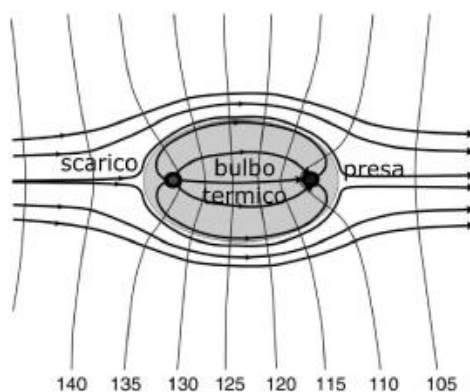


Fig.25 - Posizionamento invertito dei pozzi doublette, rispetto al gradiente naturale della falda, si nota come il bulbo termico chiuda perfettamente il circuito, pregiudicando il rendimento dell'impianto

Tempo di feedback idraulico

La soluzione ideale per scongiurare questo pericolo consiste nel valutare il tempo di feedback idraulico (cioè il tempo necessario alle acque sotterranee per raggiungere il pozzo di presa dal pozzo di reiniezione). Si utilizza di solito un modello numerico, che permetterà di simulare il movimento di un gran numero di molecole d'acqua, lungo diversi

tubi di flusso (spesso considerando gli effetti di dispersione) e di calcolare un tempo medio di ritorno idraulico in quello che sta rapidamente diventando un problema complesso idrogeologico. Ci sono anche dei metodi analitici che si possono usare per una stima iniziale di questo tempo, ma sono delle semplici applicazioni della legge di Darcy e di approssimazioni geometriche.

Migrazione di calore attraverso la falda

Finora si è solo parlato del percorso inverso delle acque sotterranee, che dal pozzo di iniezione ritornano a quello di presa. Il calore però non viaggia alla stessa velocità delle acque sotterranee e non è semplicemente trascinato passivamente con esse, perché è soggetto a tre meccanismi:

- 1) Conduzione attraverso i pori del terreno saturo;
- 2) Avvezione con maggior flusso di acque sotterranee;
- 3) Scambio tra il movimento delle acque sotterranee e la matrice dell'acquifero (grani minerali e qualche poro dove l'acqua rimane adsorbita).

Molti idrogeologi ritengono che lo scambio di calore sia molto rapido e che la matrice dell'acquifero si equilibri con la temperatura delle acque sotterranee rapidamente. (De Marsily 1986)[20] stima che l'equilibrio termico tra un granello di sabbia (1mm di diametro) e le acque sotterranee circostanti richieda meno di 1 minuto, mentre l'equilibrio per una ghiaia di 10 cm occorrono 2 ore. Ciò significa che un singolo punto nel sistema acquifero può essere caratterizzato da una singola temperatura in ogni t di tempo (il che vale sia per la matrice e sia per le acque sotterranee mobili). Questo fenomeno viene chiamato ipotesi di equilibrio termico istantaneo e può essere riassunto dalla seguente equazione monodimensionale:

$$\lambda^* \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - S_{vcw} \frac{dv_D T}{dx} = S_{vcacq} \frac{dT}{dt} \quad (6.9)$$

dove λ^* è la conducibilità termica effettiva della falda acquifera satura, S_{vcw} e S_{vcacq} sono i calori specifici volumetrici rispettivamente delle acque sotterranee e dell'acquifero saturo (cioè la matrice solida più l'acqua dei pori). v_D è la velocità di Darcy, relativa al flusso delle acque sotterranee attraverso la falda acquifera ($v_D = K \cdot i$). Il primo termine descrive il trasporto di calore per sola conduzione, il secondo invece per sola convezione e il terzo il cambiamento di calore immagazzinato in una unità di volume di falda al variare del tempo.

2.2.2 impianti Closed loop

In assenza di falde sotterranee o di autorizzazioni che ne consentano l'uso, un buon sistema per scambiare il calore con il terreno è offerto dalle sonde geotermiche verticali (conosciute anche con l'acronimo SGV in Italia e BHE all'estero). La quasi totalità degli impianti è ad espansione indiretta: un fluido termovettore viene fatto circolare in un circuito chiuso disposto in uno o più fori perforati verticalmente nel terreno (le cosiddette sonde geotermiche). Poi cederà o acquisterà calore dalla PdC, funzionando come un vero e proprio "geoscambiatore" di calore. Il calore può essere trasportato sia attraverso sonde geotermiche orizzontali, posizionate tra 0,2 e 2m sotto il piano campagna (a seconda della regione) sia da sonde geotermiche verticali, trivellate nel terreno. Come già chiarito, la variazione stagionale della temperatura del suolo decresce con l'aumentare della profondità. Per la progettazione del sistema (ovvero il calcolo del carico di calore), si prenderà in considerazione il più basso valore di temperatura (tipicamente

0‰). I circuiti saranno installati (o meglio posati) ad una profondità tale da evitare il congelamento del supporto nelle condizioni estreme, che forniranno la temperatura esterna di progettazione. Per le sonde verticali invece, può essere assunta la temperatura esterna media annuale come valore di progettazione.

A sonde orizzontali

Tra i sistemi a circuito chiuso il più facile da installare è sicuramente quello delle sonde geotermiche orizzontali (sinonimi: ground heat collector, horizontal loop). Per ottimizzare lo spazio, in Europa centrale e occidentale i tubi interrati sono collegati in serie o in parallelo.

Per i sistemi densi di tubi, si rimuove completamente lo strato superiore del sottosuolo, si posano le tubazioni e poi il terreno di scavo viene ridistribuito sopra. Nel Nord Europa (e in Nord America), vista l'ampia possibilità di metratura esterna, si ricorre ai modelli in serie ed in parallelo. In altre regioni invece per limitare la superficie di scavo, sono stati sviluppati alcuni scambiatori di calore che sfruttano un'area più piccola a parità di volume; questi collettori sono anche più adatti per il riscaldamento e il raffreddamento in quelle aree dove la temperatura naturale del terreno non è di vitale importanza. Sono ampiamente utilizzati in America del Nord, e solo un tipo, il raccoglitore in trincea, ha raggiunto una certa distribuzione in Europa, principalmente in Austria e Germania meridionale. Per il collettore in trincea, una serie di tubi a piccolo diametro sono attaccati alle pareti fortemente inclinate di una trincea scavata per alcuni metri di profondità. Altri tipi includono collettori simili a dei rotoli avvitati come i canestri energetici o i collettori slinky (Fig.26)

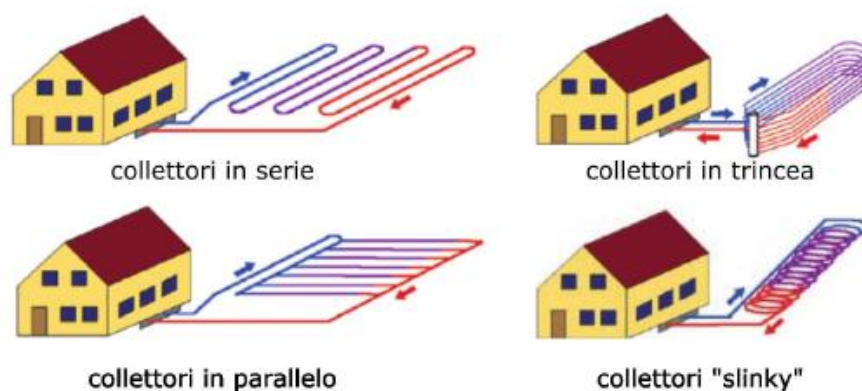


Fig.26 - Varie soluzioni possibili di sonde orizzontali (Consiglio Europeo per l'Energia Geotermica 2009)

Dimensionamento

Nei semplici casi come gli edifici domestici, la stima dei valori medi specifici per l'estrazione del calore può essere ottenuta determinando una valutazione per metro quadro dell'area del collettore nel sottosuolo in Wm^{-2} . La stima dipende dalla qualità del suolo e dalla durata di funzionamento dell'impianto. I valori dati in (Fig.28) a fronte assumono periodi di funzionamento di 1800 e 2400 ore per anno in modalità riscaldamento. La produzione di calore aggiuntivo per l'acqua calda domestica può essere determinata allungando il periodo di funzionamento. Per periodi operativi più lunghi, il calore annuale estratto per metro quadrato di superficie del collettore (misurato in kWhm^{-2} per anno) deve inoltre essere preso in considerazione nella progettazione del sistema, dal momento che questo valore riflette l'effetto a lungo termine di estrazione continua di calore. Il valore dovrebbe essere compreso tra 50 e 70kWhm^{-2} all'anno per il solo riscaldamento.

La diminuzione di temperatura, tra quella di ritorno del mezzo di scambio termico e quella del terreno indisturbato, non deve essere tale da arrecare problemi tecnici durante il funzionamento. Un valore tipico per l'Europa centrale è 12 K.

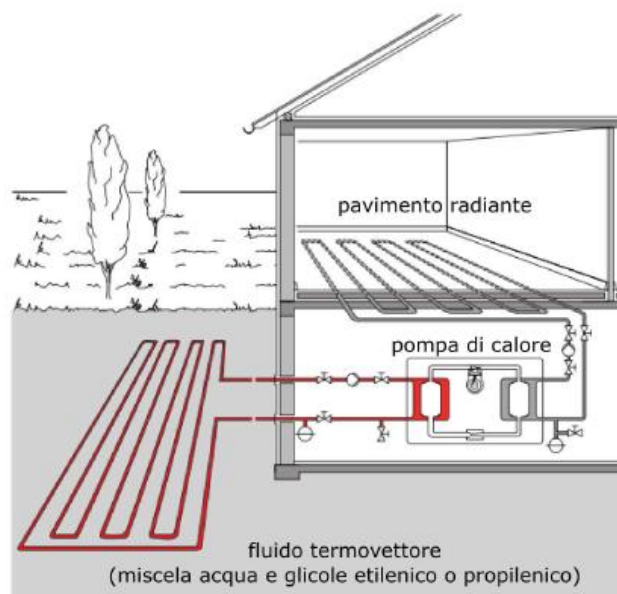


Fig.27 - Schema classico di un impianto a sonde orizzontali (Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore 2012)

Tipo di suolo	resa termica	
	1 800 ore all'anno W m^{-2}	2 400 ore all'anno W m^{-2}
terreno non coesivo secco	10	8
terreno coesivo umido	20 ÷ 30	16 ÷ 24
sabbia o ghiaia satura	40	32

Fig.28 - Rendimento termico per alcuni tipi di suolo dell'Europa Centrale (Verein Deutscher Ingenieure - Associazione degli Ingegneri Tedeschi 2011)

A sonde verticali

Come si è visto, la temperatura al di sotto di una certa profondità ("zona neutra di omotermia", a circa 15-20m dal piano campagna) rimane costante nel corso dell'anno. Questo fatto e la necessità di garantire una capacità sufficiente di scambio di calore con una zona confinata della superficie, favorisce l'installazione dei scambiatori di calore verticali (sonde geotermiche verticali) (Fig.30). In una sonda geotermica verticale, i tubi di plastica (polietilene o polipropilene) che costituiscono lo scambiatore, vengono installati in fori trivellati, e lo spazio restante viene riempito con una malta cementizia opportunamente miscelata. In Svezia i pozzi in rocce cristalline e dure di solito rimangono aperti e si sfruttano le acque sotterranee per lo scambio termico tra i tubi e la roccia. Se è richiesto più di uno scambiatore di calore, i tubi devono essere collegati in modo tale da garantire una distribuzione uniforme del flusso nei diversi canali. I collettori possono essere posti o presso l'edificio, oppure collegati in trincea nel campo sonde. Diversi tipi di scambiatori possono essere utilizzati (visibili in Fig.29) e si possono così suddividere:

- tubi ad U, costituiti da una coppia di tubi diritti, collegati da un raccordo curvato di 180° alla estremità inferiore del foro. Uno, due o anche tre tubi ad U possono essere installati in un singolo foro. Il vantaggio del tubo ad U è il basso costo del materiale di fabbricazione, con il risultato di rendere il doppio tubo a U il più utilizzato tra le sonde geotermiche in Europa.
- tubazioni coassiali (tubi concentrici), ovvero due tubi di diametro differente verticali, o in configurazioni più complesse.

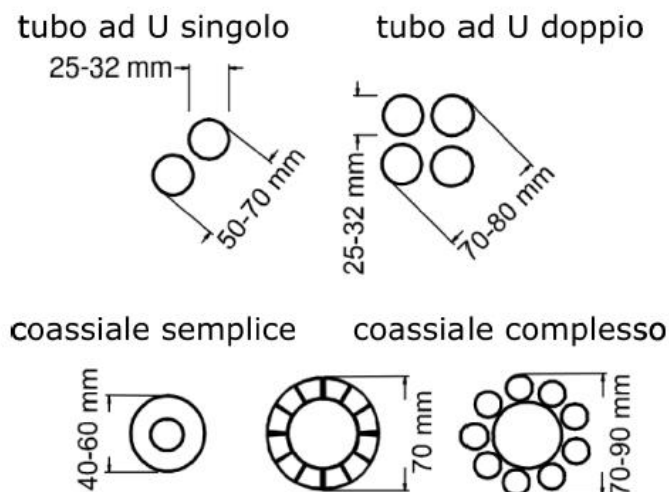


Fig.29 - Tipi di sonde viste in sezione (Impianti a pompe di calore geotermiche, Caleffi 2010)

Gli impianti realizzati con questo sistema, vanno dalle piccole abitazioni con un solo foro, agli edifici di grandi dimensioni, che richiedono veri e propri campi di sonde geotermiche.

La fonte di calore per il recupero termico delle sonde geotermiche è il calore solare (nella parte superiore) e il flusso di calore geotermico (nella parte inferiore), con qualche influenza dovuta al fluire delle acque sotterranee o di percolazione. Tuttavia, l'influenza delle acque sotterranee nella maggior parte dei casi non è molto grande e la conducibilità termica del terreno rimane il parametro principale. Il foro di riempimento e le pareti dello scambiatore di calore rappresentano un'ulteriore dissipazione, che può essere riassunta come una resistenza termica del foro. I valori di questo parametro di solito sono dell'ordine di $0,1 \text{ kW}^{-1}\text{m}$, cioè per un estrazione di calore di 40 Wm^{-1} , questo si trasforma in una perdita di 4K all'interno del foro. Per risolvere questo problema sono state sviluppate delle particolari malte cementizie.

Dimensionamento

Per piccoli sistemi, di capacità inferiore ai 30kW, i valori medi specifici dell'estrazione di calore possono essere ottenuti valutando il calore per metro lineare di foro in Wm^{-1} . Questo valore dipende dalla qualità del suolo e dalla durata dell'estrazione del calore (periodo di funzionamento della pompa di calore in ore per anno).

I valori dati in (Fig.31) assumono periodi di funzionamento della PdC di 1800 e 2400 ore per anno in modalità di riscaldamento. La produzione aggiuntiva di calore per l'acqua calda sanitaria dovrà essere considerata allungando il periodo di funzionamento.

La tabella inoltre assume un range di temperatura principale esterna tra 9 e 11°C ed è valida per la modalità riscaldamento, con al massimo 5 fori di trivellazione.

Se la qualità del suolo varia significativamente durante la procedura di trivellazione, la lunghezza della sonda e/o il numero delle sonde dovrà essere adattato in modo da compensare la variazione nell'estrazione del massimo flusso di calore. Per periodi operativi più lunghi, il calore annuale estratto per metro lineare di foro (misurato in KW^{-1}m per anno) deve inoltre essere preso in considerazione nella progettazione del sistema, dal momento che questo valore riflette l'effetto a lungo termine di estrazione continua di calore. Il valore dovrebbe essere compreso tra 100 e $150\text{KW}^{-1}\text{m}$ all'anno per il solo riscaldamento.

La diminuzione di temperatura, tra quella di ritorno del mezzo di scambio termico e quella del terreno indisturbato (cioè a 10m di profondità), non deve essere tale da arrecare problemi tecnici durante il funzionamento. Un valore tipico per l'Europa centrale è 11 K. Per le grandi installazioni sono richiesti calcoli specifici usando solutori analitici o metodi numerici. Il materiale di riempimento ed il grouting delle sonde verticali potrebbe rendersi necessario. Le distanze di separazione tra le sonde devono poi essere adeguate e rispettare i regolamenti locali.

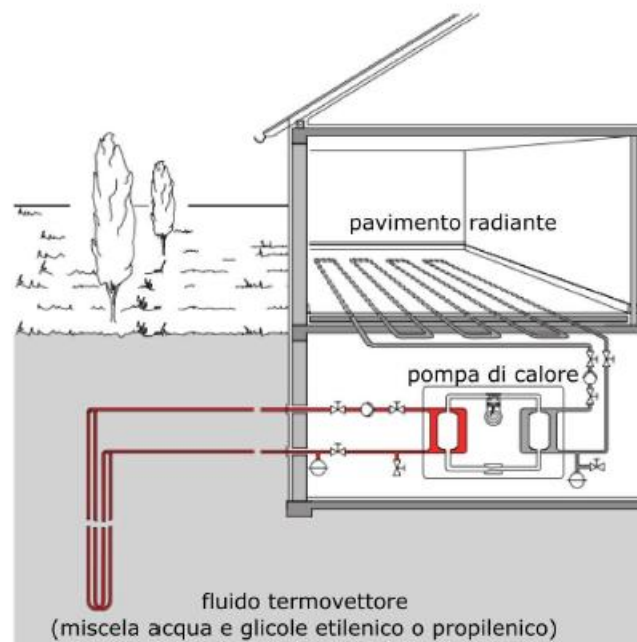


Fig.30 - Schema classico a sonde verticali (Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore 2012)

Ad espansione diretta

A differenza della maggior parte dei closed loop, in questi impianti il fluido frigorigeno della pompa di calore circola direttamente nei tubi del circuito lato terreno (in altre parole, l'evaporatore della pompa di calore è esteso al terreno). Il vantaggio è evidente: si evita un processo di scambio di calore, migliorando l'efficienza del sistema. L'espansione diretta richiede una buona conoscenza del ciclo di refrigerazione ed è limitata alle unità più piccole.

Tipo di suolo	resa termica	
	1 800 ore all'anno W m^{-1}	2 400 ore all'anno W m^{-1}
In generale:		
terreno scadente (secco, $\lambda < 1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	25	20
suolo normale (saturo, $1,5 < \lambda < 3,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	60	50
suolo ben consolidato (con $\lambda > 3,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	84	70
In particolare:		
ghiaia o sabbia secca	< 25	< 20
ghiaia o sabbia satura	$65 \div 80$	$55 \div 65$
ghiaia o sabbia (con flusso di falda intenso)	$80 \div 100$	$80 \div 100$
argilla umida	$35 \div 50$	$30 \div 40$
calcare omogeneo	$55 \div 70$	$45 \div 60$
arenaria	$65 \div 80$	$55 \div 65$
magmatite silicia (granito)	$65 \div 85$	$55 \div 70$
magmatite basica (basalto)	$40 \div 65$	$35 \div 55$
diorite	$70 \div 85$	$60 \div 70$

(i valori possono variare in funzione delle discontinuità presenti e delle condizioni climatiche)

Fig.31 - Rendimento termico per varie tipologie di suolo nell'Europa centrale (Idraulica n. 38, intitolata "Impianti a pompe di calore geotermiche, Caleffi, 2010)

Inoltre è stato dimostrato che i tubi funzionano bene per l'estrazione del calore, ma non tutti per la sua iniezione. Usando il glicole etilenico il terreno può anche essere utilizzato per il raffreddamento. Il calore viene respinto nel sottosuolo, sia per far funzionare la pompa di calore in senso inverso, sia per far funzionare direttamente l'accoppiamento tra il circuito nell'edificio e quello nel terreno.

2.3 Potenzialità e limitazioni degli impianti geotermici

L'utilizzo delle energie rinnovabili, spesso e volentieri, viene abbracciato o bocciato per partito preso, senza andare a verificare criticamente quello che di buono e meno buono presenta. Si vuole comunque evitare un'analisi costi/benefici di questi impianti e un loro confronto con quelli tradizionali, riportando invece più semplicemente i pregi e i difetti di questa tecnologia, alcuni dei quali indirettamente sono già stati evidenziati.

2.3.1 Pregi degli impianti geotermici

Con un unico impianto si riscalda e raffresca l'ambiente, riducendo i costi di manutenzione che si hanno in genere con le caldaie (pulizia del camino, controllo del bruciatore, ecc.), l'arredo pertanto diventa flessibile portando a una riduzione nello spazio meccanico, che non richiede ambienti dedicati e la canna fumaria, ottimizzando di fatto lo spazio interno e riducendo le opere murarie accessorie. Gli impianti geotermici evitano di usare l'aria esterna come sorgente di calore, pertanto i voluminosi, rumorosi ed antiestetici equipaggiamenti esterni come i gruppi frigo e le torri di raffreddamento, non sono più necessari. Con un COP $> 2,61$ (legato alle temperature favorevoli del sottosuolo) si ha la convenienza economica rispetto ad un tradizionale impianto a gas; e il riutilizzo dell'acqua calda sanitaria può essere riciclata in qualsiasi momento nel compressore della PdC. Si suppone che le sonde geotermiche odierne durino almeno 50 anni, mentre la vita media delle migliori PdC ammonta a circa 40000 ore di funzionamento, cioè se si assume un funzionamento di 2000- 2500 ore/anno, si arriva a circa 20 anni (Basta e Minchio, 2007)[14];

Essendo un'energia pulita, si evitano così tutti i pericoli derivanti da:

- perdita di gas e di monossido di carbonio;

– emissione in ambito urbano di CO₂ e di altre sostanze nocive (ossidi di azoto, ossidi di zolfo, polveri sottili, particolato, PM10, PM2,5, residui che si depositano nell'ambiente dove si vive o si lavora o anche policiclici aromatici cancerogeni e diossine in caso di perdita di efficienza del bruciatore); inoltre si evitano i pericolosi stoccaggi ad elevato rischio di incendio e sversamento con successivo inquinamento di suoli e falde.

2.3.2 Problematiche degli impianti geotermici

Due dei principali limiti legati allo sviluppo del sistema geotermico a bassa entalpia riguardano i costi iniziali, la poca conoscenza che l'opinione pubblica ha su questo argomento e cosa potrebbe provocare nel tempo la variazione termica su acqua e suolo dovuta allo sfruttamento di questi sistemi geotermici. Per ottimizzare l'efficienza degli impianti che usano le acque sotterranee come risorsa geotermica, il flusso e la dinamica di trasporto di calore in falde acquifere hanno bisogno di essere ben caratterizzati. La mancata conoscenza riguardo le dinamiche di trasporto di calore di acquiferi fratturati ma anche porosi porta a sovradimensionare gli impianti aumentando ulteriormente i costi iniziali. Le sperimentazioni effettuate in questo percorso di ricerca sono state sviluppate principalmente nell'ottica di poter analizzare le potenzialità e per ottimizzare sistemi geotermici aperti a bassa entalpia che operano all'interno dello stesso pozzo geotermico, quindi sistemi cortocircuitati. Questo tipo di sistema è stato pensato soprattutto per diminuire l'impatto ambientale dovuto dall'iniezione di acqua a temperatura maggiore rispetto alla temperatura di presa. In questo modo, infatti, è possibile contenere le variazioni termiche all'interno di una stessa area di interesse.

Costo dell'impianto

Costo iniziale più elevato, in confronto ad un impianto tradizionale si ha:

- residenziale 50 - 80% in più rispetto ad uno convenzionale,
- commerciale 20 - 40% in più di un'unità roof-top single zone, a volume d'aria costante. (*Fonti: Blog Geostru*)

Tali incrementi sono dovuti da un numero limitato di progettisti e tecnici installatori, che propongono soluzioni convenzionali più semplici, conosciute e meno innovative, una mancanza di integrazione fra il settore delle perforazioni e quello degli installatori che tradizionalmente lavorano in ambiti completamente diversi, concludendo con la mancanza di riferimenti legislativi certi e concessioni autorizzative molto variabili (si passa dalle più blande che sono basate sul silenzio/assenso, ad altre eccessivamente vincolanti), nonostante bonus e sgravi fiscali stanziati dal governo .

Rischi ambientali

Qualsiasi perforazione nel sottosuolo comporta un potenziale rischio ambientale, la loro progettazione e gestione devono confrontarsi con una serie di problematiche complesse, che incidono sull'efficienza a lungo termine, sulla durabilità delle componenti e sull'impatto sul sottosuolo.

Problematica del Congelamento

Quando l'estrazione di calore supera la capacità termica del terreno, si possono verificare variazioni significative della temperatura attorno alle sonde: in inverno il terreno può raffreddarsi fino a raggiungere temperature di congelamento, mentre in estate può riscaldarsi oltre valori ottimali. Tali variazioni alterano l'efficacia dello scambio termico e possono determinare instabilità funzionali, con conseguente degrado delle prestazioni dell'impianto nel tempo. Il terreno attorno alle sonde geotermiche verticali può subire un abbassamento della temperatura fino sotto lo zero durante periodi di forte estrazione di calore in inverno. Ciò può portare alla formazione di ghiaccio nel suolo (frost

heave), il processo per cui l'energia termica sottratta dal sottosuolo causa la cristallizzazione dell'acqua nei pori del terreno. Il congelamento del terreno attorno alle sonde comporta una transizione di fase dell'acqua presente negli spazi porosi. Questo processo comporta un aumento della resistenza termica del suolo e una diminuzione dell'efficienza dello scambio termico. In condizioni di operazioni prolungate con fluidi di temperatura molto bassa, lo strato di suolo che entra in fase di congelamento si estende progressivamente attorno al collettore, portando a un aumento dell'inerzia termica e a un possibile "effetto batteria fredda", che riduce la performance del sistema.

Numerosi studi numerici mostrano come la presenza di acqua di falda e la sua dinamica influenzino la formazione di zone congelate e la distribuzione termica attorno alle sonde. Per esempio, in modelli tridimensionali si osserva che lo stato di congelamento dipende fortemente dal profilo termico locale e dalle proprietà termofisiche del terreno, così come dal regime di flusso della falda acquifera.

Il congelamento del suolo non rappresenta unicamente una variazione termica: nei terreni coesivi e nei climi freddi il fenomeno può indurre fenomeni di frost heave tali da apportare modifiche alla struttura del terreno (espansione volumetrica durante la fase di congelamento), un'alterazione del deflusso idrico superficiale e sotterraneo e uno stress sulle infrastrutture superficiali, con potenziali effetti meccanici sulle strutture circostanti (pavimentazione, tubazioni) e sugli stessi scambiatori interrati.

Una progettazione adeguata deve includere simulazioni termiche che considerino i cicli annuali di congelamento/sgelamento e le caratteristiche termofisiche del terreno. Tecniche avanzate di modeling termico (analitico e numerico) consentono di prevedere l'evoluzione della temperatura del suolo attorno alle sonde geotermiche, aiutando a dimensionare correttamente lunghezza dei pozzi e densità di perforazione.

Formazione del Biofilm

Un biofilm è una comunità di microrganismi (batteri, funghi) che aderiscono a una superficie e sono avvolti da una matrice di sostanze polimeriche extracellulari (EPS). Questa struttura microbica può svilupparsi in ambiente umido e termicamente variabile, come all'interno di circuiti idraulici e sulle superfici di scambiatori di calore. Il biofilm è noto per la sua capacità di ridurre drasticamente la conducibilità termica tra due superfici, ostacolando lo scambio di calore e aumentando l'usura delle superfici stesse. Sebbene la letteratura specifica sui biofilm negli impianti geotermici sia ancora poco ampia, alcuni studi condotti su impianti geotermici di maggiore scala e in sistemi con flussi d'acqua termale mostrano come biofilm di batteri solfato-riduttori (SRB) e altri microbi possano aderire alle superfici, contribuendo a corrosione microbica (MIC) e a depositi minerali (scaling) che compromettono l'efficienza degli scambiatori e la vita utile dei componenti metallici (S. Gjengedal et al., 2019)[21]. In caso di impianti a circuito aperto (cioè che utilizzano acqua di falda), la presenza di microrganismi nella falda può portare all'adesione di biofilm sulle pareti dei tubi, pompe e superfici di scambio, riducendo la capacità di trasferimento termico e aumentando l'energia richiesta per mantenere lo stesso livello di prestazione dell'impianto. I biofilm favoriscono processi di corrosione, soprattutto in presenza di gruppi microbici come gli SRB, che riducono solfati e accelerano la corrosione sotto-deposito. I risultati sperimentali in impianti geotermici mostrano come la presenza di biofilm sia correlata a un aumento dei tassi di corrosione e al deposito di prodotti di corrosione.

In alcuni casi, trattamenti come shock termici temporanei sono stati testati con successo per ridurre la formazione di biofilm e i processi di corrosione associati.

Oltre alle superfici impiantistiche, biofilm microbici possono svilupparsi anche nelle fratture del suolo e nei pori attorno alle sonde geotermiche, dove umidità, nutrienti organici e temperature moderate favoriscono l'attività microbi-

ca. La presenza di tali comunità può alterare le proprietà idrauliche e termiche locali del terreno e contribuire alla formazione di depositi minerali complessi che ostruiscono i percorsi di flusso.

Nei circuiti suscettibili alla formazione di biofilm, è utile considerare misure di trattamento periodico, controllo della qualità del fluido e tecniche di movimentazione del fluido che riducano l'adesione microbica.

In sistemi di scala industriale, l'uso di shock termici controllati è stato dimostrato efficace nel ridurre biofilm e corrosione. Le sfide termiche e microbiologiche negli impianti geotermici non sono uniche ma rappresentano aspetti complementari indispensabili da considerare per garantire affidabilità, efficienza e sostenibilità a lungo termine. Il congelamento del suolo può ridurre l'efficienza termica degli scambiatori e richiede progettazioni basate su modelli termodinamici dettagliati, mentre la formazione di biofilm, pur meno documentata nei sistemi a bassa entalpia residenziali, può compromettere gli scambi termici e favorire corrosione nei sistemi a circuito aperto o industriali. Azioni di monitoraggio continuo, modellazione avanzata e approcci di manutenzione specifici sono quindi essenziali per la mitigazione di tali fenomeni.

2.4 Considerazioni sul futuro energia geotermica in Italia

Le previsioni al 2030 indicano che la geotermia a bassa entalpia può assumere un ruolo crescente nel mix energetico italiano per la climatizzazione degli edifici. Nonostante la crescita prevista, il potenziale tecnico rimane in larga parte inesplorato. Politiche mirate, unite a una maggiore consapevolezza dei benefici ambientali ed economici, potrebbero consentire una diffusione più rapida e capillare della tecnologia

2.4.1 Previsioni di utilizzo della geotermia in Italia fino al 2030

Nel contesto della transizione energetica europea, la riduzione delle emissioni climalteranti associate ai consumi termici rappresenta una delle principali sfide per il raggiungimento degli obiettivi climatici al 2030. In Italia, il settore civile è responsabile di una quota significativa dei consumi energetici finali, in larga parte destinati al riscaldamento e al raffrescamento degli edifici. In tale ambito, la geotermia a bassa entalpia si configura come una tecnologia particolarmente promettente, in grado di fornire energia termica rinnovabile con elevata efficienza e continuità di esercizio. A differenza della geotermia ad alta entalpia, storicamente sfruttata in Italia per la produzione elettrica in aree specifiche, la geotermia a bassa entalpia presenta una diffusa applicabilità territoriale, rendendola adatta sia al settore residenziale che a quello terziario e industriale leggero.

Il presente capitolo si propone di analizzare l'evoluzione attesa dell'utilizzo di questa tecnologia in Italia fino al 2030, attraverso una previsione basata su trend storici, scenari di policy e modelli di diffusione tecnologica. Negli ultimi due decenni, l'installazione di impianti geotermici a bassa entalpia in Italia ha mostrato una crescita progressiva, seppur disomogenea sul territorio nazionale. Tale diffusione è stata trainata principalmente dall'introduzione delle pompe di calore geotermiche, dall'aumento dei costi delle fonti fossili e dal rafforzamento dei meccanismi di incentivazione per l'efficienza energetica degli edifici.

Secondo stime basate su dati ENEA e GSE, nel periodo 2010–2024 la potenza termica installata è passata da valori inferiori a 500 MW_t a circa 1.300–1.500 MW_t. La distribuzione geografica evidenzia una forte concentrazione nel Nord Italia, dove la maggiore diffusione di edifici di nuova costruzione, unitamente a una maggiore capacità di investimento, ha favorito l'adozione di sistemi geotermici (Fig.32).

Anno	Potenza installata (MW _t)
2010	450
2015	750
2020	1100
2024	1400

Fig.32 - Potenza termica installata delle pompe di calore geotermiche in Italia.(Unione Geotermica Italiana,2015)

Questa crescita, tuttavia, risulta ancora limitata se confrontata con il potenziale tecnico nazionale stimato in diversi studi, che indicano valori di diversi GW_t sfruttabili, soprattutto in ambito urbano e periurbano. La previsione dell'evoluzione dell'utilizzo della geotermia a bassa entalpia fino al 2030 è stata condotta adottando un approccio di tipo scenario-based, integrato con un modello di diffusione tecnologica di tipo logistico (Viti,2021)[22]. Tale approccio è ampiamente utilizzato nella letteratura energetica per descrivere l'adozione progressiva di tecnologie rinnovabili, caratterizzate da una fase iniziale di crescita lenta seguita da una fase di accelerazione e, infine, da una saturazione.

Le variabili considerate nel modello includono:

- la dinamica storica della potenza installata;
- l'evoluzione dei costi di investimento degli impianti;
- il quadro normativo e incentivante;
- il prezzo dell'energia elettrica e dei combustibili fossili;
- gli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni.

Sono stati definiti tre scenari di sviluppo:

- Scenario di riferimento (BAU), basato sul proseguimento delle tendenze attuali;
- Scenario di crescita accelerata, che ipotizza un rafforzamento degli incentivi e una semplificazione autorizzativa;
- Scenario conservativo, caratterizzato da una riduzione del supporto politico e da vincoli economici.

I risultati indicano che, nello scenario di riferimento, la potenza installata di geotermia a bassa entalpia in Italia potrebbe raggiungere valori compresi tra 2.200 e 2.400 MW_t entro il 2030. Nello scenario di crescita accelerata, tale valore potrebbe superare i 3.000 MW_t, mentre nello scenario conservativo la crescita risulterebbe più contenuta(Fig.33).

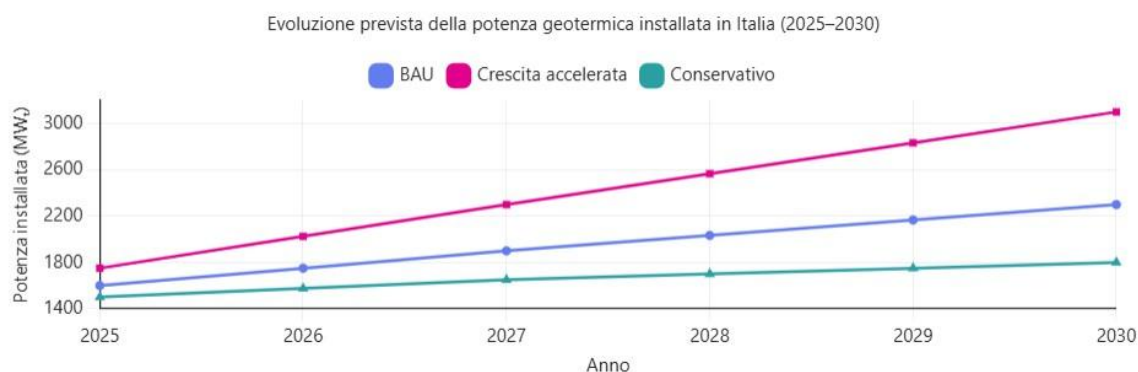


Fig.33 - Proiezione della potenza geotermica installata in Italia nel periodo 2025–2030 in tre scenari: Business As Usual (BAU), crescita accelerata e scenario conservativo (The European House – Ambrosetti2024).

Assumendo un numero medio di ore equivalenti annue compreso tra 1.800 e 2.200 ore, la produzione di energia termica da geotermia a bassa entalpia potrebbe raggiungere, nello scenario BAU, circa 4,5–5 TWh_t/anno nel 2030, con valori superiori a 6 TWh_t/anno nello scenario più favorevole.

Tali valori contribuirebbero in maniera significativa alla riduzione dei consumi di gas naturale nel settore civile, con effetti positivi sia in termini di sicurezza energetica sia di riduzione delle emissioni di CO₂. I risultati ottenuti risultano coerenti con le traiettorie di diffusione delle pompe di calore previste a livello europeo. Tuttavia, la crescita della geotermia a bassa entalpia in Italia appare ancora inferiore rispetto a Paesi come Germania, Svezia e Svizzera, dove politiche di lungo periodo e un quadro normativo più stabile hanno favorito una penetrazione più rapida.

Le variabili più influenti sul processo di sviluppo della geotermia sono correlate al livello degli incentivi economici e la semplificazione delle procedure autorizzative per le perforazioni. In assenza di interventi strutturali su questi aspetti, la tecnologia rischia di rimanere confinata a nicchie di mercato.

2.4.2. Quadro normativo

La normativa recente sulla geotermia nella Regione Puglia è principalmente influenzata da disposizioni nazionali che semplificano l'installazione di impianti a bassa entalpia e da aggiornamenti regionali più ampi in materia di energie rinnovabili e gestione delle acque.

Normativa Nazionale di Riferimento

A livello nazionale, il Decreto del Ministero della Transizione Ecologica 30 settembre 2022 ha introdotto semplificazioni per l'installazione di impianti geotermici a bassa entalpia:

Prevede un iter autorizzativo semplificato (comunicazione o autorizzazione unica a seconda delle caratteristiche) per gli impianti che rispettano determinati parametri.

Le sonde geotermiche devono estendersi, se verticali, a profondità non superiori a 170 metri e avere una potenza termica limitata per rientrare nelle semplificazioni.

Aggiornamenti Normativi Regionali (2024-2025)

La Regione Puglia ha emanato diversi provvedimenti recenti che, sebbene non specificamente dedicati solo alla geotermia, ne definiscono il contesto autorizzativo ed energetico:

Legge di Stabilità Regionale 2024 (L.R. 29 dicembre 2023, n. 37, art. 19): ha introdotto modifiche per il settore delle energie rinnovabili, con l'obiettivo di promuovere ulteriormente queste fonti.

Legge Regionale 30 maggio 2025, n. 7 ("Disciplina delle acque"): regola l'uso delle acque sotterranee, un aspetto cruciale per gli impianti geotermici a circuito aperto. Prevede l'obbligo di dichiarazione dei pozzi esistenti non autorizzati e la verifica del corretto uso idrico.

Deliberazione della Giunta Regionale 7 luglio 2025, n. 933: ha approvato le linee guida per la disciplina del procedimento di Autorizzazione Unica per la costruzione e l'esercizio di impianti di produzione e stoccaggio di energia elettrica da fonte rinnovabile.

Anagrafe Regionale Impianti di Geoscambio (ARIG): la Regione ha istituito e gestisce un'anagrafe degli impianti di geoscambio, accessibile tramite il portale SIT Puglia Ambiente, per monitorare la diffusione e l'impatto di questi impianti sul territorio.

Aggiornamento del Piano Energetico Ambientale Regionale (PEAR): a settembre 2025 (Dgr Puglia 11 settembre 2025, n. 1280), è stato avviato l'aggiornamento del PEAR, che definirà le future strategie e le zone idonee per l'installazione di impianti FER, inclusa la geotermia.

In sintesi, la Regione Puglia sta lavorando per integrare la geotermia nel suo piano energetico generale, allineandosi alle semplificazioni nazionali e gestendo l'uso delle risorse idriche attraverso una normativa regionale aggiornata.

2.4.3. Strategie per la transizione energetica, i distretti energetici

Negli ultimi anni, la transizione verso sistemi energetici sostenibili ha spinto l'implementazione di tecnologie innovative nei settori del teleraffrescamento e teleriscaldamento, nei quali gli impianti geotermici svolgono un ruolo cruciale nella fornitura di energia. Essi contribuiscono non solo all'approvvigionamento energetico rinnovabile ma anche alla stabilità dei prezzi energetici, riducendo la dipendenza da combustibili fossili (Bertani, 2016)[23].

In particolare, i sistemi di quinta generazione rappresentano un'evoluzione significativa rispetto ai modelli precedenti, integrando risorse energetiche rinnovabili e ottimizzando l'efficienza energetica nei distretti urbani. Questo capitolo esplora i principi fondamentali, le tecnologie coinvolte e le applicazioni di tali sistemi nei distretti energetici alimentati da impianti geotermici.

I sistemi di teleraffrescamento e teleriscaldamento di quinta generazione, noti anche come sistemi di distribuzione tecnologicamente avanzati, si caratterizzano per la loro capacità di operare a temperature più basse rispetto ai tradizionali sistemi di quarta generazione.

Questo approccio consente un'integrazione più efficiente con le fonti rinnovabili, come il geotermico, il quale sfrutta il calore naturale della Terra per il riscaldamento e la refrigerazione.

Uno degli aspetti distintivi di questi sistemi è l'uso di reti di distribuzione che operano a temperature variabili, solitamente comprese tra i 25°C e i 45°C per il riscaldamento e tra i 5°C e i 20°C per il raffrescamento. Ciò riduce le perdite di energia e migliora l'efficienza complessiva del sistema (Lazzarin et al., 2019)[24]. Inoltre, l'integrazione con sistemi di accumulo termico e pompe di calore aumenta la flessibilità operativa, permettendo una gestione più efficiente della domanda energetica.

3. Studio di un sistema di geo scambio termico innovativo

3.1. Obiettivo della sperimentazione

L'obiettivo della sperimentazione è stato quello di valutare le performance di una geo-scambiatore innovativo progettato per migliorare l'efficienza energetica e ridurre i costi associati ai sistemi di riscaldamento e raffreddamento, nonché di accumulo geotermici. Tale geo-scambiatore è un prototipo realizzato dalla spin off accademica del Politecnico di Bari Geo Environmental Energy Technologies srl.

Si tratta di un sistema di geoscambio termico a circuito chiuso installato in foro, in grado di ottimizzare la superficie di scambio termico per unità di lunghezza, permettendo un migliore trasferimento di calore tra il sottosuolo e il fluido termovettore. Grazie alla tecnologia dello scambio ed al miglioramento del rendimento si è riusciti a migliorare l'estrazione di calore dal sottosuolo. Risulta quindi una tecnologia promettente per l'abbattimento dei costi iniziali legati alla perforazione grazie al fatto che lo scavo/perforazione per la sua installazione avrebbe dimensioni più contenute rispetto ai sistemi tradizionali. L'integrazione di sensori per monitorare la temperatura e il flusso del fluido in tempo reale, insieme a sistemi di controllo avanzati ed automatizzati, consentono di ottimizzare continuamente il funzionamento del sistema.

È stata prevista la possibilità di modulare e scalare il sistema in base alle specifiche esigenze energetiche degli edifici o delle strutture, rendendo l'installazione più flessibile e adattabile.

Le innovazioni introdotte mostrano la potenzialità di aumentare il rendimento del sistema, ridurre i costi operativi e di manutenzione, rendendo la soluzione geotermica più accessibile ed attraente per una vasta gamma di applicazioni, dai piccoli edifici residenziali ai grandi complessi industriali.

3.2. Descrizione del setup Sperimentale in laboratorio

È stato allestito un modello fisico di laboratorio per indagare sperimentalmente le prestazioni termiche di tale nuovo geo-scambiatore di calore verticale (Fig.34).

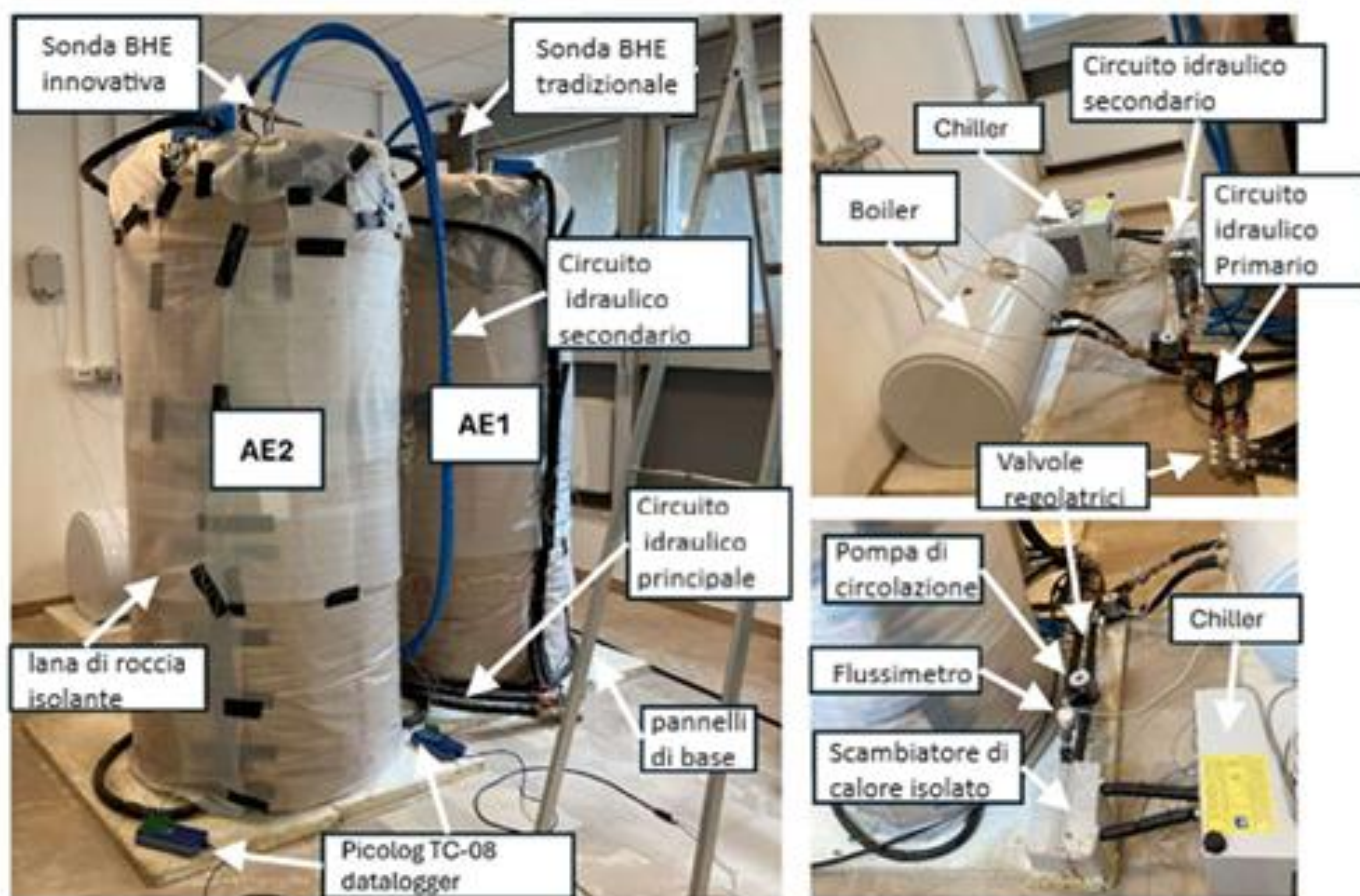


Fig.34 – Modello fisico di laboratorio allestito per lo studio del geo-scambiatore innovativo.

Il sistema sperimentale è composto da due ambienti artificiali (AE1 e AE2) che imitano le condizioni del terreno. Ogni ambiente artificiale è costituito da un serbatoio verticale cilindrico in polietilene con diametro interno di 0,8 m e altezza di 2,18 m, con un volume di stoccaggio di 1 m³. Ogni serbatoio è riempito con granuli di calcare dalla forma irregolare e diametro medio di 0,006 m, saturati con acqua. La superficie superiore e laterale di ciascun serbatoio è stata isolata usando rotoli di lana di roccia, mentre per l'isolamento del fondo sono stati utilizzati pannelli in schiuma di polietilene estruso. Lungo la superficie laterale dei serbatoi sono disposti delle tubazioni in PEX a spirale in modo da poter preriscaldare gli ambienti artificiali a una temperatura prestabilita.

A questo scopo, tali tubazioni sono collegate tramite un primo circuito idraulico a una caldaia elettrica termostata, caratterizzata da un volume di 0,2 m³ e una resistenza termica di 2000 W. Al centro di ciascun ambiente artificiale è stato installato uno geo-scambiatore di calore verticale. In particolare, il BHE innovativo e un BHE coassiale sono stati installati rispettivamente in AE2 e AE1. I BHE sono in grado di recuperare calore dagli ambienti artificiali mediante un secondo circuito idraulico collegato a un refrigeratore (EURO COLD ACW-LP 12) caratterizzato da una capacità di raffreddamento nominale di 1420 W e temperatura di uscita nell'intervallo da 5°C a 15°C. Come fluido termo vettore di calore è stata utilizzata acqua di sorgente. In ciascun ambiente artificiale sono stati installati quattro

termocoppie di tipo K per monitorare le variazioni di temperatura a diverse distanze dalla parete e dalla profondità dei BHE.

In particolare, le termocoppie sono state disposte a profondità di $z = 0,5$ m e $z = 1,0$ m dalla sommità degli ambienti artificiali e a distanze di $r = 0,05$ m e $r = 0,02$ m dalla parete dei BHE.

Lo scambiatore coassiale consiste in un tubo interno termicamente isolato composto da un tubo PEX con diametro esterno di 0,016 m e diametro interno di 0,0115 m, inserito in un tubo in PVC con diametro esterno di 0,032 m e diametro interno di 0,0284 m. Tra il tubo PEX e il tubo in PVC è incapsulata della schiuma di poliuretano. Un tubo esterno in PVC con diametro esterno di 0,110 m e diametro interno di 0,1016 m, disposto coassialmente rispetto al tubo interno di distribuzione, costituisce il tubo di ritorno. All'interno dello scambiatore di calore coassiale sono stati installati due termocoppie per osservare le variazioni di temperatura all'uscita del tubo interno termicamente isolato e all'uscita del tubo esterno in PVC.

Secondo la domanda di brevetto italiano n° 102024000010582, è stato costruito un primo prototipo del BHE innovativo ed è stato testato attraverso il modello fisico di laboratorio descritto in precedenza. Come mostrato in (Fig.35a), il prototipo consiste essenzialmente in un set di piastre circolari in acciaio aventi un diametro di 0,154 m e uno spessore di 0,002 m, con otto fori interni e otto fori esterni che permettono il passaggio del fluido termovettore e dell'acqua sotterranea all'interno del prototipo. Un totale di 36 guarnizioni NBR interne ed esterne, con uno spessore di 0,004 m, sono disposte lungo la parte superiore e inferiore delle superfici della piastra circolare in acciaio.

Un elemento di chiusura inferiore e uno superiore consentono il passaggio dell'acqua sotterranea dall'ambiente artificiale alle piastre circolari e viceversa, e il passaggio del fluido termovettore dai tubi di mandata/ritorno alle piastre circolari e viceversa. Il flusso di acqua sotterranea all'interno del prototipo può essere facilitato mediante l'attivazione di una pompa sommersa DC da 12V. Le guarnizioni sono configurate per consentire il passaggio del fluido termovettore e dell'acqua sotterranea e la loro diffusione radiale sulla superficie superiore e inferiore di ciascuna piastra circolare in acciaio rispettivamente (Fig. 35b).

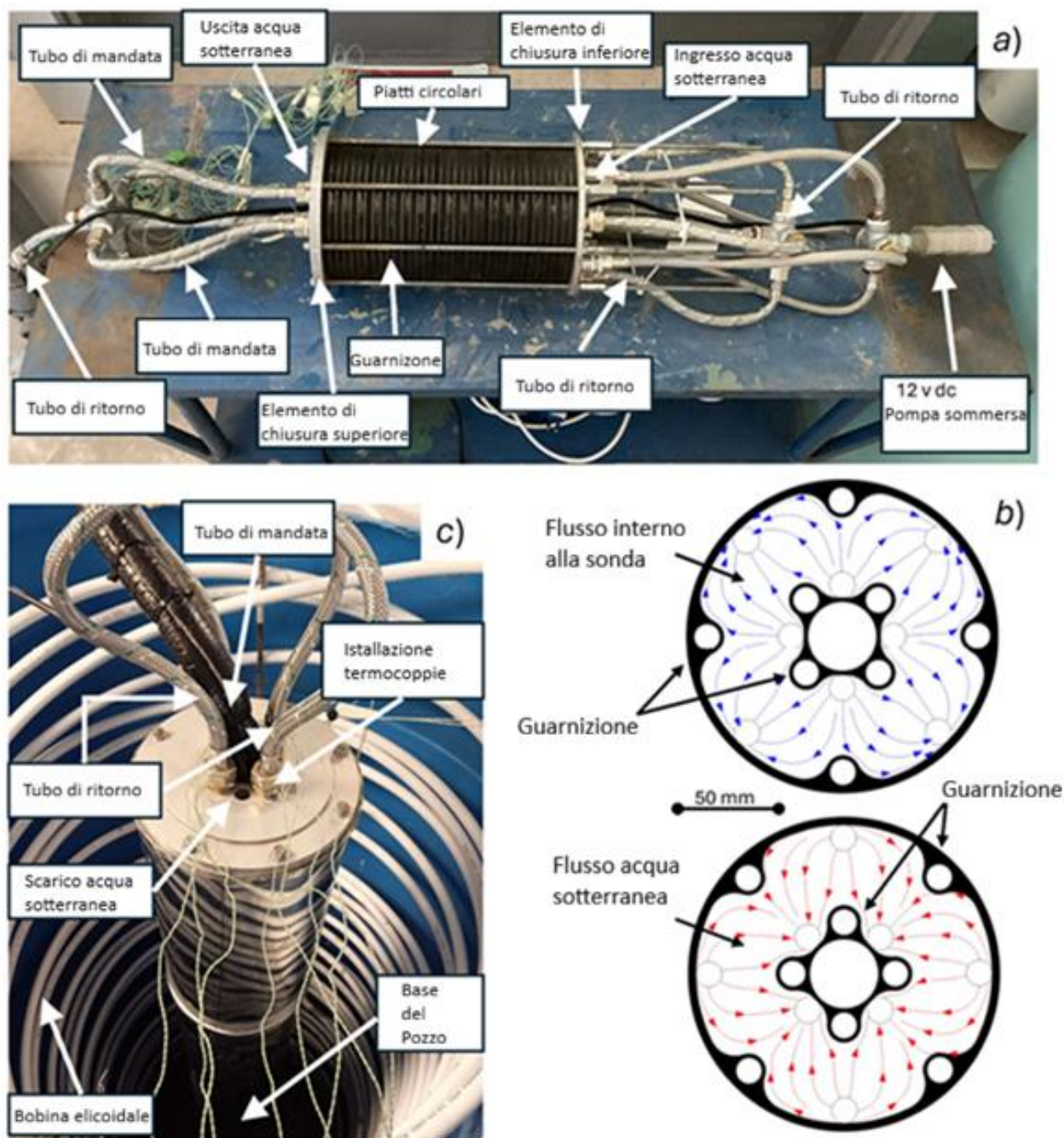


Fig.35 - Scambiatore di calore innovativo: a) prototipo secondo il brevetto italiano n° 102024000010582; b) configurazione della guarnizione per permettere il flusso in controcorrente del fluido termovettore e dell'acqua sotterranea; c) installazione del prototipo nell'ambiente artificiale AE2 prima del riempimento con il materiale granulare.

Il prototipo del BHE innovativo permette i flussi di acqua sotterranea al suo interno. Esso è racchiuso all'interno di un tubo d'acciaio finestrato lungo 2 m e con diametro di 0,18 m. Il tubo di acciaio è caratterizzato da un tratto finestrato superiore e uno inferiore caratterizzati da una lunghezza rispettivamente di 0,20 e 0,90 m (Fig. 35c). Otto termocoppie sono installate in corrispondenza degli elementi di chiusura superiore e inferiore per monitorare la temperatura del fluido termovettore all'ingresso e all'uscita del prototipo.

3.3. Risultati e discussioni della sperimentazione in laboratorio

Sono stati condotti diversi test di risposta termica in condizioni considerate come adiabatiche per l'isolamento termico dei due ambienti artificiali (AE1, AE2) (Figg. 36, 37, 38 e 39). I test sono iniziati al mattino intorno alle 10:00 e si sono conclusi nel pomeriggio intorno alle 16:00, per una durata di circa 6 ore. È stato eseguito un set di quattro test in una settimana, da lunedì a giovedì. In precedenza, gli ambienti artificiali sono stati riscaldati fino a quando tutte le termocoppie hanno registrato una temperatura ambiente di circa 30 °C. Ogni test inizia quando il refrigeratore e la pompa di circolazione del secondo circuito idraulico sono stati accesi.

In precedenza, il secondo circuito idraulico è stato calibrato al fine di ottenere una portata del fluido termovettore di $6,667 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. La temperatura negli ambienti artificiali e all'ingresso e all'uscita dei BHE è monitorata continuamente con un intervallo di 60 s.

A questo scopo, le termocoppie sono state collegate ai datalogger Picolog TC-08. Per quanto riguarda il nuovo BHE riempito d'acqua di falda, la pompa di circolazione è stata accesa per 600 s e spenta per 180 s. La portata della pompa di circolazione è stata impostata uguale alla portata del fluido termovettore.

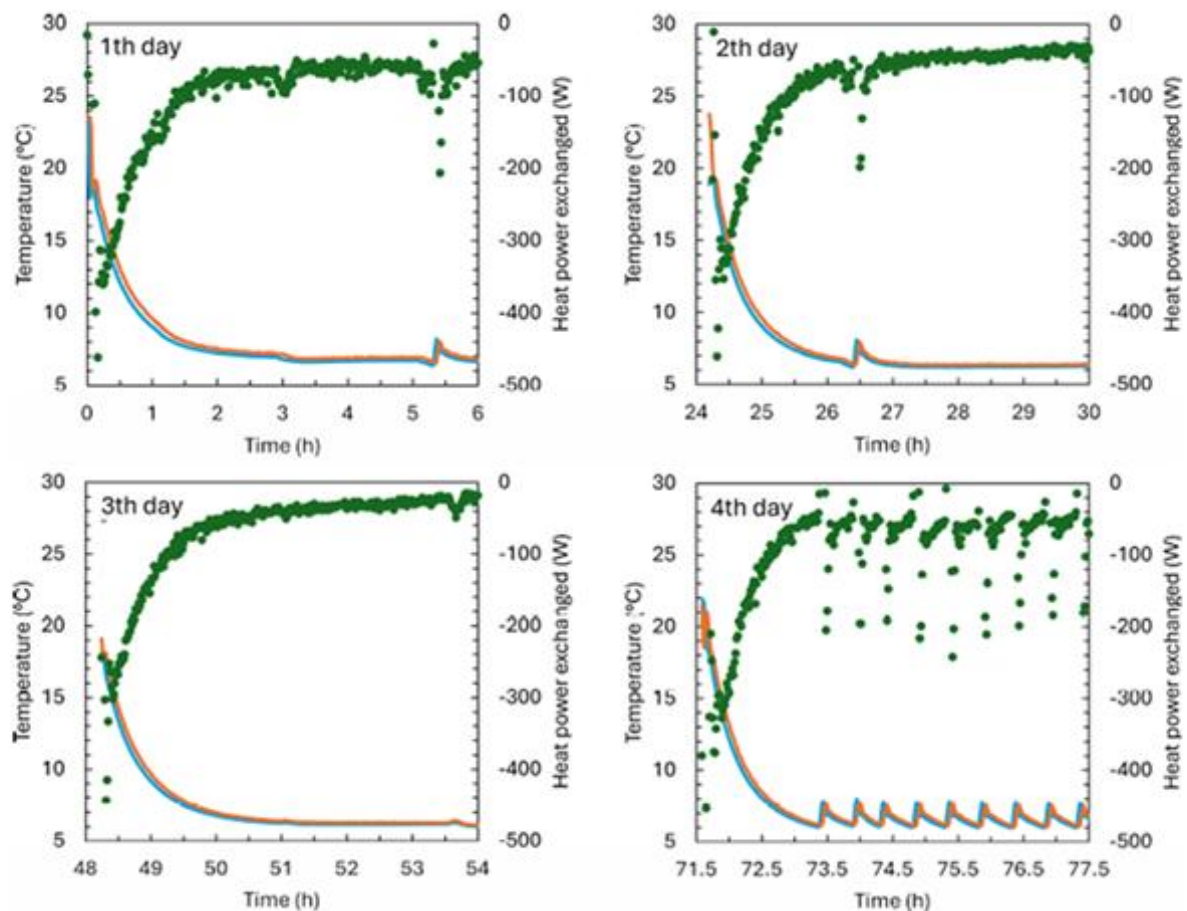


Fig.36 - Risultati del test di risposta termica condotto tra il 30 giugno 2023 e il 3 luglio 2023 sul BHE coassiale. Temperatura in ingresso (linea arancione), temperatura in uscita (linea ciano), potenza termica scambiata (puntini verdi).

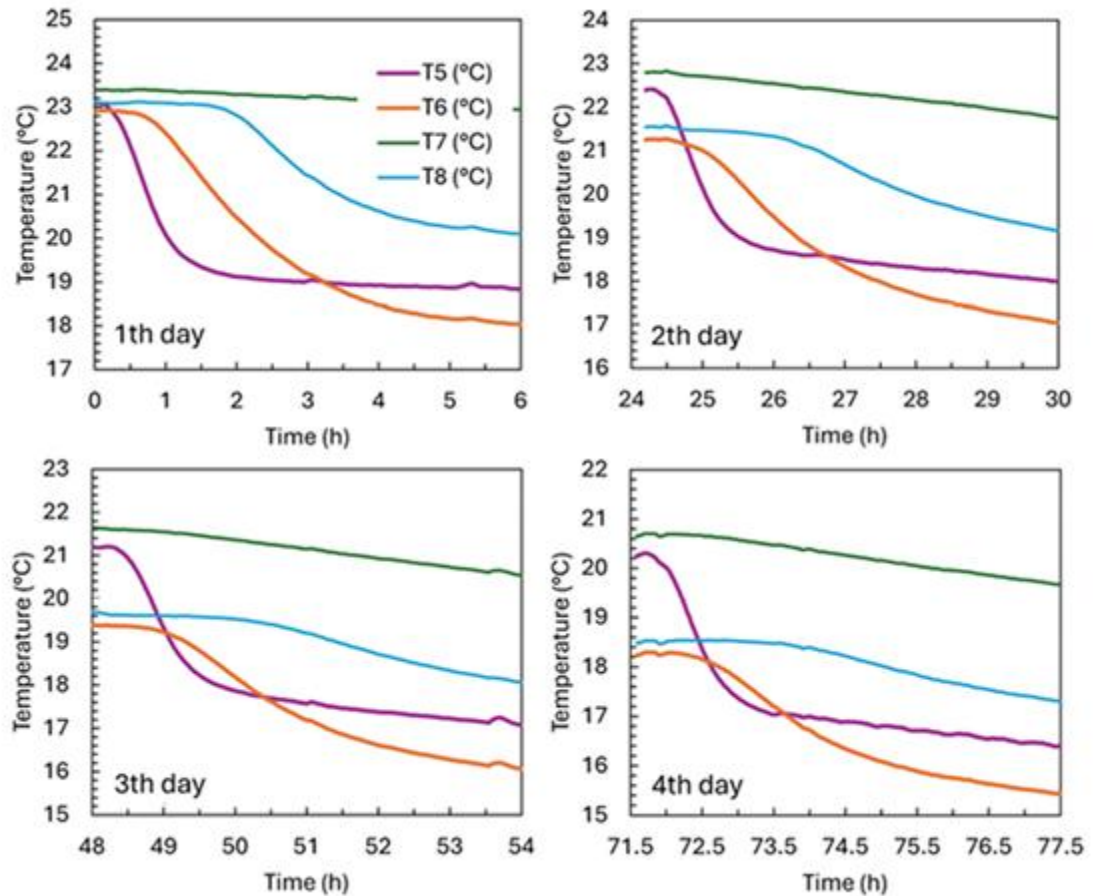


Fig. 37 - Temperatura monitorata all'interno dell'ambiente artificiale AE1 alla profondità z dalla parte superiore dell'ambiente artificiale e alla distanza r dalla parete del BHE durante il test di risposta termica condotto tra il 30 giugno 2023 e il 3 luglio 2023 sul nuovo BHE riempito di acqua sotterranea. T5 ($z = 0,5$ m; $r = 0,05$ m); T6 ($z = 1,0$ m; $r = 0,05$ m); T7 ($z = 0,5$ m, $r = 0,2$ m); T8 ($z = 1,0$ m, $r = 0,20$ m).

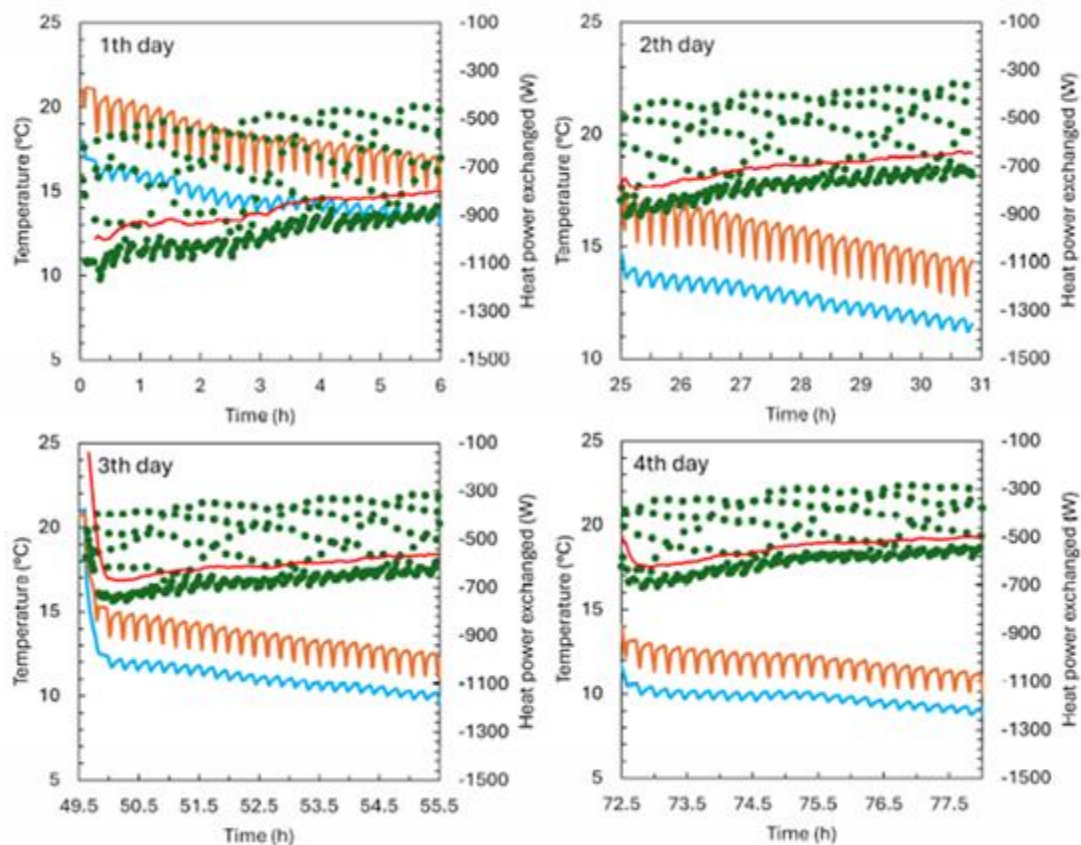


Fig. 38 - Risultati del test di risposta termica condotto tra il 29 settembre 2023 e il 2 ottobre 2023 sul nuovo BHE riempito d'acqua di falda. Temperatura in ingresso (linea arancione), temperatura in uscita (linea ciano), potenza termica scambiata (puntini verdi), media mobile a 780 s della potenza termica scambiata (linea rossa).

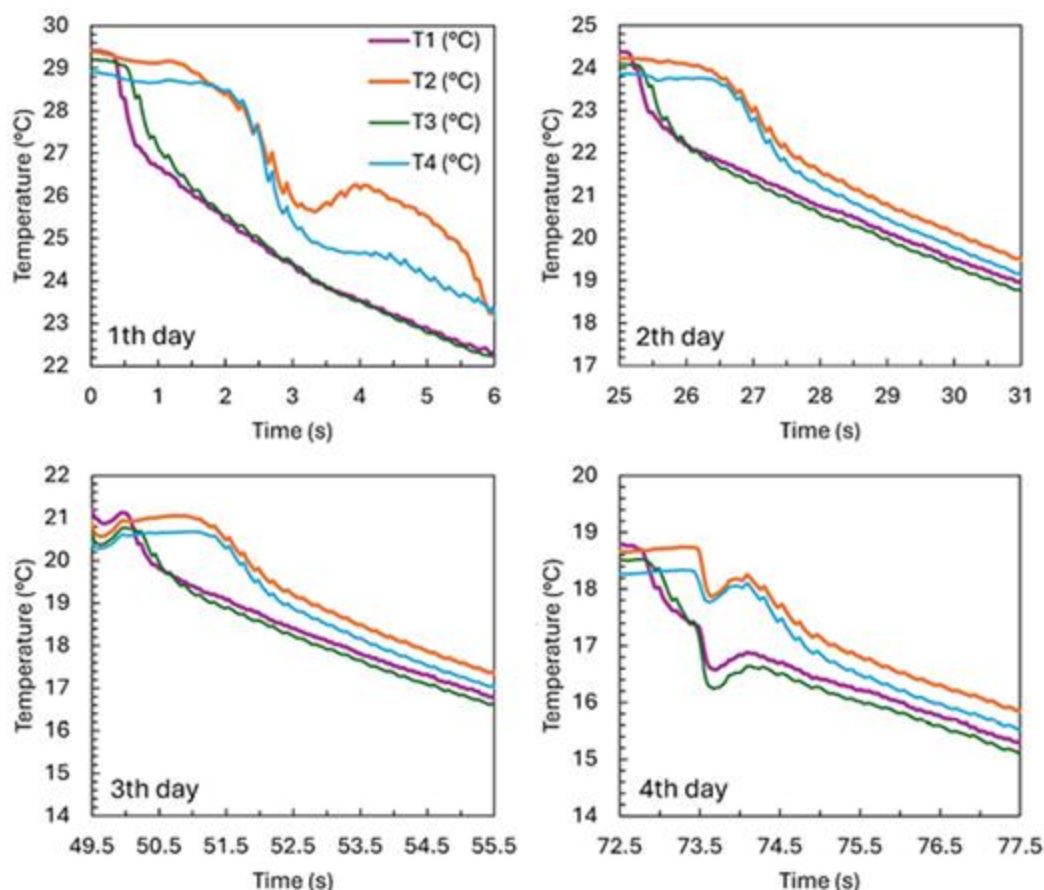


Fig. 39 - Temperatura monitorata all'interno dell'ambiente artificiale AE2 alla profondità z dalla parte superiore dell'ambiente artificiale e alla distanza r dalla parete del BHE durante il test di risposta termica condotto tra il 29 settembre 2023 e il 2 ottobre 2023 sul nuovo BHE riempito di acqua sotterranea. T1 ($z = 0,5$ m; $r = 0,05$ m); T2 ($z = 1,0$ m; $r = 0,05$ m); T3 ($z = 0,5$ m, $r = 0,2$ m); T4 ($z = 1,0$ m, $r = 0,20$ m).

La (Fig. 36) mostra i risultati del test di risposta termica condotto tra il 30 giugno 2023 e il 3 luglio 2023 sul BHE coassiale installato sull'AE1. Il trend osservato della potenza termica scambiata è coerente con quello osservato nei BHE convenzionali in campo. La potenza termica scambiata diminuisce in modo potenziale raggiungendo una stabilizzazione a partire da 2 ore, entro un intervallo compreso tra -100 e -40 W, in cui la potenza termica scambiata diminuisce lentamente. Il trend delle temperature osservate con l'AE1 (Fig.37) mostra che la diffusione del calore è il meccanismo dominante del trasporto di calore. All'interno del mezzo poroso è presente una stratificazione verticale della temperatura secondo la distribuzione termica all'interno del tubo esterno del BHE coassiale.

La (Fig. 38) mostra i risultati del test di risposta termica condotto tra il 29 settembre 2023 e il 2 ottobre 2023 sul nuovo BHE riempito di acqua sotterranea installato sull'AE2. L'esperimento evidenzia un'efficienza molto elevata nello scambio di calore del nuovo BHE riempito di acqua sotterranea, che mantiene una grande stabilità nello scambio termico. Quando la pompa di circolazione è attiva, la differenza di temperatura monitorata tra l'ingresso e l'uscita del nuovo BHE aumenta e viene recuperata molta più energia termica, con valori di un ordine di grandezza superiori a quelli del BHE coassiale.

Come mostrato nella (Fig. 39), i fenomeni convettivi sono il principale meccanismo di trasporto del calore all'interno del mezzo poroso. La pompa di circolazione estrae l'acqua sotterranea dal fondo dell'AE2. Poi, all'interno del nuovo BHE, la temperatura dell'acqua sotterranea diminuisce e l'acqua viene reiniettata nella parte superiore dell'AE2.

Come evidenziato nei risultati sperimentali, il nuovo BHE sviluppato e testato mostra un grande potenziale di scambio termico rispetto alle tecnologie BHE convenzionali. Avendo un contesto idrogeologico favorevole, il costo di installazione di un sistema geotermico poco profondo può essere notevolmente ridotto. Quindi la convenienza del nuovo BHE riempito d'acqua sotterranea è legata alla profondità della falda acquifera e alla conducibilità idraulica dell'acquifero. La prima non dovrebbe essere superiore a 10-30 m, mentre la seconda non dovrebbe essere inferiore a 10^{-5} m/s.

Non sorprende che le principali agglomerazioni urbane si estendano in corrispondenza di acquiferi costieri caratterizzati da bassa profondità della falda e significativa circolazione dell'acqua. Inoltre, nelle aree costiere, la regione di intrusione dell'acqua salata sotto l'acquifero rappresenta una risorsa geotermica a bassa qualità ma vasta e profonda, dove il nuovo BHE può trovare un ampio impiego anche per l'accumulo di energia termica.

I risultati ottenuti hanno dimostrato che, in condizioni idrogeologiche favorevoli, è possibile ridurre il costo di installazione di un sistema geotermico superficiale sfruttando il trasferimento di calore convettivo dell'acqua sotterranea all'interno dei BHE. Questo concetto non è nuovo, ma i BHE riempiti di acqua sotterranea permettono di aumentare il trasferimento di calore per lunghezza unitaria del BHE migliorando l'efficienza dello scambio termico. Il prossimo paragrafo riguarda l'installazione del nuovo BHE riempito d'acqua di falda su scala di campo.

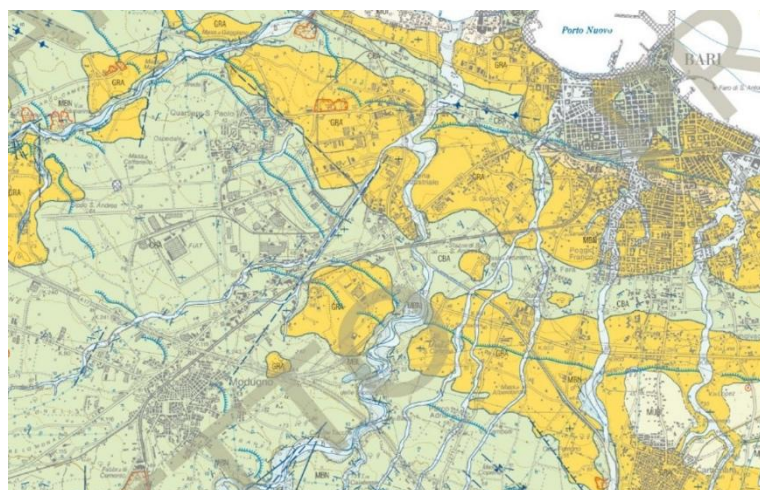
3.4. Descrizione del setup Sperimentale in campo

È stato realizzato un impianto dimostratore in campo al fine di valutare le prestazioni di un ulteriore prototipo del geo-scambiatore innovativo realizzato sempre dalla spin off accademica Geo Environmental Energy Technologies srl. Il prototipo è stato testato nell'area del contesto idrogeologico della città metropolitana di Bari (Italia) precedentemente investigato per analizzare le prestazioni della sonda. La città di Bari è caratterizzata da un clima semi-arido, con una temperatura media annua di 280,3 K e una radiazione solare media mensile pari a 144,11 kWh m⁻², che raggiunge un valore massimo di 238,47 kWh m⁻² nel mese di luglio e un minimo di 60,51 kWh m⁻² a dicembre. Nell'area di studio, la formazione del Calcere di Bari affiora estesamente ed è costituita da strati carbonatici separati da discontinuità meccaniche sub-orizzontali. Questi livelli carbonatici sono interessati da due sistemi ortogonali di fratture orientate rispettivamente N-S e WNW-ESE, caratterizzate da comportamento alternato di apertura e chiusura degli strati. La spaziatura di tali fratture è direttamente correlata allo spessore degli strati, che varia tra 0,15 e 1,20 m. La circolazione idrica sotterranea avviene all'interno della formazione carbonatica in condizioni freatiche o semiconfinare (Fig. 40).

I profili termici hanno evidenziato che, nell'ambiente superficiale del sottosuolo (<15 m dal piano campagna), le temperature rimangono relativamente elevate nonostante le variazioni stagionali, variando tra 291,65 e 293,65 K rispetto alle zone più profonde.

L'area costiera è caratterizzata da elevata trasmissività, generalmente compresi tra 10^{-4} m²/s e 10^{-3} m²/s e da una falda superficiale che presente una soggiacenza di 1–2 m dal piano campagna. Al contrario, le aree interne sono caratterizzate da minore trasmissività e da livelli di falda più profondi (30–40 m dal piano campagna).

Il prototipo, quindi, è stato installato in un'area interna alle coordinate geografiche 41°5'9.73" N e 16°47'46.96" E, all'interno delle Piscine Comunali di Modugno. In quest'area, la formazione del Calcere di Bari affiora al di sotto di circa 0,3 m di suolo superficiale. La falda acquifera è stata individuata a una profondità di 35 m dal piano campagna (Fig. 41).



CALCARE DI BARI

Calcari bianchi e grigio chiari in strati di spessore decimetrico e metrico costituiti da litofacies a tessitura prevalentemente fango-sostenuta (*mudstone/wackestone* biopeloidali e *bindstone* stromatolitici) e subordinatamente granulo-sostenuta (*packstone/grainstone* bioclastici e biopeloidali) a luoghi interessati da diagenesi meteorica e/o da pedogenesi (*floatstone/rudstone* intraclastici in matrice argillosa residuale) con frequenti intercalazioni di calcari dolomitici e di dolomie grigie. Nella parte inferiore e superiore del Calcare di Bari, sono stati riconosciuti calcari macrofossiliferi a molluschi (prevalentemente rudiste); si tratta di gruppi di strati costituiti da accumuli conchigliari autoctoni o para-autoctoni con tessitura prevalente di tipo *floatstone/rudstone*, corrispondenti, dal più antico al più recente, al "livello Palese", al "livello Sannicandro" e al "livello Toritto". Nella parte sommitale i *floatstone/rudstone* bioclastici sono alternati a *rudstone* intrabioclastici e a *mudstone/wackestone* bioturbati con tracce fossili tipo *Thalassinoides* sp. Nella parte medio-alta della successione si rinvengono bancate massive di breccie dolomitiche e di dolomie grigio scure a luoghi fittamente laminate (litofacies CBA₁) che si chiudono verso est; affiorano nel settore occidentale del foglio e corrispondono al "livello di breccie calcareo-dolomitiche" della precedente edizione della C.G.I. Ambiente di sedimentazione: gran parte del Calcare di Bari si è depositato in ambienti peritidali di piattaforma interna e solo nella parte sommitale sono stati riconosciuti ambienti di transizione da margine a bacino. Limite inferiore: non affiorante; limite superiore: affiora pochi chilometri a sud del limite meridionale del foglio e corrisponde ad una superficie erosiva netta, a luoghi marcata da depositi continentali residui (argille verde pallido), su cui poggia in trasgressione ed in discordanza angolare il Calcare di Altamura. Il Calcare di Bari rappresenta il substrato sedimentario su cui poggiano in discordanza tutte le unità più recenti. Lo spessore affiorante è di circa 470 m. Contenuto macropaleontologico: *Apricardia* sp., *Eoradiolites murgensis* e *Eoradiolites lyratus* ("livello Palese"); *Eoradiolites* sp., *Apricardia laevigata*, *Chondrodonta* cf. *joannae* ("livello Sannicandro"); *Sauvagesia sharpei*, *Sauvagesia nicaei*, *Sphaerucaprina foroulensis* e *Caprinula boissyi* ("livello Toritto"). Contenuto micropaleontologico (foraminiferi bentonici): Zona di associazione a: *Cuneolina sliteri*, *Praechrysalidina infracretacea*, *Sabaudia minuta*, *Vercorsella arenata*, *V. scarsellai* (Albiano inferiore p.p.). Zona di associazione a: "*Valdanchella*" *dercourtii*, *Neoiragia insolita*, *Paracostololina fleuryi*, *Praechrysalidina infracretacea* (Albiano superiore); Zona di associazione a: *Neoiragia* cf. *convexa*?, *Protochrysalidina elongata*, *Cuneolina pavonia* (transizione Albiano-Cenomaniano); Zona di associazione a: *Selliavolonia viallii*, *Cuneolina pavonia*, *Nezzazata conica*, *N. simplex*, *Pseudonummoloculina heimi* (Cenomaniano inferiore); Zona di associazione a: *Pseudolituonella reicheli*, *Pseudoraphydonina dubia*, *Biconcava bentoni*, *Trochospira avnimelechi*, *Broeckina* (*Pastrikella*) *balcanica*, *Biplanata peneropliformis*, *Cisalveolina fraasi*, *Chrysalidina gradata*, *Pseudonummoloculina heimi* (Cenomaniano medio-superiore).

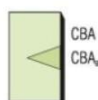


Fig.40 - Estratti Carta Geologica Italiana Foglio 438

Al fine di studiare l'efficienza del prototipo, è stato realizzato un sistema geotermico dimostratore volto a verificare, attraverso test di risposta termica la sua efficienza termica.

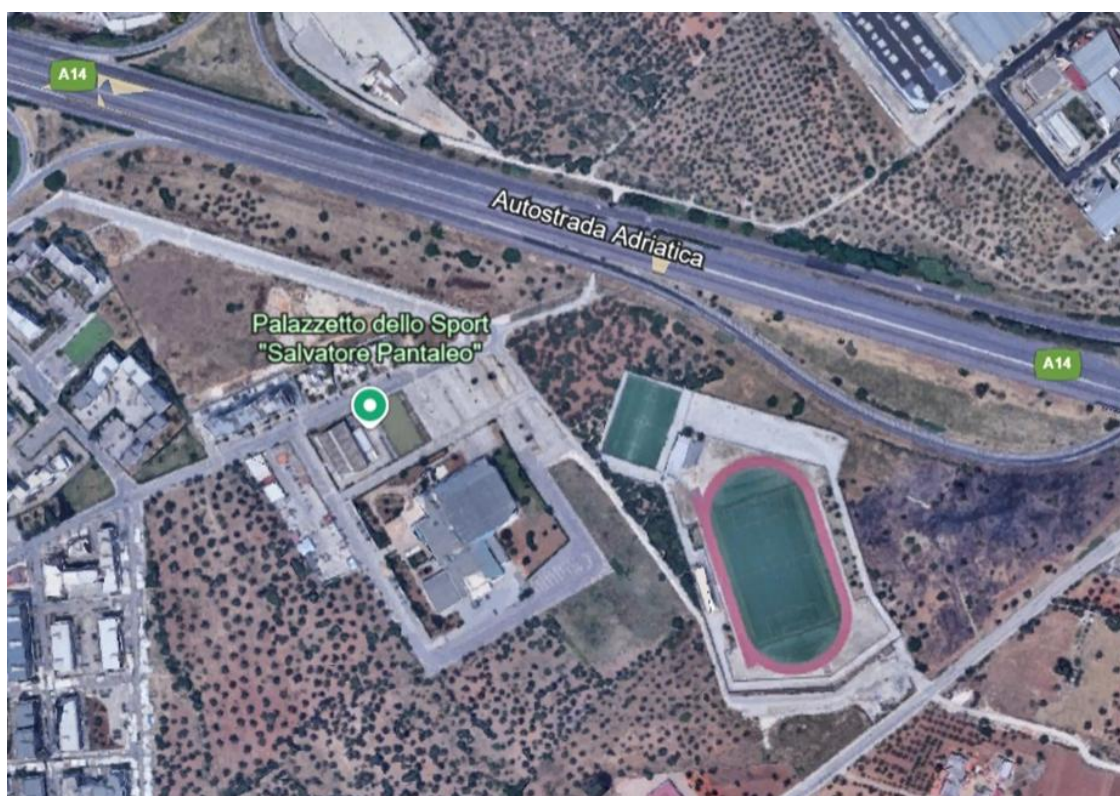


Fig.41 - Localizzazione impianto Google Maps

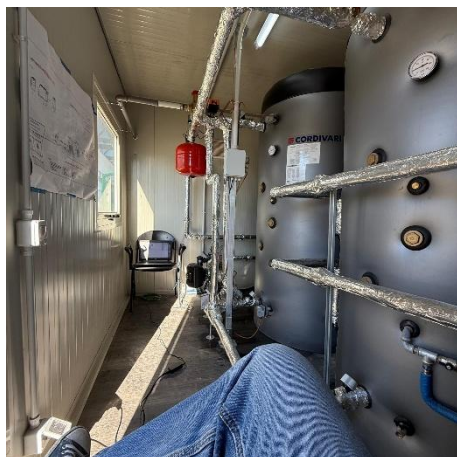
Nelle sue parti essenziali il sistema è costituito da una pompa di calore aria acqua con potenza nominale di 40 KWt collegata a due serbatoi di accumulo inerziali termostatati che, mediante una pompa di circolazione, scambiano calore con il sottosuolo attraverso geo scambiatori innovativi (Fig.42 a,b,c,d).



a)



b)



c)



d)

Figura. 42 - Impianto dimostratore per la verifica dell'efficienza di geo – scambiatori innovativi presso le Piscine Comunali di Modugno.

L'impianto è provvisto di sistemi di acquisizione dati e automazione per il monitoraggio e controllo a distanza dei processi (Fig.43). L'ambiente sotterraneo in cui è installato il nuovo sistema di geoscambio termico è costituito da uno scavo 2.5 m x 2.5 m x 3 m, sigillato mediante un telo in pvc e riempito di ghiaia e portato poi a saturazione (Fig. 44 a,b,c,d)



Figura 43 - Sistema di monitoraggio e controllo dei processi a distanza.



Figura.44 - Fasi realizzative dell'ambiente sotterraneo superficiale.

Lo scopo della sperimentazione è la realizzazione del Prof of Concept (PoC) di un geoscambiatore innovativo sviluppato dalla spin off accademica del Politecnico di Bari - Geo Environmental Energy Technologies srl (GEET srl) – rivendicato in una domanda di Brevetto Europeo n° 25190363.9 del 18 luglio 2025.

Sono stati condotti dei test di risposta termica sul prototipo di tale scambiatore innovativo installato nell'ambiente sotterraneo superficiale.

Lo scambiatore innovativo di appena 300 mm di altezza e 168 mm di diametro riesce a scambiare con il sottosuolo una potenza di circa 2 KW (Fig.45). Questo grazie al suo design innovativo che da un lato ottimizza la superficie di scambio termico per unità di lunghezza e dall'altro induce la convezione naturale dei fluidi presenti nel sottosuolo di natura artificiale (Ambiente sotterraneo superficiale) o naturale (ambiente sotterraneo profondo).

Le figure del seguente capitolo mostrano le risultanze dei test di risposta termica in termini di potenza termica scambiata in regime di riscaldamento e raffreddamento. Temperatura di ingresso (linea nera), temperatura di uscita (linea arancione), potenza termica scambiata (punti verdi).



Fig.45 - Prototipo del Geoscambiatore innovativo realizzato da GEET srl in lega di alluminio.

3.5. Risultati e discussioni della sperimentazione in campo

Sono stati condotti diversi Test di Risposta Termica (TRT) per poter valutare le condizioni operative dell'impianto, in due diverse condizioni. Per il test del 18/12/2025 (Fig.46) è stata fatta circolare acqua fredda a circa 280 K simulando un comportamento nel periodo invernale.

Circa un mese dopo il 21/01/2026 (Fig.47) è stata fatta circolare acqua calda a circa 306 K, simulando un comportamento nel periodo estivo. Entrambi i test hanno avuto una durata di 24 ore e di seguito viene riportata l'analisi per fasi divisa per fasce orarie.

3.5.1. Test del 18/12/2025. (Fig46)

(Regime di riscaldamento, sottrazione di calore nel sottosuolo)

- Nella fase iniziale (circa 7:55 – 13:30) la potenza è molto instabile, tra circa -1600 W e -2400 W con un picco iniziale e oscillazioni marcate con le temperature che si assestano rapidamente. È una tipica fase transitoria di avviamento del TRT con instabilità dovuta alla regolazione iniziale della pompa di circolazione, possibile intervento dei serbatoi inerziali e assestamento delle condizioni di scambio con il sottosuolo. L'elevata dispersione della potenza indica che il sistema non è ancora in regime stazionario.
- Nella fase di transizione a regime (intorno alle 13:30) si riscontra una caduta netta della potenza verso -2200 W con una riduzione delle oscillazioni. Il sistema entra in una condizione di carico termico quasi costante con il comportamento che diventa idoneo per l'analisi TRT.

- Nella fase quasi stazionaria (13:30 – fine test) la temperatura diminuisce lentamente con un andamento regolare e continuo mentre la potenza cresce leggermente da ~ -2200 W a ~ -2000 W con andamento progressivo e abbastanza lineare

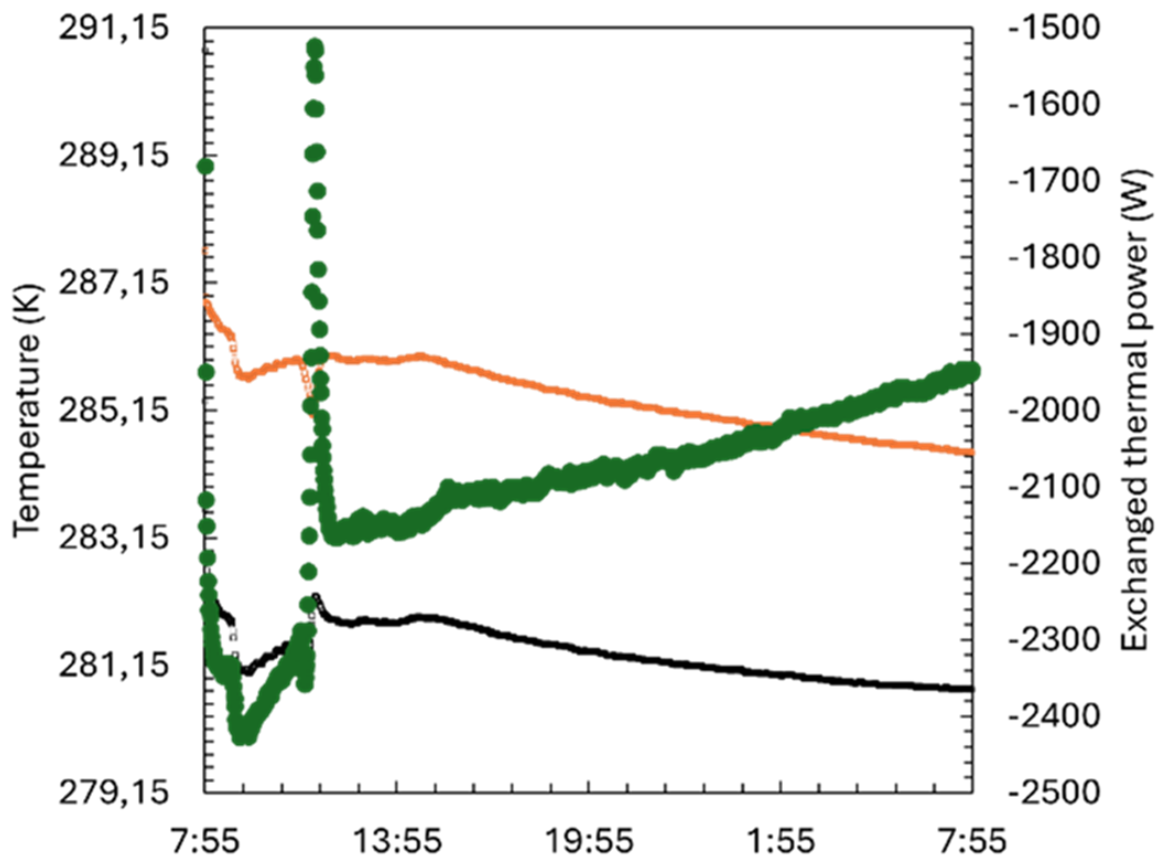


Fig.46 - Test del 18/12/2025

3.5.2. Test del 21/01/2026. (Fig.47)

(Regime di raffrescamento, immissione di calore nel sottosuolo)

- Fase iniziale (10:33 – ~14:00) Rapido aumento della potenza da ~2050 W fino a ~2300 W con una fase transitoria iniziale abbastanza marcata, il sistema sta stabilizzando la portata e la potenza immessa. Rispetto al primo grafico il transitorio più breve e più regolare
- Fase quasi stazionaria (~14:00 – fine) la potenza dopo il picco (~2300 W), decresce progressivamente fino a ~2100 W con una dispersione moderata, ma più contenuta rispetto al comportamento in regime invernale.

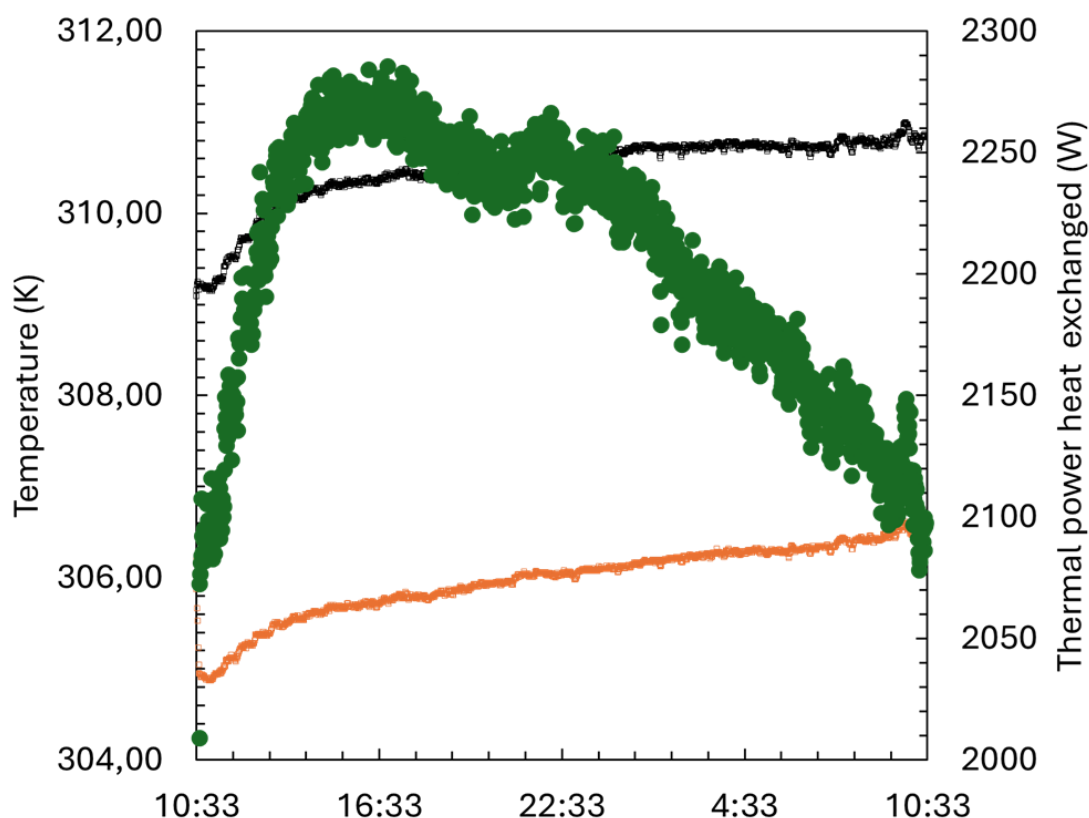


Fig.47 - Test del 21/01/2026

Entrambi i test di risposta termica effettuati mostrano un andamento coerente con le previsioni teoriche di funzionamento, una buona stabilità a regime e ΔT pressoché costante, con la differenza che nel primo grafico il sistema estrae calore dal terreno, nel secondo invece lo cede, con i due test che risultano quasi speculari (carico caldo vs carico freddo).

L'analisi comparativa dei due grafici evidenzia differenze significative nel comportamento dinamico del sistema, riconducibili principalmente all'influenza delle componenti impiantistiche, in particolare dei serbatoi inerziali. Nel primo caso, si osserva una risposta maggiormente condizionata dalle dinamiche del sistema impiantistico. Tale influenza si manifesta attraverso una marcata instabilità nella fase iniziale, caratterizzata da oscillazioni e perturbazioni del segnale.

Questo comportamento è attribuibile al fatto che in regime invernale vi sono effetti di smorzamento e ritardo nella risposta termica complessiva del sistema. Di conseguenza, la risposta del sistema è maggiormente influenzata da fenomeni transitori legati all'impianto.

Al contrario, il secondo grafico evidenzia un comportamento più regolare e stabile, con una risposta dinamica meno soggetta a interferenze esterne. In questo caso, la ridotta influenza delle componenti impiantistiche consente di osservare un andamento più diretto, che riflette in maniera più fedele il comportamento termico del prototipo.

Nel complesso, entrambi i test mostrano il corretto funzionamento del sistema sia in fase di estrazione sia in fase di immissione di energia termica. La risposta del prototipo risulta infatti sostanzialmente simmetrica, indicando condizioni operative stabili e coerenti.

4. Esperimenti di laboratorio per lo studio degli effetti causati dal clogging sull'efficienza dello scambio termico nei mezzi fratturati

4.1. Aspetti introduttivi

La trasmissione del calore tra mezzi fratturati nel sottosuolo e i fluidi che vi circolano rappresenta un tema di rilevante interesse scientifico, con importanti implicazioni applicative in numerosi ambiti, tra cui i processi industriali, la protezione ambientale e, in modo particolare, lo sfruttamento dei sistemi geotermici.

Nei sistemi fratturati, infatti, lo scambio termico tra la matrice rocciosa e i fluidi è governato da una complessa interazione di processi multipli che operano a differenti scale spaziali e temporali, rendendo la previsione e il controllo dei flussi di calore particolarmente complessi. Numerosi fattori influenzano la trasmissione del calore in tali contesti, tra cui le proprietà termofisiche della roccia e dei fluidi, la geometria e la connettività delle fratture, le condizioni idrodinamiche del flusso e i parametri chimico-fisici del sistema.

Negli ultimi decenni, l'impatto dei fattori fisici e chimici su questi processi è stato oggetto di diversi studi, contribuendo in modo significativo al miglioramento dei modelli di trasferimento termico nei mezzi fratturati. Al contrario, il ruolo dei processi biologici e in particolare l'influenza della crescita microbica e della formazione di biofilm sulle superfici di frattura, risulta tuttora poco esplorato e scarsamente quantificato.

Il presente studio nell'ambito del lavoro di tesi si inserisce in questo contesto ed ha come obiettivo quello di analizzare l'effetto della crescita del biofilm sulla trasmissione del calore tra le acque sotterranee e una matrice rocciosa carbonatica fratturata. A tal fine, è stato sviluppato un setup sperimentale di laboratorio che consente di studiare in condizioni controllate le interazioni tra fluido e roccia, riproducendo le caratteristiche principali degli acquiferi fratturati. Tale approccio permette di isolare e valutare il contributo specifico della crescita biologica che si sviluppa lungo le superfici di frattura, riducendo l'influenza di variabili esterne.

La comprensione di tali dinamiche è di importanza fondamentale per l'ottimizzazione della gestione dei serbatoi geotermici in mezzi fratturati, in particolare in formazioni carbonatiche, dove il flusso dei fluidi e lo scambio termico sono fortemente controllati dalla presenza delle fratture. La crescita del biofilm potrebbe infatti alterare in modo significativo le proprietà di scambio termico del sistema, con potenziali ripercussioni sull'efficienza e sulla sostenibilità a lungo termine degli impianti geotermici (Fig.48).

Oltre alle applicazioni in ambito geotermico, questo studio contribuisce all'avanzamento della conoscenza delle dinamiche ecologiche e biogeochimiche negli acquiferi carbonatici fratturati. I risultati ottenuti forniscono inoltre informazioni rilevanti per la gestione e la bonifica degli acquiferi contaminati, nonché per la comprensione e il miglioramento di processi industriali che coinvolgono sistemi acquiferi fratturati. In particolare, il lavoro si concentra sull'analisi delle variazioni delle proprietà idrauliche, termofisiche e geochemiche associate alla crescita del biofilm e in generale ai fenomeni di clogging sulle superfici delle fratture, al fine di valutare se e in quale misura essi costituiscano un meccanismo di riduzione dello scambio di calore tra il fluido in movimento e la roccia circostante.

4.2. Stato dell'arte del fenomeno del clogging negli ATEs

I sistemi di immagazzinamento e recupero di energia termica negli acquiferi (Aquifer Thermal Energy Storage, ATEs) rappresentano una tecnologia promettente per lo sviluppo di sistemi energetici sostenibili, in particolare se

integrati con fonti rinnovabili. Tuttavia, la loro efficienza e durabilità sono spesso limitate da fenomeni di intasamento (clogging), che interessano sia le componenti impiantistiche sia il mezzo acquifero stesso e che rappresentano una delle principali criticità, determinando una progressiva riduzione delle prestazioni fino alla parziale o totale compromissione del sistema (Bloemendal et al. 2018)[25].

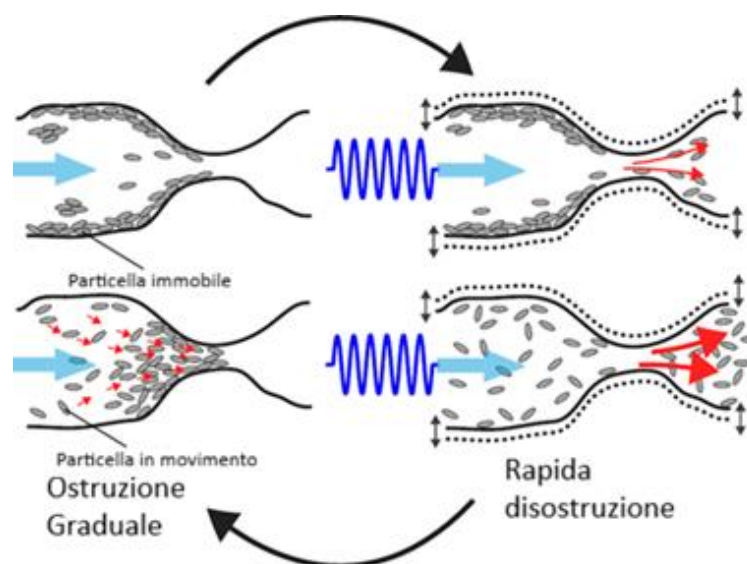


Fig.48 – Fenomeno del Clogging/ Unclogging (modified after Candel et al. (2014))

Sebbene i meccanismi fisici e chimici siano stati ampiamente investigati, il ruolo dei processi biologici, in particolare della crescita e persistenza del biofilm, rimane ancora poco compreso, soprattutto in relazione agli scambi termici fluido-roccia negli acquiferi fratturati. Il presente lavoro inquadra lo stato dell'arte sui meccanismi di clogging nei sistemi ATES e analizza criticamente l'impatto della crescita del biofilm sulle proprietà idrauliche e termiche di acquiferi fratturati in formazioni carbonatiche. L'obiettivo è fornire una base concettuale per lo studio integrato dei processi biologici e della trasmissione del calore, evidenziando le implicazioni per l'efficienza e la gestione sostenibile dei sistemi ATES (Burté et al., 2019)[26].

I fenomeni di clogging nei sistemi ATES possono manifestarsi a diversi livelli del sistema, interessando gli scambiatori di calore dell'impianto, le superfici filtranti dei pozzi di estrazione e re-immissione di acqua geotermica, evidenziando come la crescita microbica e la produzione di sostanze polimeriche extracellulari (EPS) riducano progressivamente la permeabilità, soprattutto nelle zone prossime all'ingresso del fluido. I risultati mostrano una chiara evoluzione temporale e spaziale dell'intasamento, associata alla successione delle comunità microbiche (in particolare Proteobacteria e Bacteroidetes), fornendo indicazioni utili per la gestione e la mitigazione del fenomeno nei sistemi di reiniezione geotermica. (Feng et al 2021)[27].

Negli acquiferi porosi, l'intasamento si verifica prevalentemente sulle superfici dei grani, mentre negli acquiferi fratturati interessa le pareti e le aperture delle fratture. Secondo (Baveye et al. 1998)[28], i processi di clogging possono essere ricondotti a tre meccanismi principali (Gjengedal et al., 2020)[29]:

- (i) fisico, dovuto alla presenza di particelle fini, frammenti di roccia o bolle d'aria;
- (ii) chimico, legato alla precipitazione di composti inorganici;

(iii) biologico, associato alla crescita microbica e alla formazione di biofilm.

Questi meccanismi risultano fortemente interconnessi e dipendono dalle condizioni idro-chimiche delle acque di falda, dalle modalità operative del sistema ATES e dalle caratteristiche litologiche e strutturali della formazione acquifera. Il contributo dei processi biologici al clogging è stato storicamente meno indagato rispetto ai meccanismi fisici e chimici, nonostante la loro potenziale influenza sulle proprietà idrauliche e termiche dell'acquifero. Il biofilm è definito come un aggregato strutturato di microrganismi immersi in una matrice extracellulare autoprodotta e idratata, costituita da sostanze polimeriche extracellulari (Extracellular Polymeric Substances, EPS) (Allison, 2023)[30].

La stabilità del biofilm, intesa come la capacità di mantenere nel tempo adesione superficiale e coesione strutturale, è un parametro chiave che ne controlla la persistenza a lungo termine e la resistenza ai processi di degradazione (Flemming, 2002)[31]. Studi precedenti hanno dimostrato che la presenza e l'evoluzione del biofilm possono influenzare significativamente il comportamento idrodinamico dei sistemi acquiferi, determinando riduzioni e instabilità della conducibilità idraulica (Zhang e Bishop, 2003)[32]; (Picoreanu et al., 2001)[33]; (Ross e Bickerton, 2002)[34]. (Beretta, 2017)[35] ha evidenziato come la crescita batterica nei pozzi ATES possa portare alla formazione di fenomeni di biofouling sulle superfici filtranti, ostacolando il flusso idrico. L'entità di tali processi dipende fortemente dalla disponibilità di nutrienti nelle acque reimmesse e dalle condizioni operative dell'impianto.

Negli acquiferi fratturati, e in particolare in quelli sviluppati in formazioni carbonatiche, la crescita del biofilm assume un ruolo ancora più critico. (Castagner et al. 2006)[36] hanno dimostrato, attraverso esperimenti di laboratorio su blocchi di calcare fratturato, che la biostimolazione può indurre una marcata riduzione, nonché una significativa instabilità, della conducibilità idraulica. Tale comportamento è stato attribuito a processi ciclici di occlusione e distruzione delle fratture, legati alla mutazione della popolazione microbica, all'invecchiamento del biofilm e al rilascio di depositi minerali secondari. Oltre agli effetti idraulici, la presenza di biofilm sulle superfici di frattura può influenzare la trasmissione del calore tra il fluido in movimento e la matrice rocciosa. Le variazioni delle proprietà termofisiche indotte dalla patina biologica potrebbero infatti costituire un ulteriore meccanismo di riduzione dell'efficienza dei sistemi ATES, aspetto che risulta ancora scarsamente documentato in letteratura. (Ripetizione?)

La comprensione dell'impatto del biofilm sugli scambi termici fluido-roccia è cruciale per la gestione dei serbatoi ATES, in particolare in contesti fratturati, dove la trasmissione del calore è fortemente controllata dalle superfici di frattura.

La crescita di biofilm potrebbe alterare sia le condizioni di contatto termico sia le modalità di flusso, con potenziali effetti negativi sull'efficienza di recupero energetico. In questo contesto si inseriscono anche le strategie di monitoraggio proposte da (Gjengedal et al. 2019)[37], che prevedono l'impiego combinato di sensori di temperatura e pressione per individuare precocemente anomalie di funzionamento riconducibili a fenomeni di clogging, consentendo interventi di manutenzione preventiva senza interrompere l'esercizio dell'impianto. Il presente lavoro evidenzia come i processi biologici, e in particolare la crescita e la stabilità del biofilm, rappresentino un fattore chiave nei fenomeni di clogging che influenzano l'efficienza idraulica e termica dei sistemi ATES. Nei sistemi fratturati in formazioni carbonatiche, tali processi assumono un ruolo ancora più rilevante, potendo incidere significativamente sulla trasmissione del calore fluido-roccia.

Una comprensione integrata dei meccanismi fisici, chimici e biologici che governano il clogging è fondamentale per lo sviluppo di modelli predittivi e strategie di gestione sostenibile dei sistemi ATES. Studi sperimentali mirati alla quantificazione dell'impatto del biofilm sulle proprietà termofisiche delle fratture rappresentano una prospettiva di ricerca prioritaria per migliorare l'affidabilità e l'efficienza dei sistemi di immagazzinamento termico negli acquiferi.

4.3 Descrizione del setup sperimentale

È stato messo a punto un modello fisico di laboratorio volto a rappresentare le dinamiche di flusso, trasporto di calore, nonché i processi di crescita del biofilm e le loro interazioni all'interno di un ambiente di geometria e caratteristiche idrauliche e termiche note, nonché sotto condizioni al contorno controllate. Il cuore del setup sperimentale è rappresentato da un blocco fratturato di calcare di Altamura di dimensioni 0.8 m x 0.4 m x 0.6 m. Tale blocco è stato utilizzato per precedenti studi sul flusso (Cherubini *et al.*, 2012)[38], trasporto di massa (Cherubini *et al.* 2013, 2014)[39][40] e calore (Heinze and Pastore, 2023)[41] nei mezzi fratturati.

Per convenienza si riporta una breve descrizione della preparazione del blocco utilizzata nei precedenti studi.

È stata generata una rete di fratture mediante colpi di martello da 5 kg sul blocco di calcare. Le fratture che interessano il blocco sono 14, di cui le due principali corrono lungo la dimensione maggiore del blocco. Le fratture sono state ripulite dai detriti e le fessure sono state sigillate con del silicone.

È stata applicata una resina epossidica con una conduttività termica di 0.502 W/mK su tutte le facce del blocco. Successivamente, è stato costruito un telaio di 0.085 m × 0.405 m × 0.605 m intorno al blocco ed è stato versato uno strato di resina epossidica tra la pietra calcarea e il telaio per ottenere su tutte le facce uno spessore di resina epossidica di 0.005 m. All'estremità del blocco sono stati praticati dei fori con un diametro di 0.01 m, chiusi con una boccola esagonale e sigillati con resina epossidica a rapido indurimento. Queste porte consentono l'ingresso e la fuoriuscita di fluido dal network di fratture (Fig.49 a).

Tale blocco rappresenta l'ambiente all'interno del quale si intende investigare l'interazione tra le dinamiche di flusso e trasporto di calore e la crescita di biofilm. A tale scopo il blocco, dopo un revamping, è immerso in un ambiente controllato che permettere lo scambio di calore esclusivamente dalla superficie laterale dello stesso.

All'interno del blocco circola acqua di falda prelevata dall'area Metropolitana di Bari le cui caratteristiche chimico-fisiche sono riportate in (Tab. 3).

<i>Parametri MICROBIOLOGICI</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Risultati</i>
<i>Coliformi fecali</i>	<i>UFC/100 ml</i>	<i>107.89</i>
<i>Coliformi Totali</i>	<i>UFC/100 ml</i>	<i>939.24</i>
<i>Ricerca e numerazione di Escherichia coli</i>	<i>UFC/100 ml</i>	<i>25.68</i>
<i>Streptococchi fecali</i>	<i>UFC/100 ml</i>	<i>77.52</i>
<i>Spore di clostridi solfito riduttori</i>	<i>UFC/100 ml</i>	<i>10.97</i>
<i>Colonie su agar a 22°C</i>	<i>UFC/1 ml</i>	<i>2006.24</i>
<i>Colonie su agar a 37°C</i>	<i>UFC/1 ml</i>	<i>3292.44</i>

<i>Staphylococcus aureus/ stafilococchi patogeni</i>	<i>UFC/250 ml</i>	9.38
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>UFC/250 ml</i>	153.20
<i>Parametri CHIMICI</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Risultati</i>
<i>pH</i>	<i>pH</i>	8.08
<i>Conduttività</i>	<i>μs/cm</i>	2552.30
<i>Carbonio organico totale TOC</i>	<i>mg/l</i>	5.62
<i>Alcalinità</i>	<i>mg/l</i>	625.67
<i>Sodio</i>	<i>mg/l</i>	409.71
<i>Potassio</i>	<i>mg/l</i>	27.92
<i>Magnesio</i>	<i>mg/l</i>	71.50
<i>Calcio</i>	<i>mg/l</i>	118.94
<i>Azoto ammoniacale</i>	<i>mg/l</i>	0.48
<i>Nitrati</i>	<i>mg/l</i>	32.40
<i>Nitriti</i>	<i>μg/l</i>	97.61
<i>Fluoruri</i>	<i>μg/l</i>	436.12
<i>Cloruri</i>	<i>mg/l</i>	685.79
<i>Solfati</i>	<i>mg/l</i>	161.42

Tab.3 - Caratteristiche dell'acqua circolante nel network di fratture.

L'acqua circola all'interno del network di fratture dalla porta di immissione (inlet) alla porta di uscita (outlet). Tali porte sono situate lungo la dimensione maggiore del blocco. L'acqua di falda viene riscaldata ad una temperatura di immissione di circa 35°C attraverso un sistema di riscaldamento descritto in seguito.

Il revamping del blocco consiste nelle seguenti lavorazioni. In primo luogo, per impostare una condizione al contorno di temperatura costante solo sulla superficie laterale del blocco, è stato asportato il rivestimento di resina eposidica sul contorno superiore e inferiore della superficie laterale e sostituito con del materiale termicamente isolante ovvero un cordolo in polietilene da 0.01 m con conducibilità termica pari 0.035 W/mK.

All'interno del blocco, in corrispondenza delle fratture sono stati eseguiti fori da 0.004 m dove sono state inserite 16 termocoppie di tipo K per monitorare la temperatura all'interno del blocco e sigillate con boccole esagonali e resina epossidica a rapido indurimento. Inoltre, si sono posizionate 7 termocoppie in corrispondenza di tutte le porte all'estremità del blocco per monitorare la temperatura all'estremità del network di fratture (Fig. 49b).

Due sensori di pressione RS 828-507 (range: 0 -50 mbar) posti in corrispondenza delle porte di entrata e uscita monitorano la caduta di pressione all'interno del network di fratture. Un sensore di flusso mecatronico SBG232 (range 0,000005 - 0,00025 m³/sec) è installato a monte della porta di ingresso al fine di monitorare la portata in entrata al network di fratture. Tutti i sensori sono collegati a 3 data logger a 8 canali Picolog TC-08.(Fig.49d)

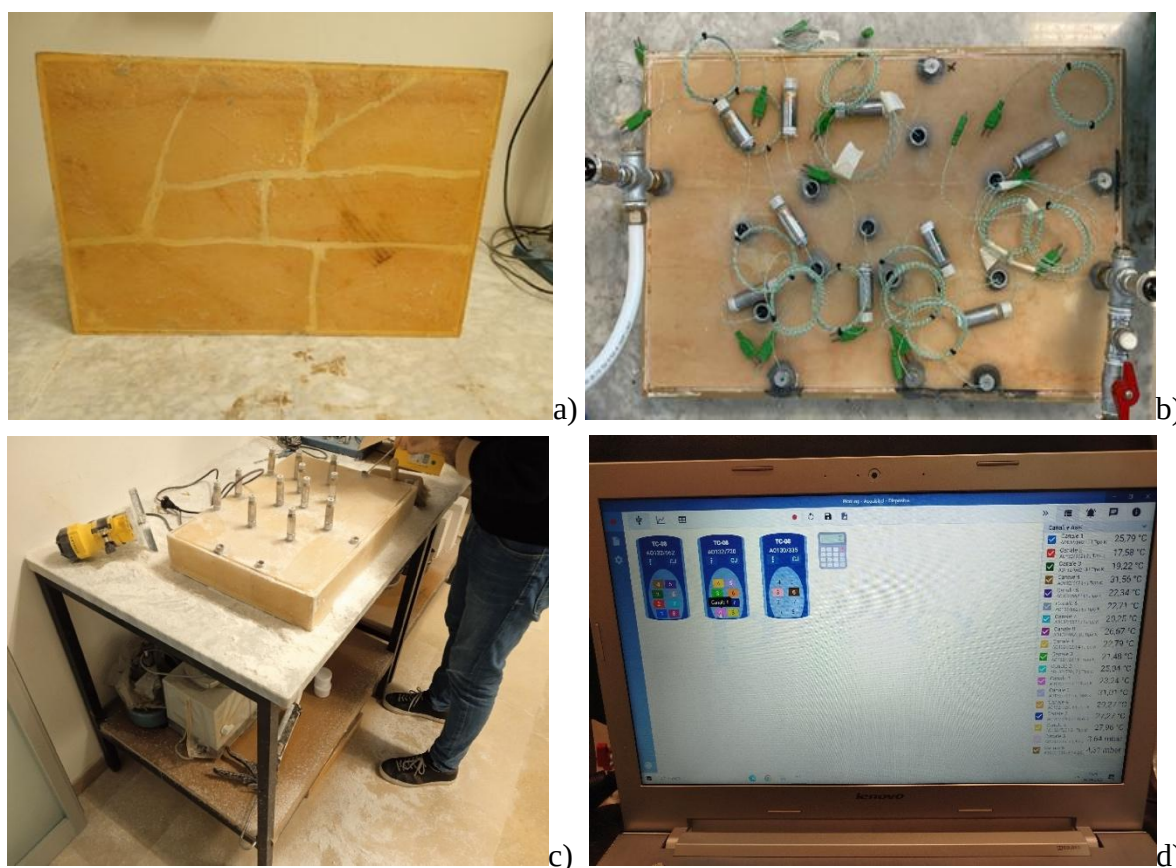


Fig.49 - Fasi di revamping del blocco

Sulla superficie superiore e inferiore del blocco è stato posto un rivestimento costituito da pannelli di polistirene estruso dello spessore di 0.04 m al fine di isolare termicamente il blocco su tali superfici.

Il blocco così lavorato è stato inserito all'interno di un ambiente artificiale (Fig. 50 a,b,c), costituito da una vasca in HDPE delle dimensioni di 0.61 m x 0.92 m x 0.55 m riempita in parte con sabbia silicea. Il blocco è posizionato al centro di tale vasca, dove in corrispondenza della superficie laterale del blocco è posizionata una serpentina costituita da un tubo in multistrato da 0.016 m collegata, mediante un circuito idraulico (circuito idraulico primario), ad un chiller che garantisce il raffreddamento del sistema (Fig.50 e).

L'acqua di falda circola all'interno del blocco grazie alla presenza di un ulteriore circuito idraulico (circuito idraulico secondario) configurato per immettere l'acqua di falda all'interno del network di fratture.

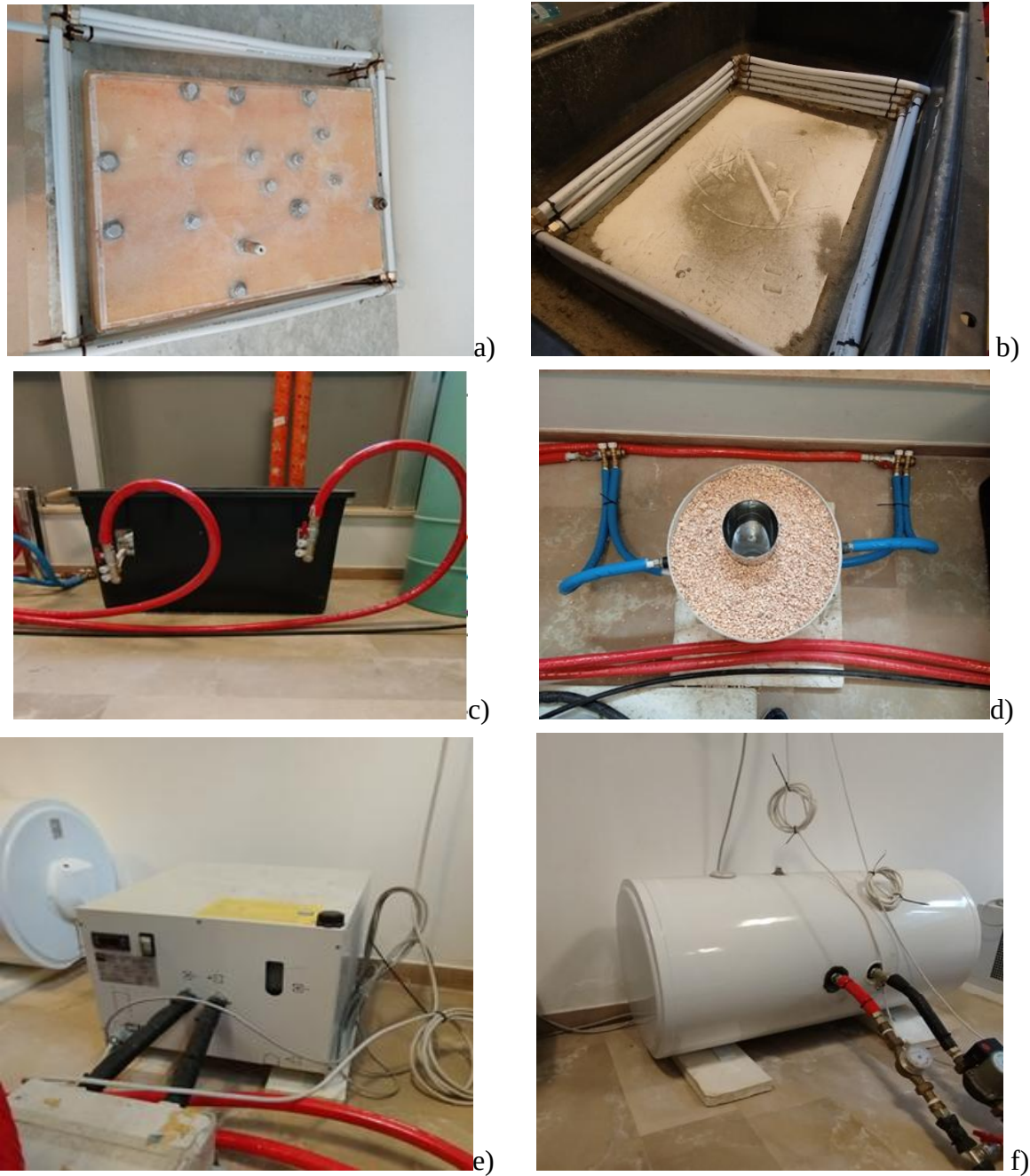


Fig.50 - Ambiente artificiale per garantire condizioni adiabatiche

Il circuito secondario è alimentato dall'acqua riscaldata proveniente da un tubo di acciaio di diametro pari a 0.13 m e altezza pari a 0.45 m. L'acqua viene prelevata dalla parte superiore del tubo, mediante una pompa sommersa, e reimpressa, dopo il passaggio all'interno del blocco, nella parte inferiore del tubo stesso. Tale tubo è sottoposto a condizioni termiche controllate grazie al fatto che è situato al centro di un serbatoio cilindrico in HDPE che presenta diametro e altezza pari a 0.45 m, isolato termicamente con lana di roccia. Il volume tra le pareti del serbatoio e il tubo metallico è riempito con ghiaia satura d'acqua. (Fig.50 d).

In tale volume è immersa una serpentina collegata ad un boiler termostato (Fig.50 f), con potenza di 2000 W e volume di 0.200 m³ che permette il mantenimento della temperatura dell'intero sistema. Sul tratto di mandata del tubo in corrispondenza della pompa è stato installato un flussimetro digitale IFM electronic SM6004 con funzionamento

del sensore di flusso magneto-induttivo, range di misura 0,1...25 l/min che permette di monitorare e variare il flusso indotto dalla pompa nel network di fratture del blocco(Fig.51).

Sul tratto di ritorno invece è stata installata una sonda multiparametrica HI98494: è un misuratore portatile a tenuta stagna, che monitora fino a 12 diversi parametri per la qualità dell'acqua. La sonda multisensore è dotata di micro-processore e consente la misurazione di parametri chiave, tra cui pH, redox, conducibilità, ossigeno disciolto e temperatura. La sonda trasmette le letture digitalmente allo strumento, che consente di visualizzare dei dati o permette la registrazione in continuo per un intervallo settato dall'utente(Fig.51).

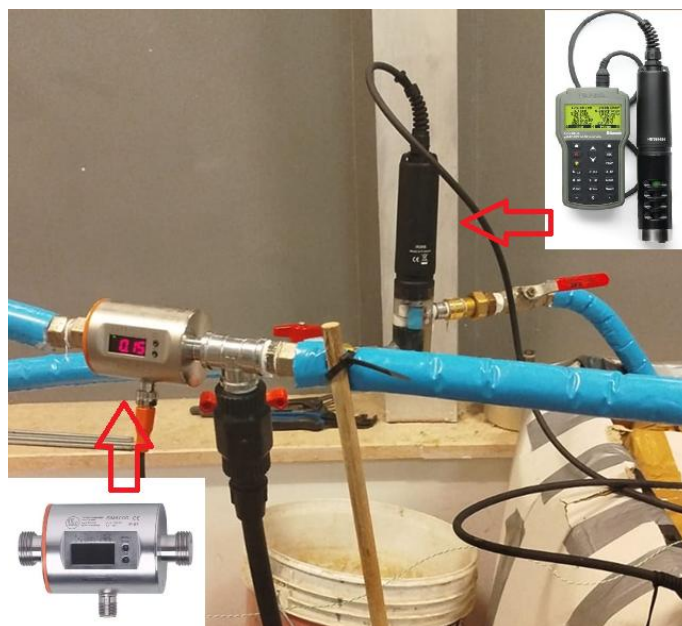


Fig.51 - Flussimetro digitale e Sonda multiparametrica

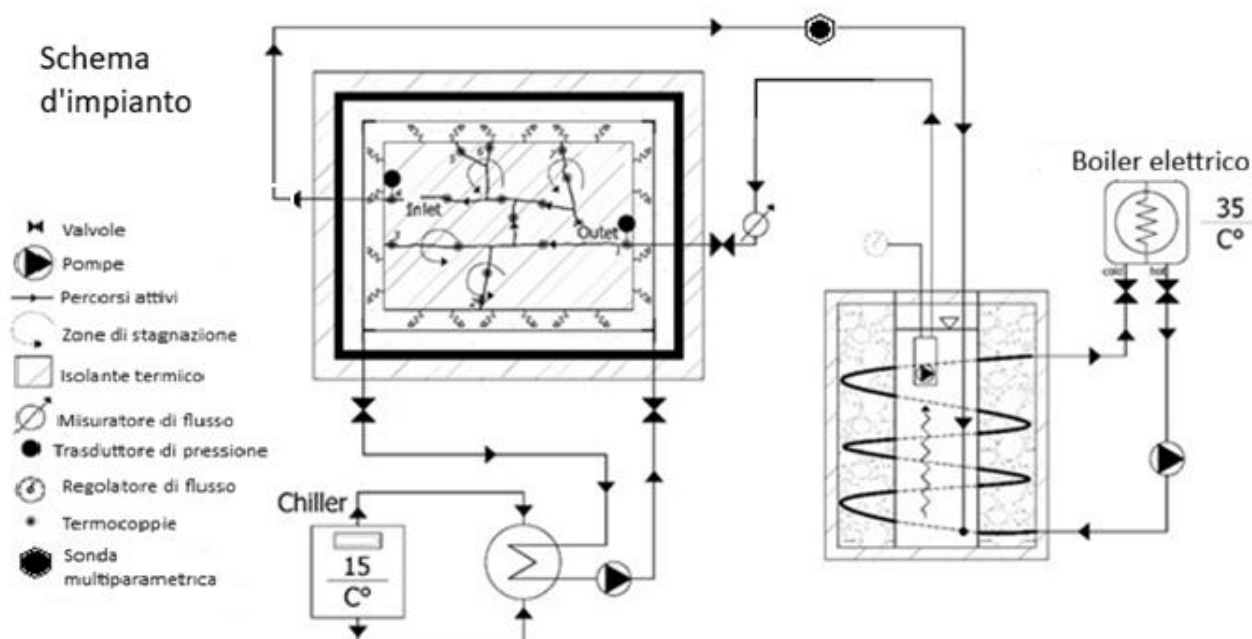


Figura.52 - Sketch del setup sperimentale realizzato.

4.4. Esperimenti condotti

In una fase preliminare è stata valutata la curva caratteristica (portata – differenza di altezza idraulica) del blocco fratturato al variare della temperatura. In particolare, è stata fatta circolare l'acqua all'interno del blocco a vari range di temperature 7,5 °C, 17,5 °C, 34,5 °C modificando la portata di immissione nel range 0,10 l/min - 0,30 l/min con incrementi di 0,05 l/min in linea con la tolleranza del flussometro e misurando la relativa differenza di altezza idraulica tra l'ingresso e l'uscita attraverso i trasduttori di pressione. Le curve caratteristiche sono riportate in (Fig.53).

La figura mette in luce il fatto che c'è una lieve influenza della variazione di temperatura sulla curva caratteristica. In particolare, lo scostamento maggiore si evidenzia per basse temperature laddove, vi è conseguentemente all'abbassamento della temperatura, un aumento della viscosità con conseguente incremento delle forze viscosse che incidono sulla conduttanza del blocco fratturato descritta dalla curva caratteristica.

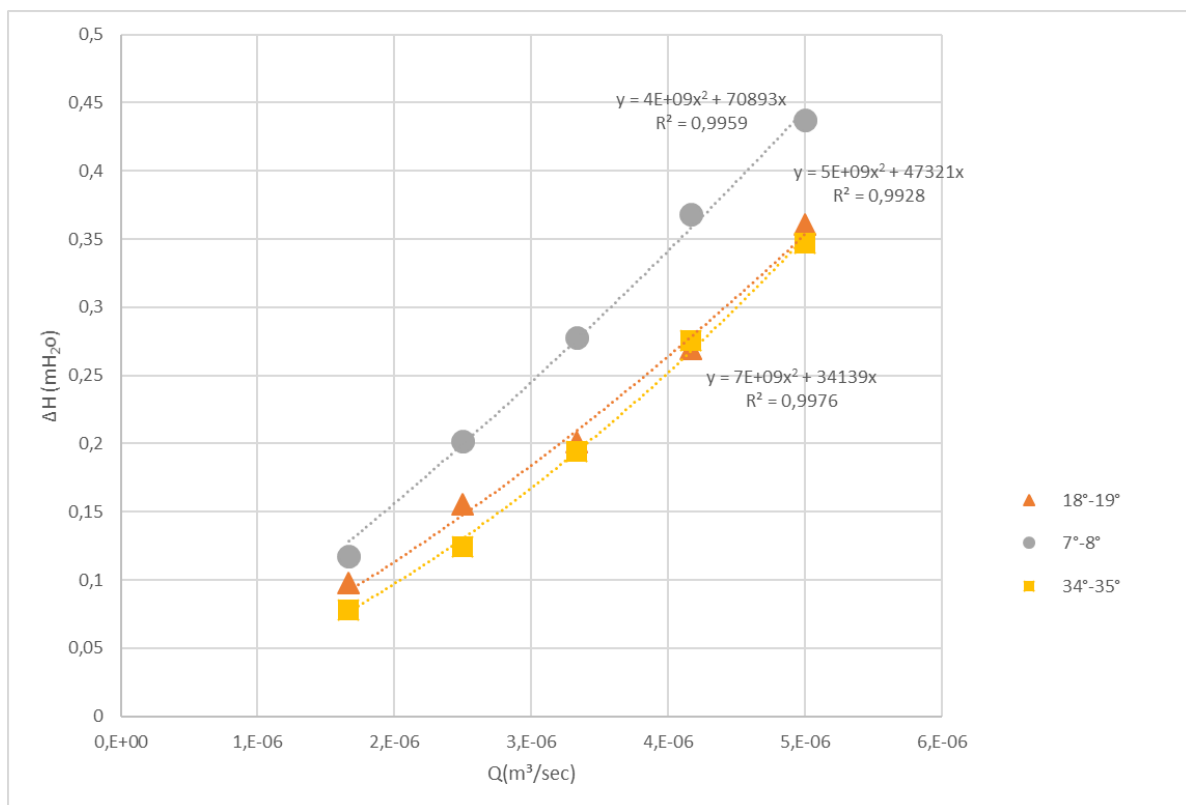


Fig.53 - Curve caratteristiche per diverse temperature

Successivamente è stata impostata una circolazione di acqua continua nel blocco fratturato. Immettendo acqua ad una temperatura costante di circa 35 °C e imponendo, attraverso il raffreddamento effettuato tramite il chiller, un flusso di calore di uscita sulla superficie laterale del blocco a 15°C. È stato effettuato un monitoraggio continuo dei parametri per circa 13 giorni.

In particolare, è stata monitorata la temperatura nei vari punti del blocco(Fig.54)

Nei punti di Inlet e Outlet (termocoppie 1,4)(Fig.55a); nel percorso principale (Percorso 1, termocoppie 4, 13, 14, 16, 8, 1)(Fig.55b); nel percorso secondario (Percorso 2, termocoppie 15, 10)(Fig.55c); nelle fratture stagnanti non interessate da un flusso forzato (Percorso 3 , termocoppie interne 9, 11, 12)(Fig.55d); (Percorso 4, termocoppie esterne 5, 6, 7, 2, 3) (Fig.55e).

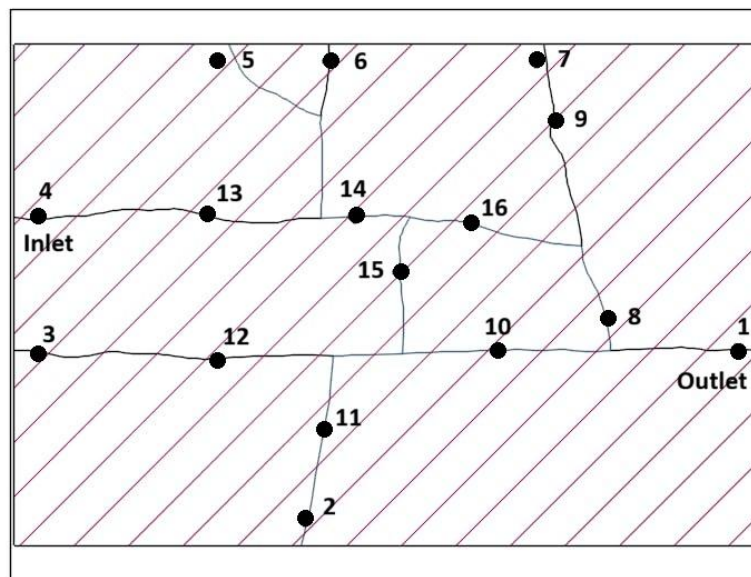
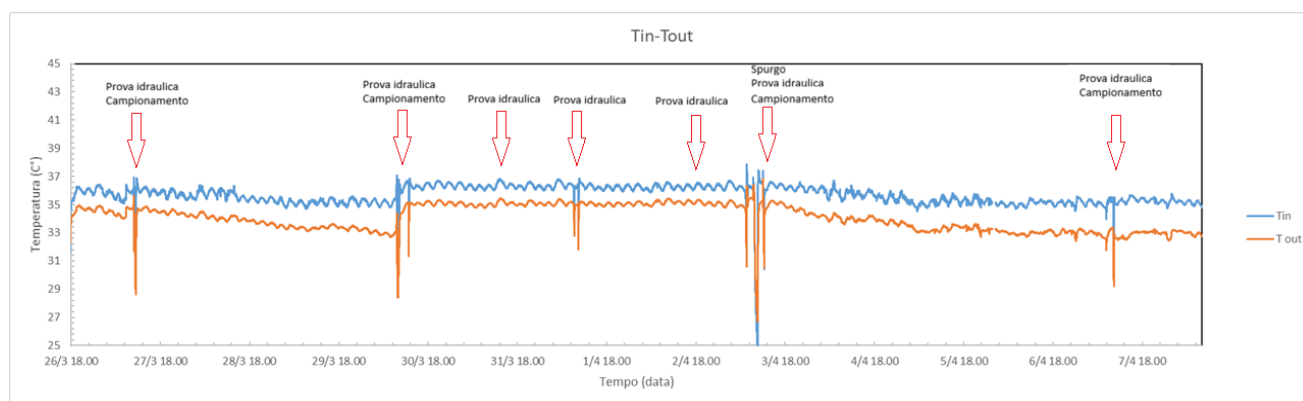
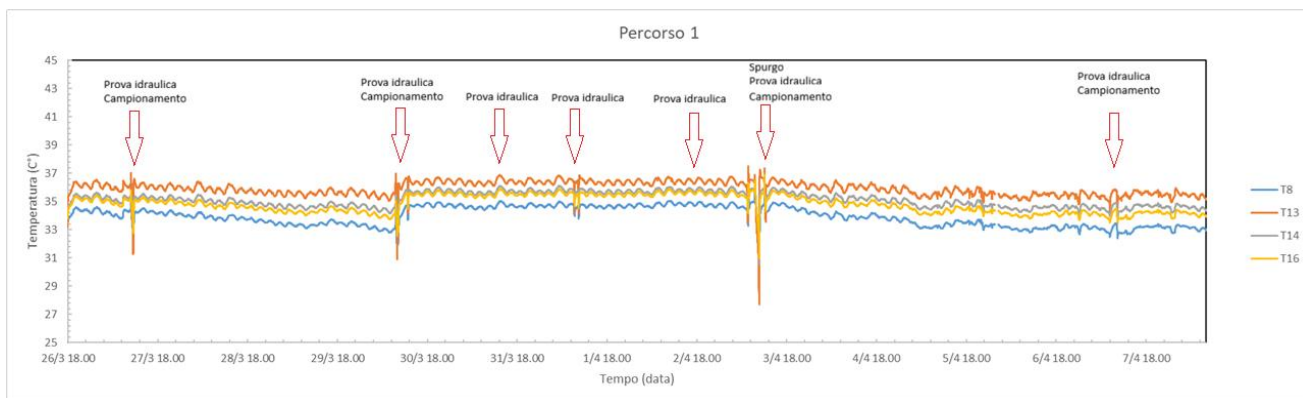


Fig.54 - Network di fratture e disposizione termocoppie



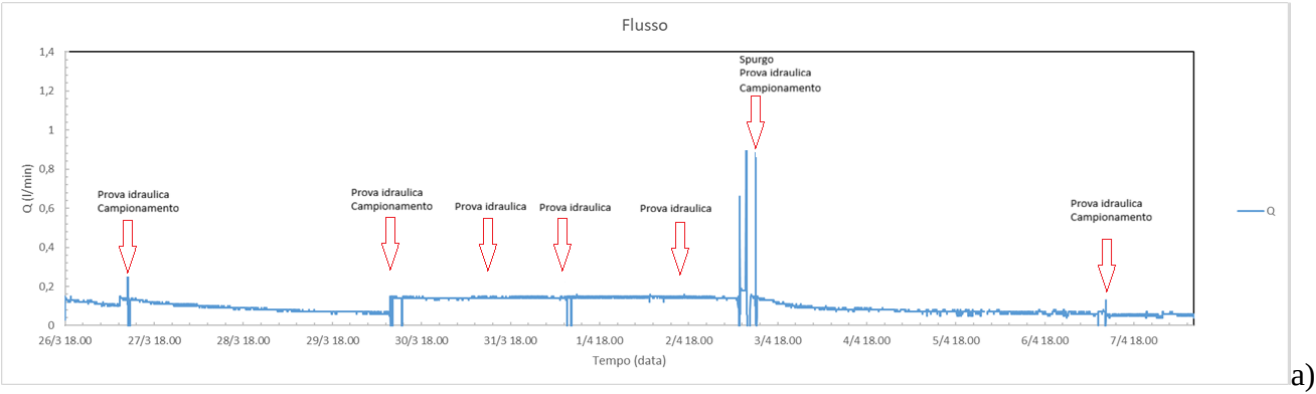
a)



b)



Fig.55 - Monitoraggio della temperatura per tredici giorni consecutivi per i vari percorsi delle fratture nel blocco



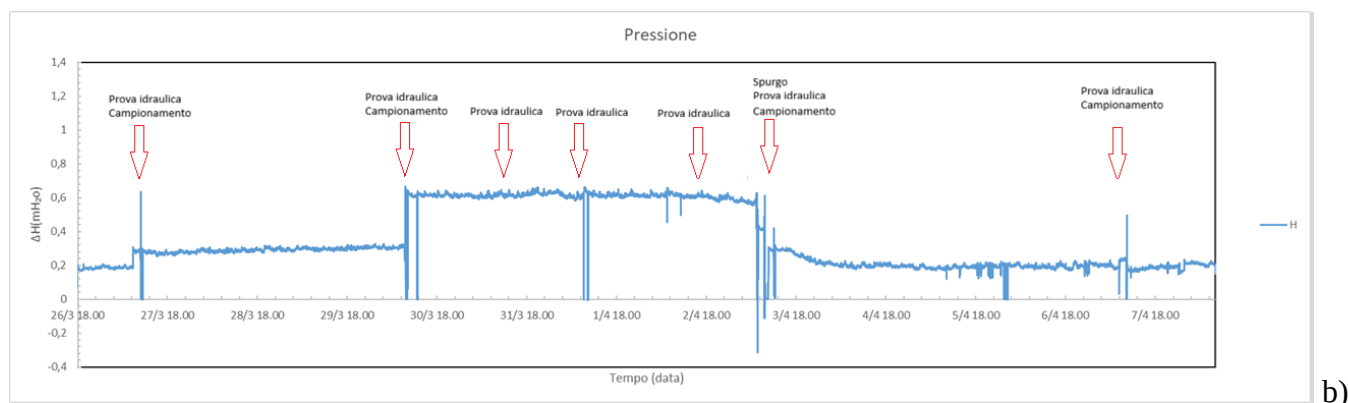


Fig.56 - Monitoraggio della portata e della differenza di altezza idraulica per tredici giorni consecutivi

Oltre la variazione della temperatura sono stati monitorati, le differenze di altezza idraulica tra l'ingresso e l'uscita (Fig.56a), nonché la pressione nella portata di immissione (Fig.56b).

Le brusche variazioni dell'andamento dei grafici delle Fig.55 e Fig.56 sono da ricondursi al prelievo di acqua dal blocco per il monitoraggio dei parametri PH, contenuto di ossigeno, percentuale di ossigeno e COD, con i valori riportati in Tab.4 e Tab.5.

Il picco maggiore si è avuto in data 03/04/2026 dove è stato effettuato uno spurgo dell'acqua circolante all'interno delle fratture del blocco. Inizialmente la porta di immissione è stata impostata a 0,15 l/min e come risulta dalla Figura 56a, la portata decresce nel tempo con conseguente incremento della differenza di altezza idraulica (Figura 56b). Per studiare l'effetto di tale meccanismo sulle caratteristiche idrauliche del blocco fratturato sono state valutate le curve caratteristiche alle seguenti date (Fig.57):

- 26/03/2026 (blu): Inizio esperimento
- 27/03/2026 (grigio): Situazione a 24h, con perdite di carico relativamente elevate.
- 30/03/2026 (rosso): peggioramento rispetto al 27/03; a parità di portata si registrano le perdite di carico più alte tra tutte le campagne di misura.
- 03/04/2026 (azzurro): giorno dello spurgo. La curva si abbassa sensibilmente rispetto alle misure precedenti, indicando una diminuzione delle resistenze al flusso.
- 07/04/2026 (verde): ulteriore miglioramento rispetto al 03/04, con valori di ΔH più contenuti a parità di portata.

Confrontando una portata prossima a $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ con perdite di carico di $\Delta H \approx 0,55\text{-}0,60 \text{ mH}_2\text{O}$ in data 30/03 e di $\Delta H \approx 0,35\text{-}0,40 \text{ mH}_2\text{O}$ in data 07/04. Si osserva quindi una riduzione della perdita di carico dell'ordine del 30-40%, indice di una maggiore efficienza idraulica del sistema dopo lo spurgo.

Lo spurgo ha presumibilmente rimosso dei depositi solidi, accumuli di fanghi, eventuali bolle d'aria o ostruzioni locali, riducendo la resistenza al passaggio del fluido. Questo si riflette nello spostamento verso il basso delle curve successive all'intervento. Inoltre, il fatto che la curva del 07/04 risulti ancora inferiore a quella del 03/04 suggerisce che il sistema abbia continuato a stabilizzarsi nei giorni successivi allo spurgo, oppure che la pulizia abbia prodotto un effetto progressivo sulla circolazione. In conclusione i dati indicano che lo spurgo del 03/04 ha avuto un effetto positivo e immediatamente misurabile, determinando una riduzione significativa delle perdite di carico e quindi un

miglioramento delle condizioni di esercizio dell'impianto. La misura del 07/04 conferma il mantenimento, e anzi il consolidamento, del beneficio ottenuto dall'intervento.

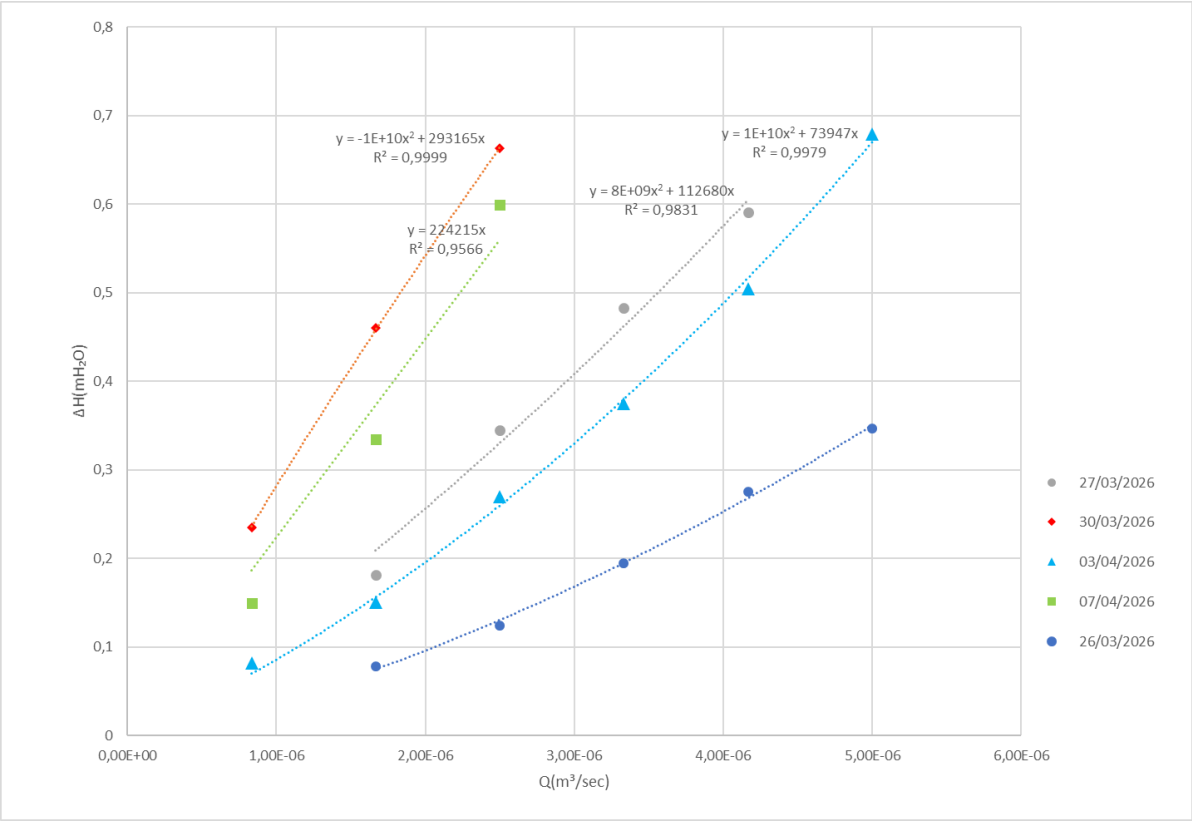


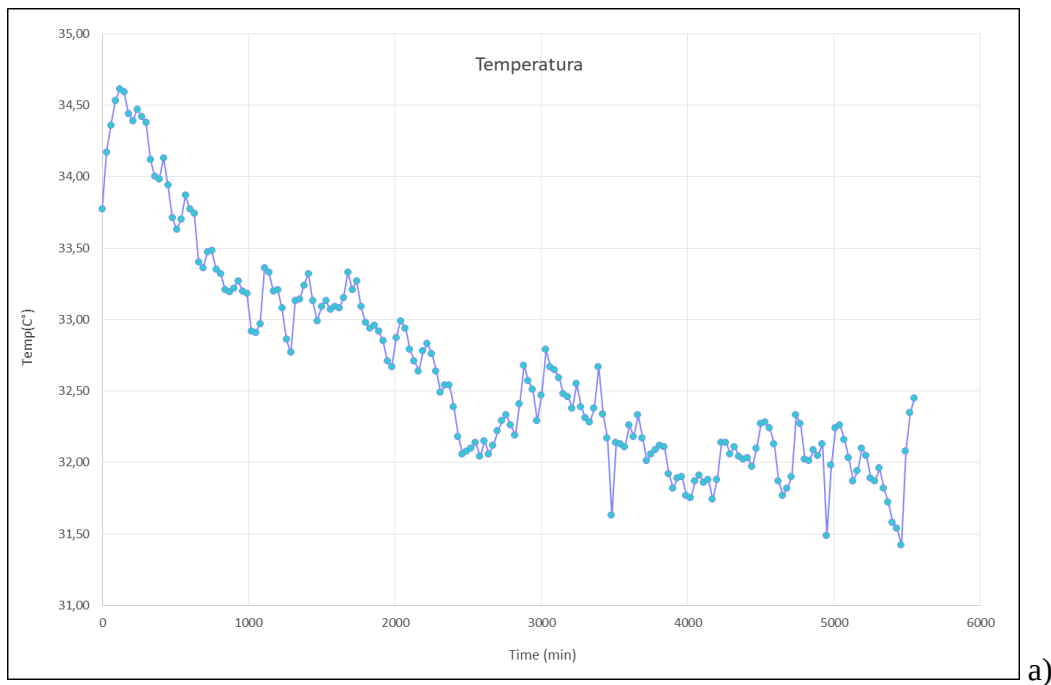
Fig.57 - Grafico Relativo alle diverse date

TABELLA CARATTERISTICHE ACQUA per campionamenti in diverse date

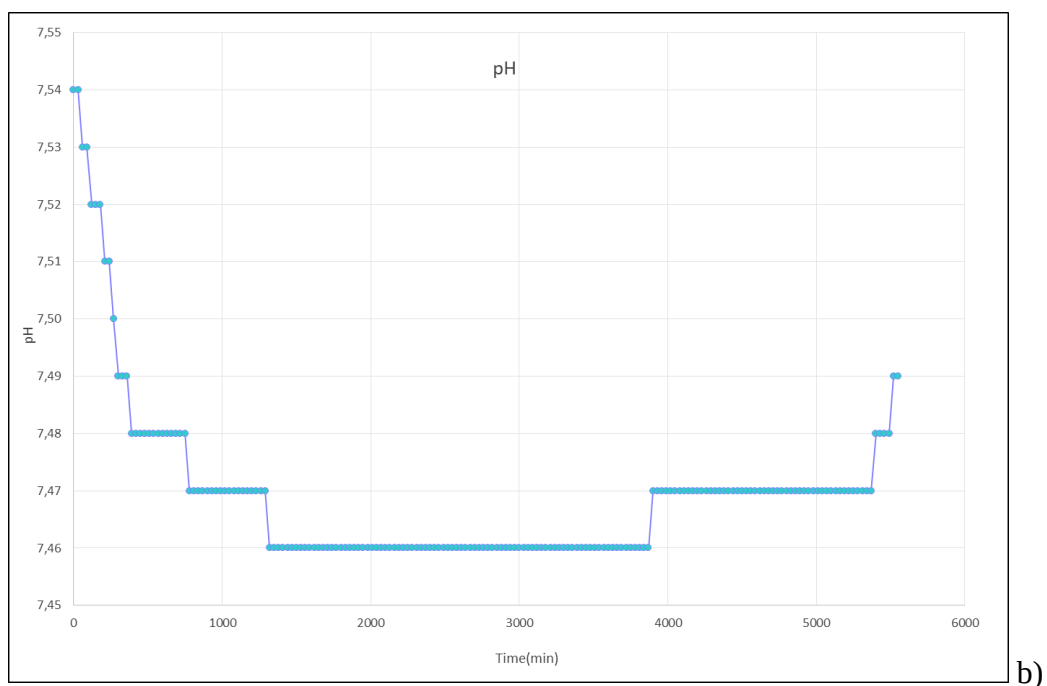
Data	pH	ORP(mV)	COD(mg/l)	% O ₂	mg/l O ₂	EC (μS/cm)	C°	C=Q/ΔH (m²/sec)
27/03/2026	7,62	210,1	65	7,8	0,54	431	33,52	7,24*10 ⁻⁶
30/03/2026	7,62	63	52	5,87	0,40	450	33,57	3,76*10 ⁻⁶
31/03/2026	7,56	21,7	-	3,9	0,27	452	34,13	-
01/04/2026	7,55	94,8	68	8	0,55	455	34,45	-
02/04/2026	7,57	138,4		10,9	0,74	460	34,6	-
03/04/2026	7,59	174,9	70	17,5	1,21	461	33,94	9,26*10 ⁻⁶
07/04/2026	7,49	203,6	90	51,9	3,84	482	31	4,17*10 ⁻⁶

Tab.4 - Caratteristiche dell'acqua che circola nel blocco in diverse date di campionamento

L'ultima fase della sperimentazione ha previsto il monitoraggio in continuo per circa quattro giorni dei parametri temperatura, pH, ORP (potenziale di ossido-riduzione, o Redox) che indica la capacità dell'acqua di ossidare o ridurre le sostanze al suo interno e contenuto di ossigeno disciolto (Fig.58 a,b,c)



a)



b)

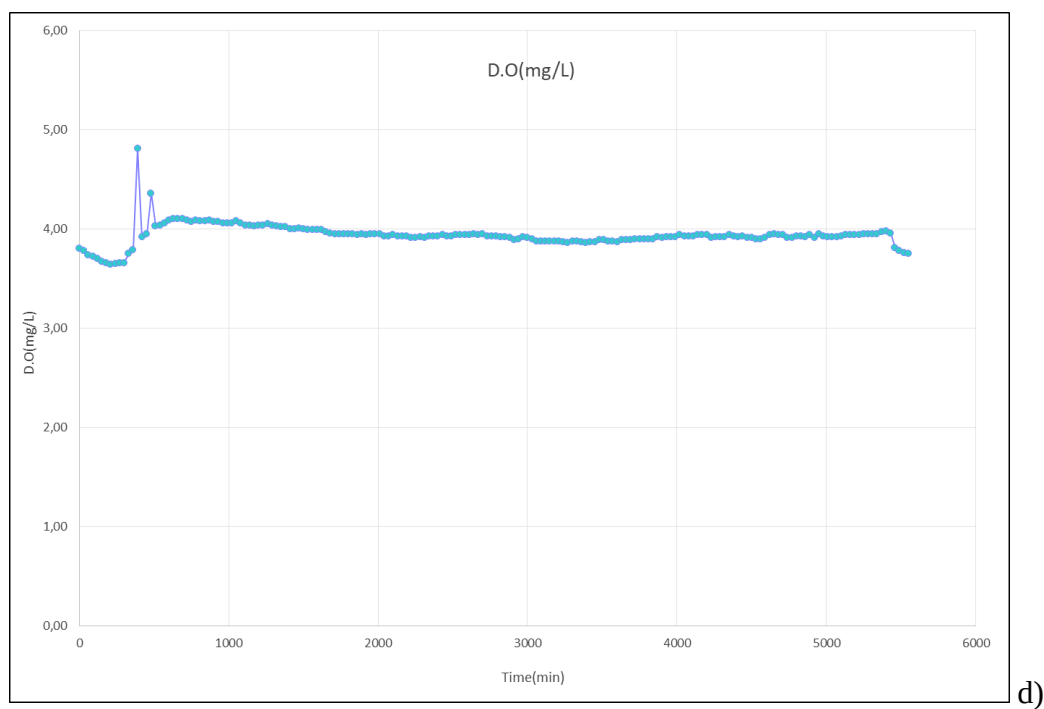
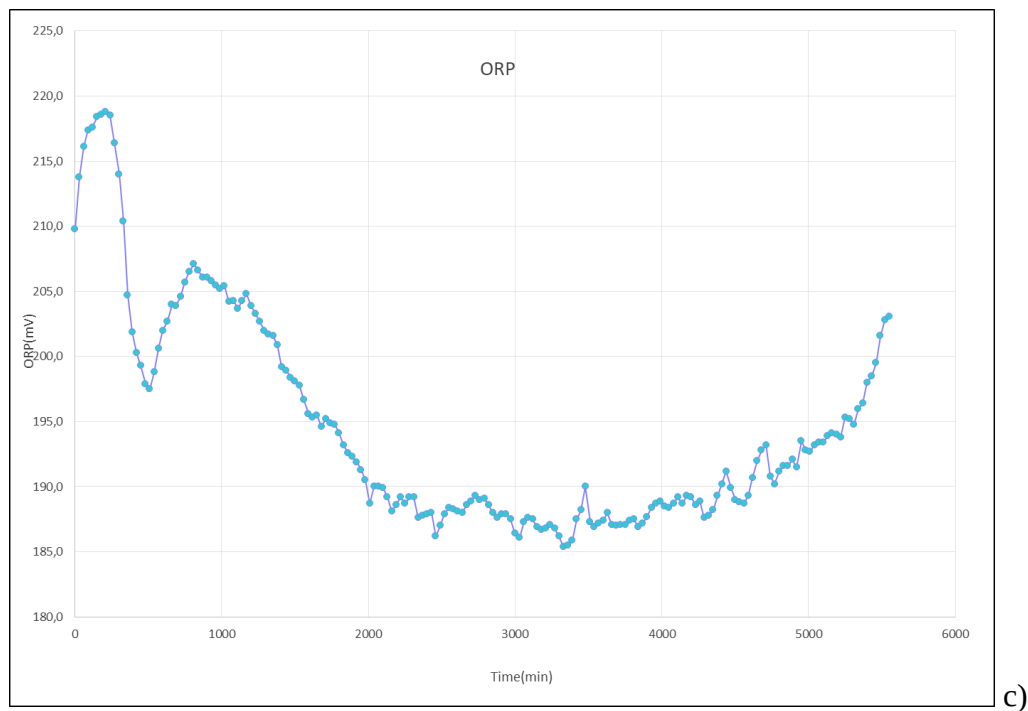


Fig.58 - Monitoraggio in continuo dei parametri dell'acqua circolante nel blocco

Il monitoraggio evidenzia un'evoluzione temporale non lineare dei parametri COD, ossigeno disciolto e potenziale redox, indicativa di un sistema idro geochimico dinamico. In una prima fase, i valori di COD pari a +60 mg/L, potenziale redox di +200 mV e ossigeno disciolto di 0,5 mg/L descrivono condizioni sub-ossidanti, con presenza di un carico ossidabile significativo ma in un contesto ancora discretamente ossigenato. Nella seconda fase si osserva una riduzione del COD a +50 mg/L, associata tuttavia a un marcato abbassamento dell'ossigeno disciolto fino a 0,27 mg/L e del potenziale redox fino a +20 mV.

Tale configurazione è indicativa di una fase di stress redox, caratterizzata da forte consumo di ossigeno e transizione verso condizioni moderatamente riducenti. Nella terza fase si registra un nuovo incremento del COD fino a 90 mg/L, accompagnato però dal ripristino di condizioni più ossidanti, con potenziale redox nuovamente pari a +200 mV e ossigeno disciolto di +3 mg/L. Questo andamento indica una riossigenazione del sistema, verosimilmente dovuta a ricambio idraulico, ricarica e mescolamento con acque più ossigenate, durate la fase di spurgo del 03/04/2026 (Tab.5), in presenza tuttavia di un carico ossidabile ancora elevato o crescente.

<i>Data</i>	<i>pH</i>	<i>ORP(mV)</i>	<i>COD(mg/l)</i>	<i>% O₂</i>	<i>mg/l O₂</i>	<i>EC</i> <i>(μS/cm)</i>	<i>C°</i>
03/04/2026	8,56	200,4	30	57	5,84	324	18,64

Tab.5 - Parametri dell'acqua usata nella fase di spurgo in data 03/04/2026

La domanda chimica di ossigeno (COD) rappresenta un indicatore dell'inquinamento idrico. Ovvero la quantità in mg di ossigeno necessaria per ossidare chimicamente le sostanze inquinanti (organiche e inorganiche) presenti in un litro di acqua. L'unità di misura del COD è espressa in mg/l. In altre parole, è la misura della materia biologica disponibile e suscettibile all'ossidazione di un agente forte ossidante in ambiente acido a caldo. Con questo test è possibile misurare tutti i composti organici che possono essere "digeriti" da un reagente.

I limiti massimi di COD imposti dalla legge italiana sono:

- 500 mg/l per lo scarico nei sistemi fognari
- 160 mg/l per lo scarico in acque superficiali

La digestione viene eseguita sui campioni con una quantità di ossidante prestabilita e calore. Il metodo per la misura di COD si basa su un'analisi colorimetrica mediante una soluzione di bicromato di potassio in presenza di acido solforico concentrato, solfato d'argento e solfato di mercurio e successiva lettura spettrofotometrica. Il campione è aggiunto direttamente alla fiala predosata di reagente e digerito a caldo a 150°C in un termostato per 2 ore (o in alternativa, con il metodo rapido, per 15 minuti a 170°C) con il termoreattore per reagenti in fiala e COD - HI839800 Hanna Instruments. Prima di effettuare la lettura occorrerà soltanto attendere il raffreddamento delle cuvette e poi inserirle nell'apposito alloggiamento dello spettrofotometro portatile Iris - HI801 (Fig.59).



Fig.59 - Termoreattore COD - HI839800 e Spettrofotometro Iris - HI801

4.5. Risultati sperimentazione e discussioni

A partire dalla necessità di monitorare le cause che generano incrostazioni e intasamenti nei sistemi circuito aperto come gli ATES, è necessario analizzare le prestazioni effettive del sistema e identificare se si è verificato un intasamento nei pozzi di produzione ed iniezione per pianificare le normali procedure di manutenzione (Gjengedal et al., 2019)[29]. Ad ogni modo, la misurazione in continuo, anche se permetterebbe di individuare criticità nel sistema, non giungerebbe a identificare la tipologia e la causa dell'intasamento, che risultano collegate a dinamiche complesse che avvengono all'interno degli acquiferi.

I risultati sperimentali, seppur non esaustivi, mostrano che la presenza di biofilm e il conseguente intasamento dei vuoti nei mezzi geologici fratturati comporta una significativa riduzione della conducibilità idraulica. In particolare, la conduttanza idraulica decresce con il tempo di funzionamento, passando dal valore di $7,14 \times 10^{-6}$ nella data del 27/03/2026 al valore di $3,78 \times 10^{-6}$ nella data del 30/03/2026 e successivamente dopo lo spurgo del sistema si è ritornati ad una conduttanza di $9,25 \times 10^{-6}$ per la data del 03/04/2026, scendendo al valore di $4,16 \times 10^{-6}$ per la data del 07/04/2026. (Fig. 57) Si è perciò osservato che nel giro di circa tre giorni la conduttanza ha subito una riduzione di circa il 50% del suo valore iniziale.

Tale riduzione deriva da più fattori tra cui la produzione e l'accumulo delle cellule batteriche, la ritenzione e precipitazione di sostanze organiche ed inorganiche, l'intrappolamento di gas (Baveye et al., 1998)[28]; (Castegnier et al., 2006)[36]. L'intasamento riduce l'efficienza degli ATES ed è influenzato principalmente dalla reintroduzione di acqua nel sottosuolo, seppure derivante dallo stesso acquifero.

I microrganismi aderiscono al supporto poroso attraverso forze elettrostatiche, forze di idratazione ed interazioni idrofobiche e steriche. Alcuni batteri possono produrre gas che rimangono intrappolati nel biofilm o possono migrare ed occludere i pori nella matrice dell'acquifero. Il biofilm ha una massa sufficientemente grande da occupare una parte significativa dei vuoti del network di fratture e di conseguenza si verificherebbero fenomeni di ostruzione e/o occlusione dei pori con conseguente diminuzione della velocità nel network di fratture. La parte biologica può influire sulle reazioni chimico-fisiche in quanto la crescita di biofilm sulle pareti delle fratture potrebbe abbassare il pH e sottrarre CO₂ inducendo precipitazione di minerali. Nel complesso, il quadro non è compatibile con una semplice evoluzione progressiva verso condizioni riducenti, bensì con un sistema redox instabile e variabile nel tempo, interessato da oscillazioni delle condizioni ossidative e da una presenza persistente di sostanze responsabili dell'aumento del COD. Tale comportamento risulta coerente con fenomeni di apporto discontinuo di sostanze orga-

niche o altri composti ossidabili, variazioni delle condizioni idrodinamiche locali, oppure processi di mescolamento tra acque sotterranee aventi differente impronta chimico-fisica.

Il setup sperimentale proposto ha permesso di arricchire la comprensione delle dinamiche complesse che avvengono negli acquiferi, permettendo di valutare, in termini quantitativi e qualitativi, l'incidenza della crescita del biofilm sulla riduzione della quantità di calore accumulabile all'interno del blocco sottoposto a vari cicli termici di accumulo e recupero di calore.

CONCLUSIONI

Le conclusioni del presente lavoro di tesi si sviluppano a partire dagli obiettivi iniziali, che erano rivolti, da un lato, alla valutazione dell'efficienza dello scambio termico in sistemi geotermici innovativi, con particolare attenzione al ruolo della convezione delle acque sotterranee, e dall'altro all'analisi dei processi che regolano lo scambio termico in mezzi porosi e fratturati, includendo gli effetti di fenomeni biologici quali la formazione di biofilm. Tali obiettivi sono stati declinati in precise ipotesi di ricerca:

- l'incremento di efficienza dovuto alla presenza di flusso idrico,
- la maggiore performance dei BHE innovativi di tipo aperto
- l'effetto negativo del biofilm and in generale del clogging sull'efficienza dello scambio termico.

I risultati ottenuti consentono di fornire una risposta articolata a tali ipotesi. In primo luogo, si è evidenziato in maniera consolidata che la presenza di acqua sotterranea e di moti convettivi rappresenta un fattore determinante nell'incremento dell'efficienza dei geoscambiatori. Le prove sperimentali di laboratorio e la validazione in campo hanno dimostrato che i BHE innovativi testati aperti sono in grado di raggiungere potenze termiche comprese tra circa 2,0 e 2,4 kW in riscaldamento e tra 2,05 e 2,3 kW in raffrescamento, mantenendo una buona stabilità operativa nei diversi regimi di funzionamento. Questo risultato, insieme all'osservazione dell'effetto termosifone in acquiferi a elevata conducibilità idraulica, conferma in modo robusto la prima ipotesi, evidenziando che il contributo della convezione non solo integra, ma può superare i limiti dei meccanismi puramente conduttivi tipici dei sistemi convenzionali.

Parallelamente, i risultati sperimentali e applicativi supportano anche la seconda ipotesi. I sistemi innovativi analizzati mostrano non solo un aumento dell'efficienza di scambio, ma anche un significativo potenziale di riduzione dei costi di installazione, che in condizioni idrogeologiche favorevoli può arrivare fino al 90%, grazie alla minore necessità di profondità e di numero di perforazioni. Questo dato è particolarmente rilevante se collegato a una delle principali barriere alla diffusione della geotermia a bassa entalpia, rappresentata proprio dall'elevato costo delle perforazioni. Inoltre, l'elevata efficienza energetica complessiva, confermata da valori di COP superiori a 2,6–2,9 e dalla lunga vita utile dei sistemi, rafforza il ruolo di tali tecnologie come soluzione concreta per la decarbonizzazione del settore termico. È chiaro che per poter dimostrare la riduzione dei costi risulta necessario uno studio di fattibilità di lungo periodo monitorando il reale funzionamento del sistema in contesti abitativi/industriali reali. Inoltre, occorrerebbe approfondire anche la questioni legati all'investimento iniziale passando dalla produzione prototipale alla produzione in serie.

Accanto a questi risultati di natura applicativa, emergono tuttavia risultati di natura preliminare legati allo studio del biofilm e dei fenomeni di clogging. Le sperimentazioni condotte sul modello fisco realizzato hanno mostrato una riduzione significativa della conduttanza idraulica, pari a circa il 50% in pochi giorni (da $7,14 \times 10^{-6}$ a $3,78 \times 10^{-6}$ m²/s), accompagnata da una dinamica non lineare dei parametri chimici e biologici del sistema. È stato inoltre osservato un recupero parziale delle prestazioni a seguito di operazioni di spurgo, seguito da un nuovo peggioramento, a dimostrazione della natura dinamica e complessa del fenomeno. Questi risultati forniscono una prima conferma della terza ipotesi, evidenziando come la crescita microbica possa influenzare negativamente lo scambio termico attraverso la riduzione della permeabilità e l'alterazione dei parametri idro-chimici. Tuttavia, la natura preliminare di tali

evidenze, limitate a scala di laboratorio e a orizzonti temporali ridotti, impone cautela nella loro generalizzazione e saranno previsti approfondimenti e sviluppi futuri.

I limiti della ricerca sono strettamente connessi alla complessità del sistema studiato e alla natura sperimentale del lavoro. Dal punto di vista metodologico, i test sono stati condotti in condizioni controllate e ritenute adiabatiche, con geometrie semplificate che non riproducono completamente la variabilità dei sistemi naturali. Inoltre, la durata limitata delle prove, in particolare per lo studio del biofilm, non consente di valutare compiutamente gli effetti a lungo termine, che risultano invece cruciali per applicazioni reali. A ciò si aggiungono limiti di natura tecnica ed economica, tra cui l'elevato costo iniziale degli impianti, fortemente influenzato dalle perforazioni, e la dipendenza dalle condizioni idrogeologiche locali, non sempre favorevoli. Infine, permane un limite conoscitivo legato alla scarsa quantificazione dei processi bio-fisici nei sistemi geotermici, che rappresenta uno degli aspetti meno esplorati in letteratura. Alla luce di tali risultati e limiti, emergono chiare prospettive future. In termini scientifici, risulta necessario sviluppare modelli integrati che accoppino i processi termici, idraulici e biologici, in grado di descrivere il comportamento dei sistemi nel lungo periodo e in condizioni reali. In particolare, lo studio del biofilm dovrà essere esteso a scale maggiori e a contesti idrogeologici differenti, per quantificare in modo più affidabile l'impatto del clogging sull'efficienza termica e sulla durabilità degli impianti. Dal punto di vista tecnologico, sarà fondamentale ottimizzare il design dei BHE innovativi e sviluppare sistemi di monitoraggio continuo e manutenzione predittiva, capaci di prevenire o mitigare i fenomeni di degradazione prestazionale.

Infine, le prospettive applicative risultano particolarmente promettenti. Le stime indicano una possibile crescita significativa della geotermia a bassa entalpia, con potenze installate previste fino a 2.200–3.000 MW_t entro il 2030 e produzioni termiche dell'ordine di 4,5–6 TWh_t/anno. In questo contesto, sistemi innovativi come quelli oggetto della presente tesi possono giocare un ruolo chiave, soprattutto se integrati in distretti energetici e reti di teleriscaldamento di nuova generazione. Tuttavia, la diffusione su larga scala richiederà anche un adeguamento del quadro normativo, una semplificazione delle procedure autorizzative e una maggiore diffusione delle conoscenze tecniche.

In conclusione, il lavoro dimostra in modo chiaro che l'integrazione della componente convettiva nei sistemi geotermici rappresenta un elemento fondamentale per il miglioramento delle prestazioni, confermando la validità delle soluzioni innovative proposte. Allo stesso tempo, evidenzia come i processi bio-fisici, ancora poco compresi, possano costituire un fattore limitante significativo, aprendo nuove linee di ricerca necessarie per garantire l'affidabilità e la sostenibilità di tali tecnologie nel lungo periodo.

NOTES

1. I valori delle temperature nei serbatoi (CAP.2) e nei vari punti del blocco dell'esperimento (CAP.4) sono stati rilevati da termocoppie di tipo K e misurati con datalogger TC-08 che permette di misurare temperature da -270 °C fino a 1760 °C (da -454 a 3308 °F). Il TC-08 è dotato di un sensore di temperatura interno con compensazione della giunzione fredda (CJC) in grado di registrare la temperatura ambiente. È possibile utilizzare la morsettiere PP624 per collegare altri tipi di sensori, così come fatto per i sensori di pressione RS 828-507(range: 0 -50 mbar) posti in corrispondenza delle porte di entrata e uscita del blocco. Le misurazioni vengono visualizzate in tempo reale su un grafico con scalatura automatica o visualizzati da remoto grazie all'app gratuita PicoLog Cloud.
2. Per valutare la velocità del flusso circolante nel blocco dell'esperimento (CAP.4) è stato utilizzato un flussimetro digitale Ifm electronic SM6004 con sensore di flusso magneto-induttivo, range di misura 0,1...25 l/min, tempo di risposta 0,15 s, applicato per fluidi con (conducibilità $\geq 20 \mu\text{S/cm}$ e temperatura $-10^\circ\text{C}/70^\circ\text{C}$).
3. I valori dell'acqua circolante nel blocco dell'esperimento (CAP.4) sono stati analizzati dalla Sonda multiparametrica Hanna Instruments HI98494 portatile a tenuta stagna, che monitora fino a 12 diversi parametri per la qualità dell'acqua.
4. Per la misura di COD è stato utilizzato il termoreattore per reagenti a fiala HI839800 Hanna Instruments e successivamente per la lettura lo Spettrofotometro portatile Iris - HI801 con tecnologia a raggio di riferimento (split-beam).
5. Per l'analisi dei dati e i grafici è stato utilizzato il software Microsoft Excel.
6. Per la creazione delle immagini in Fig.52 e Fig .54 è stato utilizzato il software Autodesk Autocad .
7. Le immagini sono state editate e con software Paint.net

SITI CONSULTATI

- A.N.I.P.A, il portale della perforazione – www.anipapozzi.it
- ARPA, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale–www.arpa.it
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – www.cslp.it
- Edilportale.com, il portale dell'edilizia – www.edilportale.com
- EGEC, European Geothermal Energy Council – www.egec.org
- Geo Heat – geoheat.oit.edu
- Geo Net srl – www.geo-net.it
- Hoepli–www.hoepli.it
- IGA, International Geothermal Association – www.geothermal-energy.org
- McGraw-Hill – www.ateneonline.it/palm
- ScienceDirect – www.sciencedirect.com
- Therm-tech Technological Engineering – www.therm-tech.it
- UGI, Unione Geotermica Italiana – www.unionegeotermica.it
- <https://www.researchgate.net/>
- <https://blog.geostru.eu>

RICONOSCIMENTI

Desidero esprimere la mia più profonda gratitudine al mio relatore, il Chiar.mo Prof. Pastore, per aver creduto in me fin dall'inizio, per la sua guida illuminante e per il costante supporto scientifico e umano che hanno reso possibile questo percorso di dottorato. Un ringraziamento sincero va anche alla Prof. Giasi e a tutto il comitato scientifico per i preziosi spunti di riflessione e le critiche costruttive che hanno arricchito questa ricerca.

Ringrazio sentitamente il Politecnico di Bari, tutto il Dipartimento Dicatech per avermi fornito le risorse, i mezzi e la borsa di studio necessari per svolgere questo lavoro. Un grazie va anche ai miei colleghi di dottorato, compagni di lunghe discussioni, caffè rigeneranti e momenti di inevitabile ma condivisa stanchezza. Senza il vostro supporto quotidiano, questo viaggio sarebbe stato molto più faticoso. Infine, il ringraziamento più grande va a mia madre, per essere stata la mia più grande ancora di salvezza e a mio padre che ha supervisionato tutto da lassù. Grazie per la vostra pazienza infinita, per aver ascoltato sfoghi e per aver celebrato con me ogni piccolo traguardo.

Infinitamente Grazie!

LISTA DELLE FIGURE

- Fig.1 - Origine del calore terrestre (Sistemi a pannelli radianti e pompe di calore, Caleffi spa, 2008).
- Fig.2 - Andamento della temperatura nel giro di un anno (Geosolution srl).
- Fig.3 - Rappresentazione schematica di un sistema naturale geotermico, (Antonio Valdisturlo)
- Fig.4 - Modello di un sistema geotermico. La curva 1 è la curva di ebollizione dell'acqua; la curva 2 mostra l'andamento della temperatura del fluido lungo il suo percorso dal punto di ingresso A a quello di uscita E. IGA (International Geothermal Association)
- Fig.5 - Diagramma con l'utilizzazione dei fluidi geotermici (Fanelli e Dickson,2004)
- Fig.6 - Carta delle potenzialità geotermiche italiane (consiglio nazionale geologi.it)
- Fig.7 - Sviluppo negli anni dell'energia geotermica Gutiérrez-Negrín (2024)
- Fig.8 - Regime termico del sottosuolo in un sistema a bassa entalpia (Ordine dei Geologi)
- Fig.9 - Conduttività termica e calore specifico volumetrico del sottosuolo alla temperatura di 20°C VDI 2000
- Fig.10 - Gradiente termico
- Fig.11 - Modello concettuale pozzo di prelievo in falda (A. Filocamo 2010)
- Fig.12 - Schema che mostra l'andamento della temperatura all'aumentare della profondità (Dipartimento Protezione Civile del-la Provincia di Trento 2012)
- Fig.13 - Porzione del sottosuolo ei contributi energetici per il suo equilibrio termico (Nicola Rainone 2010)
- Fig.14 - Schema riassuntivo analogie tra idrogeologia e termogeologia (Banks2008)
- Fig.15 - Schemi semplificati di sistemi con pompe di calore (Fanelli e Dickson 2004)
- Fig.16 - Schema semplificato funzionamento di una PdC (Manuale fisica tecnica Marco spiga 2012)
- Fig.17- Calcolo del COP minimo termodinamico per assicurare la convenienza rispetto ad un impianto a caldaia a gas (Centro studi Galileo 2019)
- Fig.18 - Configurazioni impiantistiche per impianti idrotermici (Alessandro Baietto e co 2010)
- Fig.19 - Schema strutturale di uno scambiatore di calore a piastre (Catalogo Tempcro.srl 2012)
- Fig.20 - Diverse fasi della costruzione di un pozzo(Acquedotti e Fognature Luigi Da Deppo 2006)
- Fig.21 - Diametro del pozzo e portata emungibile (Acquedotti Luigi Da Deppo 2006)
- Fig.22 - Perdite reali dovute all'acquifero e al pozzo di presa (idrogeologia applicata Vincenzo Francani 2005)
- Fig.23 - Un sistema doublette dove il pozzo di presa è a monte del gradiente e quello di restituzione a valle,la distanza L è tale da non generare feedback idraulico.Nel reticolato,le frecce mostrano il flusso dell'acqua,mentre le linee numerate rappresentano i contorni della falda con valori del carico idraulico(decrescente da sinistra a destra) (An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, David Banks 2012)
- Fig.24 - Un sistema doublette come figura precedente dove nel reticolato (b) si è leggermente al di sotto del valore limite di Le c'è una minima influenza termica, mentre nel (c), L è ampiamente sottodimensionata
- Fig.25 - Posizionamento invertito dei pozzi doublette, rispetto al gradiente naturale della falda, si nota come il bulbo termico chiuda perfettamente il circuito, pregiudicando il rendimento dell'impianto
- Fig.26 - Varie soluzioni possibili di sonde orizzontali (Consiglio Europeo per l'Energia Geotermica 2009)
- Fig.27 - Schema classico di un impianto a sonde orizzontali (Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore 2012)

- Fig.28 - Rendimento termico per alcuni tipi di suolo dell'Europa Centrale (Verein Deutscher Ingenieure - Associazione degli Ingegneri Tedeschi 2011)
- Fig.29 - Tipi di sonde viste in sezione (Impianti a pompe di calore geotermiche, Caleffi 2010)
- Fig.30 - Schema classico a sonde verticali (Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore 2012)
- Fig.31 - Rendimento termico per varie tipologie di suolo nell'Europa centrale (Idraulica n. 38, intitolata "Impianti a pompe di calore geotermiche, Caleffi, 2010)
- Fig.32 - Potenza termica installata delle pompe di calore geotermiche in Italia. (Unione Geotermica Italiana,2015)
- Fig.33 - Proiezione della potenza geotermica installata in Italia nel periodo 2025–2030 in tre scenari: Business As Usual (BAU), crescita accelerata e scenario conservativo (The European House – Ambrosetti2024)
- Fig.34 - Componenti del setup sperimentale
- Fig.35 - Scambiatore di calore innovativo: a) prototipo secondo il brevetto italiano n° 102024000010582; b) configurazione della guarnizione per permettere il controflusso del fluido termovettore di calore e dell'acqua sotterranea; c) installazione del prototipo nell'ambiente artificiale AE2 prima del riempimento con il materiale granulare.
- Fig.36 - Risultati del test di risposta termica condotto tra il 30 giugno 2023 e il 3 luglio 2023 sul BHE coassiale. Temperatura in ingresso (linea arancione), temperatura in uscita (linea ciano), potenza termica scambiata (puntini verdi).
- Fig.37 - Temperatura monitorata all'interno dell'ambiente artificiale AE1 alla profondità z dalla parte superiore dell'ambiente artificiale e alla distanza r dalla parete del BHE durante il test di risposta termica condotto tra il 30 giugno 2023 e il 3 luglio 2023 sul nuovo BHE riempito di acqua sotterranea. T5 ($z = 0,5$ m; $r = 0,05$ m); T6 ($z = 1,0$ m; $r = 0,05$ m); T7 ($z = 0,5$ m, $r = 0,2$ m); T8 ($z = 1,0$ m, $r = 0,20$ m).
- Fig.38 - Risultati del test di risposta termica condotto tra il 29 settembre 2023 e il 2 ottobre 2023 sul nuovo BHE riempito d'acqua di falda. Temperatura in ingresso (linea arancione), temperatura in uscita (linea ciano), potenza termica scambiata (puntini verdi), media mobile a 780 s della potenza termica scambiata (linea rossa).
- Fig.39 - Temperatura monitorata all'interno dell'ambiente artificiale AE2 alla profondità z dalla parte superiore dell'ambiente artificiale e alla distanza r dalla parete del BHE durante il test di risposta termica condotto tra il 29 settembre 2023 e il 2 ottobre 2023 sul nuovo BHE riempito di acqua sotterranea. T1 ($z = 0,5$ m; $r = 0,05$ m); T2 ($z = 1,0$ m; $r = 0,05$ m); T3 ($z = 0,5$ m, $r = 0,2$ m); T4 ($z = 1,0$ m, $r = 0,20$ m).
- Fig.40 - Estratti Carta Geologica Italiana Foglio 438
- Fig.41 - Localizzazione impianto Google Maps
- Fig.42 - Impianto dimostratore per la verifica dell'efficienza di geo – scambiatori innovativi presso le Piscine Comunali di Modugno.
- Fig.43 - Sistema di monitoraggio e controllo dei processi a distanza.
- Fig.44 - Fasi realizzative dell'ambiente sotterraneo superficiale
- Fig.45 - Prototipo del Geoscambiatore innovativo realizzato da GEET srl in lega d'alluminio
- Fig.46 - Test del 18/12/2025
- Fig.47 - Test del 21/01/2026
- Fig.48 - Illustration of clogging and un-clogging processes (modified after Candel et al. (2014)
- Fig.49 - Fasi di revamping del blocco
- Fig.50 - Ambiente artificiale per garantire condizioni adiabatiche

Fig.51 - Flussimetro digitale e Sonda multiparametrica

Figura.52 - Sketch del setup sperimentale realizzato.

Fig.53 - Curve caratteristiche per diverse temperature

Fig.54 - Network di fratture e disposizione termocoppie

Fig.55 - Monitoraggio della temperatura per tredici giorni consecutivi per i vari percorsi delle fratture nel blocco

Fig.56 - Monitoraggio della differenza di altezza idraulica e della pressione nella portata di immissione per tredici giorni consecutivi

Fig.57 - Grafico Relativo alle diverse date

Fig.58 - Monitoraggio in continuo dei parametri dell'acqua circolante nel blocco

Fig.59 - Termoreattore COD - HI839800 e Spettrofotometro Iris - HI801

LISTA DELLE TABELLE

Tab.1 - Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°C). ((a) Muffler and Cataldi (1978), (b) Hochstein (1990),(c) Benderitter and Cormy (1990), (d) Nicholson (1993), (e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

Tab.2 - Calore specifico al variare dell'umidità

Tab.3 - Caratteristiche dell'acqua circolante nel network di fratture

Tab.4 - Caratteristiche dell'acqua che circola nel blocco in diverse date di campionamento

Tab.5 - Parametri dell'acqua usata nella fase di spurgo in data 03/04/2026

BIBLIOGRAFIA

- [1] Omer, A.M. "Energy, Environment and Sustainable Development", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.12, pag.2265-2300, 2008.
- [2] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), Georisorse e geotermia: quadro normativo e amministrativo 2023
- [3] International Energy Agency (IEA). The Future of Heat Pumps. Paris 2022
- [4] Gehlin,S.,Spitler, J. D. . Natural convection in groundwater-filled boreholes used as ground heat exchangers. Applied Energy, 164, 352-365, 2016
- [5] Manfred P. Hochstein, Classification and assessment of geothermal resources ,1990
- [6] Donald E. White, Characteristics of Geothermal Resources, 1973
- [7] L. J. Patrick Muffler ,L. Cataldi, Usgs Geothermal Resource Assessment,1978
- [8] B. Lindal, Industrial and Other Applications of Geothermal Energy, 1973
- [9] Dickson, M.H. and Fanelli, M. "What Is Geothermal Energy?" International Geothermal Association, Bochum, 2004
- [10] M. Bloemendal, T. Olsthoorn, F. van de Ven, "Combining climatic and geohydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage", Science of The Total Environment, pag. 621-633, 2015.
- [11] Paul J. Lienau, Geothermal Direct-Use Engineering and Design Guidebook, Geo-Heat Center (Oregon Institute of Technology), 1998
- [12] Frank D. Stacey, David E. Loper, Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology, 1988
- [13] Armstead, H.C.,Geothermal Energy, Its Past, Present and Future Contributions to Energy Needs of Man. 2nd Edition, London, New York, 1983
- [14] Savino Basta, Fabio Minchio,"GEOTERMIA E POMPE DI CALORE" Guida pratica agli impianti geotermici di climatizzazione, 2007
- [15] Edward Linacre e Bart Geerts, Climates and Weather Explained e pubblicato da Routledge, 1997
- [16] Daniel Pahud (ISAAC), "Geothermal Energy and Heat Storage" presso la SUPSI, 2002
- [17] Zarrella, , Il Progetto Europeo Cheap-GSHPs, DOI 10.7343/as-2017-286, 2020
- [18] Kevin Rafferty, An Information Survival Kit For The Prospective Geothermal Heat Pump, Owner Geo-Heat Center (Oregon Institute of Technology), 2001
- [19] Basta, S. E Minchio, F., Geotermia e pompe di calore - Guida pratica agli impianti di climatizzazione, 2007
- [20] Ghislain de Marsily, Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers, Academic Press,1986
- [21] Sondre Gjengedal, Randi K. Ramstad, Bernt O. Hilmo, Bjørn S. Frengstad, "Fouling and clogging surveillance in open loop GSHP systems: A systematic procedure for fouling and clogging detection in the whole groundwater circuit", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019
- [22] M. Viti, Geotermia in Italia. Aspetti geologici, tecnologici ed ambientali. GEOLOGIA DELL'AMBIENTE, 2, 25-32, 2021.
- [23] R. Bertani, Geothermal power generation in the world update report, 2016

- [24] L. Lazzarin, Sorgenti termiche delle pompe di calore e sistemi a doppia sorgente, 2019
- [25] Martin Bloemendal, Niels Hartog, "Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems", *Geothermics* vol. 71, pag 306-319, 2018.
- [26] Luc Burté*, Charles A. Cravotta III, Lorine Bethencourt, Julien Farasin, Mathieu Pédro, Alexis Dufresne, Marie-Françoise Gérard, Catherine Baranger, Tanguy Le Borgne, and Luc Aquilina, "Kinetic Study on Clogging of a Geothermal Pumping Well Triggered by Mixing-Induced Biogeochemical Reactions", *Environ Sci. Technol*, pag.21-53, 2019.
- [27] Jianguo Feng, Yao Zhao, Deshuai Ji*, Zongjun Gao, An Experimental Study on Bio-Clogging in Porous Media during Geothermal Water Reinjection ,2021.
- [28] Philippe Baveye, Philippe Vandevivere, Blythe L. Hoyle, Show all 5 authors, Diego Lozada, "Environmental Impact and Mechanisms of the Biological Clogging of Saturated Soils and Aquifer Materials", *Critical Reviews In Environmental Science and Technology* 28(2):123-191, 1998.
- [29] Gjengedal, Brøtan, Buset et al., "Fluid flow through 3D-printed particle beds: a new technique for understanding, validating, and improving predictability of permeability from empirical equations". *Transp Porous Med* 134, pag.1-40, 2020.
- [30] Allison, D.G., "The biofilm matrix. Biofouling", *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research* vol.19 (2), pag.139–150, 2023.
- [31] Flemming, H.-C., "Biofouling in Water Systems—Cases, Causes and Countermeasures". *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol.59 (6), pag.629– 640, 2002.
- [32] Zhang, X., Bishop, P.L., "Biodegradability of biofilm extracellular polymeric substances", *Chemosphere* vol.50 (1), pag.63–69, 2003.
- [33] Picioreanu, C., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., "Twodimensional model of biofilm detachment caused by internal stress from liquid flow", *Biotechnol. Bioeng.* 72 (2), 205–218, 2001.
- [34] Ross, N., Bickerton, G., "Application of biobarriers for groundwater containment at fractured bedrock sites", *Remediation* 12 (3), pag. 5-21, 2002
- [35] Beretta, G. P. "Groundwater recharge through wells in open loop geothermal system: problems and solutions" - part 1. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 6(2), 2017.
- [36] Castagnier, Nathalie Ross , Robert P. Chapuis , Louise Deschênes , Réjean Samson, "Long-term persistence of a nutrient-starved biofilm in a limestone fracture", *Water Research*, vol. 40, issue 5, pages 925-934, 2006.
- [37] Gjengedal, Brøtan, Buset et al., "Fluid flow through 3D-printed particle beds: a new technique for understanding, validating, and improving predictability of permeability from empirical equations". *Transp Porous Med* 134, pag.1-40, 2020.
- [38] Cherubini, C., Giasi, CI, e Pastore N., " Bench scale laboratory test to analyze non-linear flow in fractured media", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol.16, pag. 2511–2522, 2012.
- [39] Cherubini, C., Giasi, CI, e Pastore N., "Evidence of non-Darcy flow and non- Fickian transport in fractured media at laboratory scale", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 17, pag. 2599–2611, 2013.
- [40] Cherubini, C., Giasi, CI, e Pastore N., "On the reliability of analytical models to predict solute transport in a fracture network", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 18, pag. 2359–2374, 2014.
- [41] T.Heinze e N. Pastore, Velocity-dependent heat transfer controls temperature in fracture networks" , pubblicata su *Nature Communications* 2023

CURRICULUM

NOME – FRANCESCO

COGNOME – ANACLERIO

NAZIONALITA' – ITALIANA

DATA DI NASCITA - 23/04/1986

MAIL – f.anaclerio@phd.poliba.it

Tel - 3801774574

Francesco Anaclerio è un ingegnere ambientale con una solida formazione accademica e un'esperienza professionale maturata in ambito tecnico e di ricerca. Laureato magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio presso il Politecnico di Bari con votazione di 105/110, ha sviluppato competenze specifiche nel settore della geotermia e dei sistemi ambientali, approfondendo tematiche legate all'energia e alla sostenibilità.

Dal 2022 lavora come assegnista di ricerca presso il Politecnico di Bari, collaborando con il Dipartimento DICA-TECh e con l'azienda Bellizzi S.r.l., occupandosi di sistemi innovativi per l'accumulo termico nel sottosuolo, finalizzati allo sviluppo di città resilienti. In precedenza, ha ricoperto ruoli tecnici come ingegnere di supporto presso diverse società, tra cui Pagone S.r.l. e ITALY RE S.r.l., oltre a esperienze come ispettore di cantiere nel settore delle infrastrutture autostradali, maturando competenze operative nella gestione e verifica dei cantieri.

Nel corso della sua carriera ha acquisito conoscenze nel campo dei sistemi di gestione ambientale, con formazione certificata sulle normative UNI EN ISO 14001 e 9001. Possiede ottime capacità comunicative e organizzative, sviluppate sia in ambito accademico sia lavorativo.

È inoltre dotato di solide competenze tecniche informatiche, utilizza strumenti avanzati come droni e apparecchiature per indagini termografiche, ed è esperto nella normativa sulla sicurezza sul lavoro. Si distingue per versatilità, precisione e capacità di lavorare in team, unite a una buona manualità e conoscenza pratica del settore edilizio.