

**POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Campo sperimentale di una parete  
energetica**



**Relatori**

Prof. Marco Barla

Ing. Matteo Baralis

**Candidato**

Paolo Ruberto

Ottobre 2019



*Alla mia famiglia,  
a tutti coloro che mi sono  
stati vicini in questi anni,  
e a te, Bella*



# Indice

CAPITOLO 1.....	13
Introduzione .....	13
CAPITOLO 2.....	17
Geotermia.....	17
2.1 Flussi geotermici nel territorio italiano .....	21
2.2 Caratterizzazione geotermica .....	23
2.3 Anomalie geotermiche del territorio italiano .....	24
2.4 I serbatoi dei campi geotermici italiani.....	26
2.5 Geotermia ad alta e media entalpia .....	28
2.5.1 Avanzamenti tecnologici attesi .....	30
2.5.1.1 Esplorazione dei campi geotermici .....	30
2.5.1.2 Perforazione con metodi tradizionali.....	31
2.5.1.3 Perforazione con metodi avanzati .....	35
2.5.1.4 Generazione di energia elettrica .....	37
2.6 Geotermia a bassa entalpia .....	38
2.6.1 Pompe di calore.....	39
2.6.2 Sistemi a circuito aperto .....	45
2.6.3 Sistemi a circuito chiuso .....	46
2.6.3.1 Sonde geotermiche verticali .....	49
2.6.3.2 Sonde geotermiche orizzontali .....	51
2.6.3.3 Geostrutture energetiche .....	54
2.6.4 Avanzamenti tecnologici attesi .....	58
2.7 Generalità sullo scambio termico .....	60
CAPITOLO 3.....	65

Campo sperimentale: Energy Center .....	65
3.1 Realizzazione dell'impianto a sonde geotermiche .....	68
3.1.1 Descrizione della sensoristica installata.....	76
3.2 Prove sperimentali di raffrescamento .....	85
3.2.1 Prova 1: raffrescamento con circuiti 2 e 3 in serie .....	90
3.2.1.1 Quantificazione della potenza estraibile.....	93
3.2.2 Prova 2: raffrescamento con circuito 3 .....	98
3.2.2.1 Quantificazione della potenza estraibile.....	100
CAPITOLO 4.....	105
Modellazione numerica .....	105
4.1 Problema Termo-Idraulico accoppiato .....	106
4.1.1 Tipi di condizioni al contorno .....	109
4.2 Geometria del modello.....	111
4.2.1 Parametri dei materiali .....	118
4.2.2 Simulazione <i>a</i> : Prova 1 .....	124
4.2.2.1 Quantificazione della potenza estraibile.....	133
4.2.3 Simulazione <i>b</i> : Prova 1 .....	135
4.2.3.1 Quantificazione della potenza estraibile.....	140
CAPITOLO 5.....	143
Conclusioni .....	143
Riferimenti bibliografici.....	149

## Indice delle figure

Figura 1 - Struttura interna della Terra (Dickson e Fanelli, 2004) .....	18
Figura 2 - Schema delle celle convettive nell'astenosfera (This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics, 2016).....	19
Figura 3 - Disposizione delle placche tettoniche, delle dorsali e delle zone di subduzione (Dickson e Fanelli, 2004) .....	20
Figura 4 - Diagramma di Lindal (Dickson & Fanelli, 2004) .....	21
Figura 5 - Flusso di calore conduttivo nell'area italiana (Cataldi et al., 1995).....	26
Figura 6 - Distribuzione delle temperature a 1000 m di profondità (Cataldi et al., 1995) .....	29
Figura 7 - Spallation drilling (ETH zürich).....	32
Figura 8 - Schema progettuale del casing (Minerals Management Service, 2000)..	34
Figura 9 - Schema HDR-EGS (Geodynamics: The Economist, 2010).....	36
Figura 10 - Andamento della temperatura nel sottosuolo ( <a href="https://www.researchgate.net">https://www.researchgate.net</a> ).....	39
Figura 11 - Schema di funzionamento di una pompa di calore (Banks, 2008) .....	41
Figura 12 - Schema di funzionamento di una GSHP (Banks, 2008).....	42
Figura 13 - Schematizzazione del funzionamento di un impianto di geoscambio ( <a href="http://www.iocasa.it">http://www.iocasa.it</a> ) .....	43
Figura 14 - A sinistra un esempio di impianto a circuito chiuso; a destra un esempio di impianto a circuito aperto (Banks, 2008) .....	44
Figura 15 - Sistema geotermico a circuito aperto ( <a href="http://www.geo-energy.org">www.geo-energy.org</a> ) .....	45
Figura 16 - Sonde geotermiche a singola e doppia U ( <a href="http://www.isolportale.com">www.isolportale.com</a> ) .....	48
Figura 17 - Sonde geotermiche coassiali ( <a href="http://www.isolportale.com">www.isolportale.com</a> ) .....	48
Figura 18 - Sistema geotermico a circuito chiuso - sonde geotermiche verticali ( <a href="http://www.geo-energy.org">www.geo-energy.org</a> ) .....	50
Figura 19 - Sezione di un sistema con sonde geotermiche orizzontali ( <a href="http://www.rossatogroup.com">www.rossatogroup.com</a> ) .....	52
Figura 20 - Sistemi geotermici a circuito chiuso - sonde geotermiche orizzontali ( <a href="http://www.geo-energy.org">www.geo-energy.org</a> ) .....	52

Figura 21 – Schema di installazione di un sistema geotermico a sonde orizzontali (www.consulente-energia.com) .....	53
Figura 22 – Sistemi a circuito chiuso – Sezione di un palo energetico (www.ge-energy.org) .....	55
Figura 23 – Schema di tubi scambiatori di calore fissati alla gabbia di armatura di un palo energetico di fondazione (Brandl, 2006) .....	56
Figura 24 – Schematizzazione di un diaframma (www.sciencedirect.com) .....	57
Figura 25 – Sezione trasversale di un diaframma con evidenziate le posizioni degli scambiatori di calore (www.sciencedirect.com) .....	57
Figura 26 – Schema di armatura di un diaframma energetico e tubazioni di scambio di calore (Brandl, 2006) .....	58
Figura 27 – Energy Center (www.Mattioda.it) .....	66
Figura 28 – Vista dall'alto dell'Energy Center (Google Maps) .....	67
Figura 29 – Armatura di scavo .....	70
Figura 30 – Infissione paratie per mezzo della benna .....	71
Figura 31 – Stesa dello strato di magrone .....	72
Figura 32 – Carotatrice ad acqua e fori effettuati sul muro .....	73
Figura 33 – Tubo RAUTHERM S 20x2.0 mm .....	74
Figura 34 – Geometria quotata (cm) delle sonde geotermiche .....	75
Figura 35 – Posizionamento sonde geotermiche .....	75
Figura 36 – Modello laterale .....	76
Figura 37 – Sensore di temperatura immergibile .....	77
Figura 38 – Barretta estensimetrica resistiva .....	78
Figura 39 – Cella di pressione .....	80
Figura 40 - Installazione orizzontale di una cella di pressione .....	81
Figura 41 - Installazione verticale di una cella di pressione .....	81
Figura 42 – Sentek Drill & Drop Probe .....	82
Figura 43 - Misuratore di potenziale idrico TEROS 21 .....	84
Figura 44 - Unità di acquisizione con sistema di trasferimento GPRS .....	85
Figura 45 – Modalità di raffrescamento in estate e di riscaldamento in inverno (www.consulente-energia.com) .....	86
Figura 46 – Ciclo frigorifero (Daniele Pugliesi) .....	86

Figura 47 – Pompa di calore geotermica NIBE F1155.....	88
Figura 48 - Contacalorie SITRANS FUE950 .....	88
Figura 49 – Flussimetri SITRANS F M MAG .....	89
Figura 50 – Schema rappresentativo dei tre circuiti di sonde geotermiche.....	90
Figura 51 – Grafico BT2, BT3 Prova 1.....	91
Figura 52- Grafico BT2, BT3 Prova 1.....	92
Figura 53 – Grafico ciclo BT2, BT3 Prova 1 .....	92
Figura 54 – Grafico ciclo ct, ht generale - ora.....	93
Figura 55 – C8T1 (Temperatura gestecno) .....	98
Figura 56 – C8T6 (Temperatura gestecno) .....	99
Figura 57 - Grafico BT2, BT3 Prova 2.....	99
Figura 58 - Grafico ciclo BT2, BT3 prova 2 .....	100
Figura 59 – Thermo-Hydro-Mechanical coupling approach (Wolfram Rühaak & Ingo Sass, 2013).....	106
Figura 60 - Dominio di risoluzione e confine.....	109
Figura 61 - Modello DXF importato su FEFLOW (quote in m) (AUTOCAD).....	112
Figura 62 – Discretizzazione curvatura (AUTOCAD).....	113
Figura 63 – Generazione della mesh .....	114
Figura 64 - Affinamento della mesh in corrispondenza delle sonde geotermiche	115
Figura 65 – Simulation-Time Control .....	115
Figura 66 – Problem Class.....	116
Figura 67 – 3D Layer Configurator .....	117
Figura 68 – Modello 3D .....	117
Figura 69 – Discrete features .....	118
Figura 70 – Resistività termica del suolo in funzione dell’umidità (modificato da Delmastro, 2009) .....	120
Figura 71 – Modello 3D – Conducibilità idraulica: $K_{yy}$ .....	123
Figura 72 – Particolare del confine aria/muro/terreno.....	124
Figura 73 - Grafico per la stazione TORINO VIA DELLA CONSOLATA – ARPA Piemonte .....	125
Figura 74 - Grafico per la stazione TORINO VIA DELLA CONSOLATA – ARPA Piemonte .....	126

Figura 75 – Time series .....	126
Figura 76 – Grafico BT1 - ora .....	127
Figura 77 – Time series .....	127
Figura 78 – Temperature BC .....	128
Figura 79 – Fluid-flux BC .....	129
Figura 80 – Temperature BC .....	129
Figura 81 – Andamento delle temperature – Slice 9.....	130
Figura 82 – Andamento delle temperature – Modello 3D.....	131
Figura 83 – Grafico BT2, BT3 simulazione a .....	132
Figura 84 – Interpolazione temperatura - profondità.....	136
Figura 85 – Time-series BT2-ora.....	137
Figura 86 – Time-series velocità-ora .....	137
Figura 87 – Andamento delle temperature – Slice 9.....	138
Figura 88 - Andamento delle temperature – Modello 3D .....	138
Figura 89 – Grafico BT2, BT3 simulazione b .....	139
Figura 90 - Grafico ciclo BT2, BT3 simulazione b.....	140
Figura 91 – Grafico T mandata, T ritorno (Prova 1- Simulazione b) .....	146

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Fornitura tubo RAUTHERM S (REHAU).....	74
Tabella 2 – Dati per il calcolo della potenza estraibile.....	94
Tabella 3 – Potenza estraibile .....	95
Tabella 4 – Risultati prova 1 .....	97
Tabella 5 – Dati per il calcolo della potenza estraibile.....	101
Tabella 6 - Potenza estraibile.....	101
Tabella 7 – Risultati prova 2 .....	103
Tabella 8 - Conducibilità e capacità termica volumica di diversi terreni (VDI 4640, 2000) .....	121
Tabella 9 – Parametri del terreno .....	122
Tabella 10 – Parametri dell’aria.....	122
Tabella 11 – Parametri del calcestruzzo .....	123
Tabella 12 – Parametri delle sonde geotermiche.....	123
Tabella 13 – Dati per il calcolo della potenza estraibile .....	133
Tabella 14 – Risultati simulazione a.....	134
Tabella 15 – Parametri dell’isolante.....	135
Tabella 16 – Temperatura rilevata dai sensori Winet.....	135
Tabella 17 – Dati per il calcolo della potenza estraibile .....	141
Tabella 18 – Risultati simulazione b.....	142
Tabella 19 – Risultati di potenza estraibile .....	144
Tabella 20 – Dati giornalieri di temperatura dell’aria – Torino, ARPA Piemonte .	145



## CAPITOLO 1

### Introduzione

Negli ultimi anni si è sviluppato un crescente interesse nei confronti di tecnologie volte al risparmio energetico ed alla produzione di energia da fonti rinnovabili, in modo da ridurre l'inquinamento atmosferico, considerato il maggior protagonista nell'innalzamento delle temperature globali che stiamo osservando. Il primo importante passo a riguardo è stato il Protocollo di Kyoto sui cambiamenti climatici: un accordo internazionale che stabilisce precisi obiettivi per i tagli delle emissioni di gas responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento del pianeta, da parte dei Paesi industrializzati che vi hanno aderito (ENAC, Ente Nazionale per l'Aviazione Civile).

In particolare, l'Italia ha ratificato il Protocollo di Kyoto attraverso la legge di ratifica del 1° giugno 2002, n. 120, in cui viene illustrato il relativo Piano nazionale per la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra.

L'obiettivo di riduzione era pari al 6,5% rispetto ai livelli del 1990; pertanto, tenendo conto dei dati registrati al 1990, la quantità di emissioni assegnate all'Italia non poteva eccedere nel periodo 2008-2012 il valore di 487,1 Mt CO<sub>2</sub> eq (valore obiettivo per l'Italia) (Minambiente, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2013).

Nonostante le nazioni aderenti al protocollo di Kyoto abbiano sostanzialmente atteso gli obiettivi, le misure non sono bastate a migliorare in maniera sensibile la situazione a livello globale.

Successivamente, l'entrata in vigore del pacchetto Clima-Energia (approvato dal Parlamento Europeo il 17 dicembre 2008 e pubblicato sulla Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea il 5 giugno 2009), con il quale l'Unione Europea ha introdotto delle misure volte a tradurre in concreto la cosiddetta strategia "20-20-20 entro il 2020", ha imposto all'Italia due obiettivi vincolanti per il 2020: riduzione delle emissioni di gas serra del 20 %, aumento al 20 % della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e il raggiungimento del 20 % di risparmio energetico entro il 2020 ([www.reteclima.it](http://www.reteclima.it)).

In questo panorama di ricerca e sviluppo di fonti rinnovabili assume un ruolo di notevole importanza l'utilizzo della geotermia, che costituisce una fonte di energia alternativa, inesauribile, gratuita, disponibile ovunque ed in ogni momento e pulita (con riduzione dell'emissione di sostanze inquinanti fino al 70% rispetto ad un tradizionale impianto di condizionamento, una maggiore efficienza energetica e, nel medio-lungo termine, un evidente risparmio economico).

Si tratta di una tecnologia ancora poco diffusa in Italia (ma non in altri Paesi europei quali Svezia, Svizzera, Austria, Germania, Francia, o extraeuropei come gli USA) che, nel settore civile è rappresentata dagli impianti a pompa di calore geotermica.

Nel presente lavoro di tesi vengono presentati e sviluppati il concetto di geotermia, le tipologie di energia geotermica esistenti e le modalità di sfruttamento ed utilizzo di tale risorsa, con particolare attenzione ai sistemi geotermici a bassa entalpia. La pompa di calore ricopre un ruolo fondamentale per il corretto funzionamento dell'impianto geotermico, pertanto si analizzano in particolare i principi di funzionamento e le componenti essenziali. Il lavoro si concentra maggiormente sul caso di studio reale, ovvero il campo sperimentale di una parete energetica situata presso l'Energy Center (Torino), con una descrizione dettagliata della sua messa in opera, partendo dallo scavo realizzato, sino al posizionamento delle sonde geotermiche e della relativa sensoristica Winet (sensore di temperatura immergibile, barretta estensimetrica resistiva, cella di pressione, sentek drill & drop probe, misuratore di potenziale idrico). In seguito all'avvenuta installazione dell'impianto geotermico, esso è stato attivato attraverso una serie di prove sperimentali di raffrescamento, al fine di valutarne l'efficacia e il corretto funzionamento. È stato proposto, inoltre, un modello numerico del suddetto sistema

a sonde geotermiche, attraverso il software agli elementi finiti FEFLOW 6.2. Infine, è stata effettuata l'analisi e il confronto dei dati ottenuti dal software e dal caso studio reale nelle diverse configurazioni del sistema.



## CAPITOLO 2

### Geotermia

La geotermia è la disciplina delle scienze della Terra che studia l'insieme dei fenomeni naturali coinvolti nella produzione e nel trasferimento di calore proveniente dall'interno della Terra, avvalendosi di strumenti scientifici offerti dalla geologia, dalla chimica, dalla fisica e dall'ingegneria.

Il nostro pianeta è formato da 4 strati concentrici:

- il *nucleo interno*, che è situato al centro ed è la porzione più calda (5500°C);
- il *nucleo esterno*, che è uno strato liquido di composizione simile allo strato sottostante, con un raggio complessivo di circa 3.470 km;
- il *mantello*, che è lo strato più largo, spesso circa 2.900 km e caratterizzato da flussi di rocce fuse che creano correnti interne;
- la *crosta*, che è formata da rocce solide ed ha uno spessore di circa 20÷65 km nelle aree continentali e 5÷6 km in quelle oceaniche.

L'insieme formato dalla crosta e dallo strato più esterno del mantello, viene anche definito, in geologia, *litosfera*: esso è caratterizzato da uno spessore compreso tra 80 km nelle aree oceaniche e 200 km in quelle continentali.

Appena sotto la litosfera si estende una zona chiamata *astenosfera*: essa è costituita dalla parte alta del mantello ed ha un comportamento meno rigido, definito da moti convettivi magmatici molto lenti (pochi cm per anno).

In Figura 1 è riportato uno schema della struttura interna della Terra, ed in dettaglio si può osservare la struttura della crosta e della parte superiore del mantello.

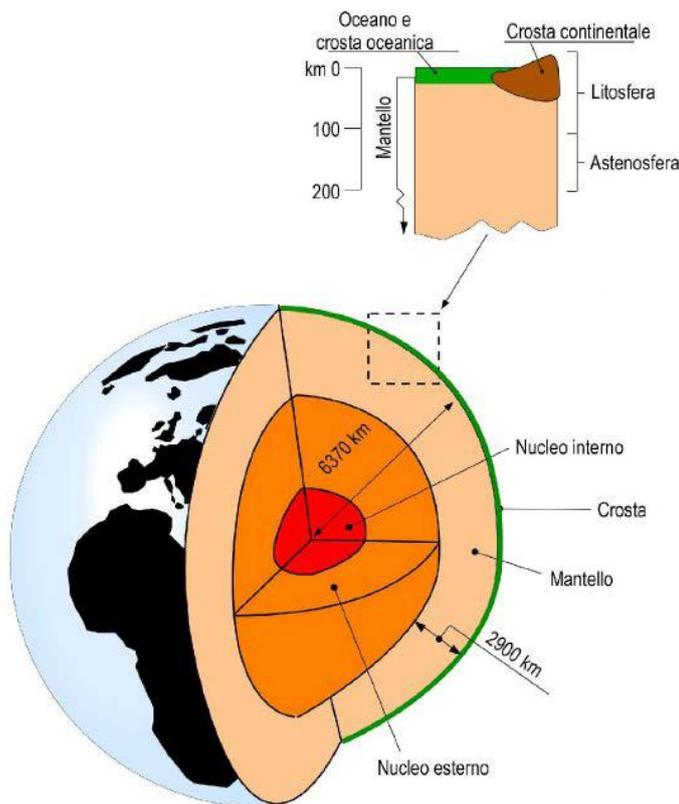


Figura 1 - Struttura interna della Terra (Dickson e Fanelli, 2004)

La convezione è un fenomeno causato da differenze di temperatura e densità in un fluido, per il quale correnti calde di materiale salgono verso quelle più fredde, mentre quelle fredde ridiscendono, instaurando movimenti circolari chiamati celle convettive.

Le rocce del mantello terrestre sono rimescolate continuamente secondo le leggi della convezione: il materiale più caldo, infatti, risale verso la superficie dove, cedendo calore all'atmosfera, si raffredda diventando denso e pesante per ridiscendere negli strati più caldi del pianeta e ricominciare il ciclo: in questo modo si creano i movimenti circolari delle celle convettive.

Questi moti risultano alimentati dal calore prodotto continuamente dal decadimento degli isotopi radioattivi presenti nel mantello ( Uranio 238, Uranio 235, Torio 232, Potassio 40) e dall'energia termica prodotta dal raffreddamento del nucleo della Terra. Nel modello a circolazione convettiva unica, la cella convettiva si sviluppa per tutta la profondità del mantello e il materiale riciclato giunge fino al contatto con il nucleo esterno (Figura 2). In corrispondenza delle aree oceaniche,

dove la litosfera è più sottile, essa ha subito e continua a subire fratture che permettono la risalita del materiale caldo e la formazione delle dorsali. L'azione di trascinarsi in seguito alla risalita del flusso magmatico causa l'allontanamento dei due lati di una dorsale: ciò comporta la continua formazione di nuova crosta oceanica, dovuta al materiale del mantello che solidifica una volta risalito, compensata dalle zone di subduzione, ovvero regioni della superficie terrestre in cui la litosfera viene consumata lungo zone di contatto fra placche continentali e oceaniche

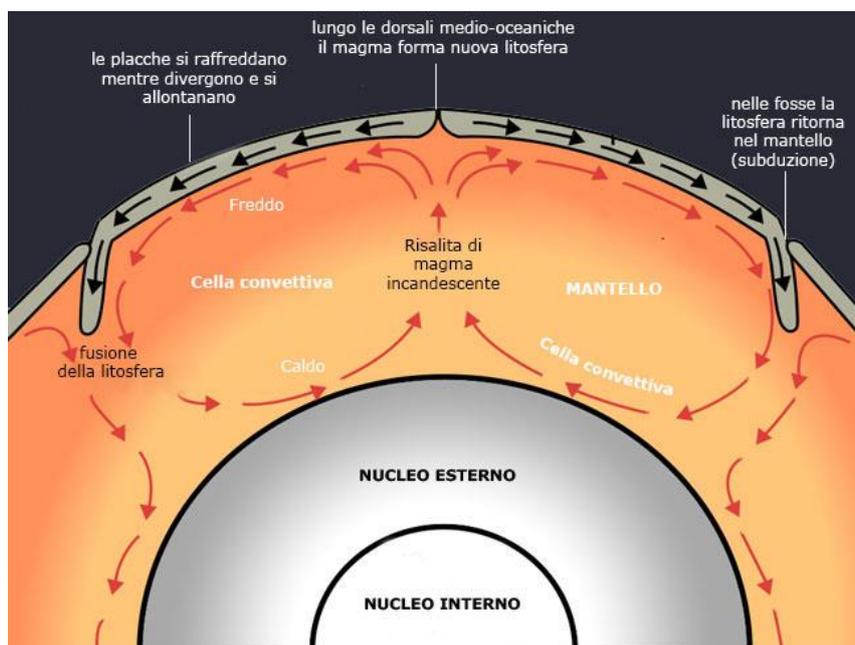


Figura 2 – Schema delle celle convettive nell'astenosfera (This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics, 2016)

A causa dei meccanismi spiegati precedentemente, le dorsali, le faglie trasformi (enormi fratture che tagliano perpendicolarmente le dorsali) e le zone di subduzione formano un enorme reticolato per cui la Terra risulta divisa in placche litosferiche o zolle, e precisamente in sette placche principali (pacifica, nordamericana, eurasiatica, sudamericana, indo-australiana, africana, e antartica) e in diverse placche minori. Le placche, sull'astenosfera, collidono lentamente l'una contro l'altra, cambiando continuamente la loro reciproca posizione, generando fratturazioni notevoli nella crosta e la nascita di vulcani. Di notevole importanza, dal punto di vista geotermico, risultano essere i margini intercostali: in queste zone, infatti, i materiali magmatici hanno una certa facilità a risalire in superficie,

producendo, di conseguenza, le più importanti aree geotermiche. Attraverso l'energia termica e adottando i principi della geotermia è possibile sfruttare il calore naturale della Terra (gradiente geotermico) ottenendo così una forma di energia alternativa e rinnovabile. Questa energia è dissipata tramite un flusso termico regolare, detto *geotermico*, che si diffonde dal nucleo e dal mantello dapprima verso la crosta e poi verso l'atmosfera, vale circa  $0,065 \text{ W/m}^2$  nelle aree continentali e  $0,101 \text{ W/m}^2$  in quelle oceaniche.

In Figura 3 sono ben visibili i campi geotermici utilizzati per la produzione di elettricità (1), le placche litosferiche delimitate dalle dorsali (2), e le zone di subduzione (3).



Figura 3 - Disposizione delle placche tettoniche, delle dorsali e delle zone di subduzione (Dickson e Fanelli, 2004)

Per la sua estrema versatilità può trovare impiego nelle moltissime attività umane in cui sia richiesto l'uso del calore: dalle applicazioni civili a quelle agricole e industriali.

Dal punto di vista dell'entalpia, la geotermia si può dividere in tre settori:

- 1) Geotermia ad alta entalpia, caratterizzata da fluidi con temperature maggiori di  $150^\circ\text{C}$ , utilizzata soprattutto per la produzione di energia elettrica e usi industriali;

- 2) Geotermia a media entalpia, caratterizzata da fluidi con temperature comprese tra 90°C e 150°C, negli usi diretti come quello civile, agricolo o industriale;
- 3) Geotermia a bassa entalpia, caratterizzata da fluidi con temperature minori tra 90°C, per scopi terapeutici e ricreativi.

Nel diagramma in Figura 4 sono riportati i diversi utilizzi dell'energia geotermica in funzione della temperatura del fluido geotermico a disposizione.

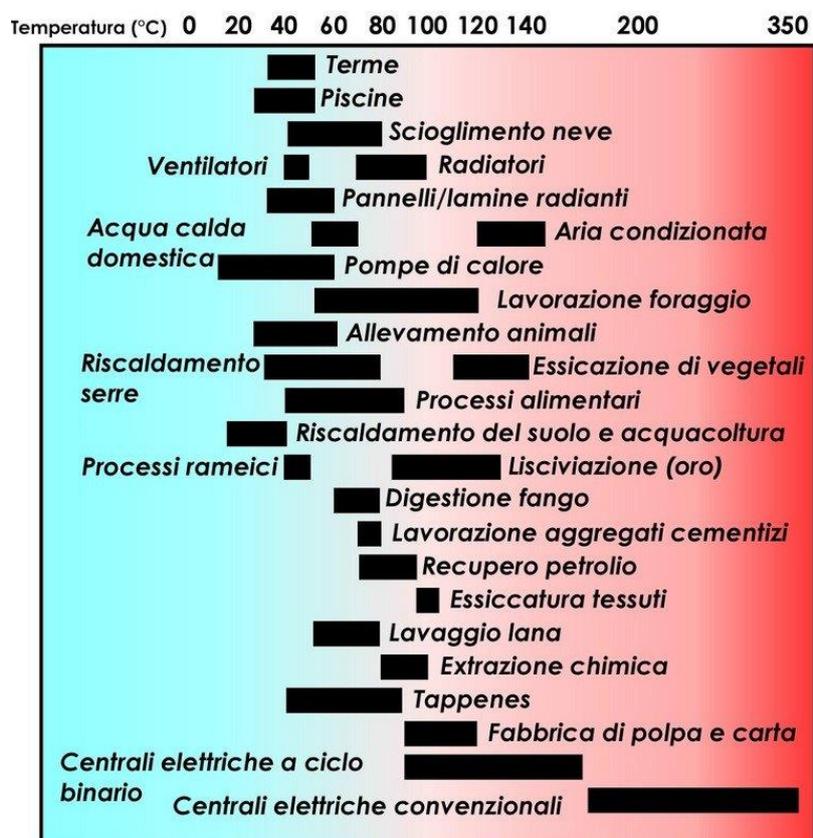


Figura 4 - Diagramma di Lindal (Dickson & Fanelli, 2004)

## 2.1 Flussi geotermici nel territorio italiano

Il settore litosferico sul quale sorge l'Italia è caratterizzato da flussi di calore nell'insieme piuttosto elevati, che in alcune zone salgono a valori molto alti, tali da suscitare grande interesse sia per gli aspetti scientifici, sia per quelli inerenti la conoscenza e l'utilizzazione del calore terrestre. Più in particolare, il calore terrestre

dall'interno viene trasferito verso la superficie terrestre attraverso il mantello terrestre per convezione, prodotta dal movimento del magma o di acque profonde, per conduzione, quindi senza trasporto di materia, mentre la propagazione per irradiazione è praticamente trascurabile.

In base al flusso di calore e alla conduttività termica, variabile in base al tipo di terreno o roccia, si osserva un diverso gradiente termico (variazione della temperatura in funzione della profondità). Procedendo verso l'interno della crosta terrestre la temperatura aumenta secondo un gradiente geotermico medio di 2,5-3°C/100 m di profondità (Dickson & Fanelli, 2004). Di conseguenza, la temperatura nei primi metri sotto la superficie può essere approssimata a quella media annua dell'aria esterna, ovvero circa 15°C. Diversamente, a 2000 m di profondità si può prevedere che la temperatura sia intorno ai 65°-75°C, a 3000 m di profondità invece sarà intorno ai 90°-105°C. Vi sono, comunque, vaste regioni nelle quali il valore del gradiente geotermico si discosta sensibilmente da quello medio. In aree in cui il basamento rigido sprofonda e si forma un bacino che si riempie rapidamente di sedimenti geologicamente "molto giovani", il gradiente geotermico può essere anche inferiore a 1°C/100 m. Viceversa, in certe "aree geotermiche" il gradiente può raggiungere valori superiori a dieci volte quello normale.

Dunque, questo gradiente sarebbe costante in tutti i punti del globo solo se le sue caratteristiche fossero identiche ovunque, in realtà ciò non avviene e infatti assistiamo ad anomalie termiche, positive o negative, a seconda che il gradiente sia più o meno basso della media.

In particolare, regioni relativamente meno calde, con valori di flusso conduttivo intorno a quelli medi mondiali, compresi tra 40-50 e 60-70 mW/m<sup>2</sup> (a parte locali anomalie positive) sono: l'arco alpino, la media e bassa Pianura Padana, l'Appennino centro-meridionale, la depressione adriaticomolisano-bradanica, la piattaforma pugliese, l'arco calabro, ed alcune aree della Sicilia meridionale e della Sardegna (Della Vedova et alii, 2001). A fronte di quelli sopra detti, valori alquanto superiori si hanno nell'Appennino settentrionale (65- 75 mW/m<sup>2</sup>) ed all'estremità nord-orientale del Bacino Provenzale (90-100 mW/m<sup>2</sup>). Invece, lungo la fascia pedemontana prospiciente il Mar Tirreno (dalla Toscana fino alla trasversale di Napoli) ed in tutto il bacino tirrenico centro-meridionale, si hanno flussi

mediamente superiori a 100-150 mW/m<sup>2</sup>, con zone ristrette che superano i 400-500 mW/m<sup>2</sup>.

## 2.2 Caratterizzazione geotermica

La geotermia è l'energia termica immagazzinata all'interno del nostro pianeta: la differenza di temperatura tra le zone profonde, più calde, e quelle superficiali, più fredde, dà origine ad un flusso di calore dall'interno verso l'esterno della Terra, tendente a stabilire condizioni di uniformità, condizioni che non saranno mai raggiunte. L'energia geotermica si riferisce, quindi, a quella parte di calore immagazzinato nel sottosuolo a profondità raggiungibili dall'uomo, ovvero entro i primi pochi chilometri di profondità, ed estraibile economicamente per vari usi.

Si distinguono due principali categorie di utilizzo:

- trasformazione del calore terrestre in energia elettrica;
- usi diretti, nei quali il calore terrestre viene utilizzato direttamente in numerosi processi: balneologia termale, climatizzazione (riscaldamento e raffrescamento) di ambienti, riscaldamento per usi agricoli (serre, allevamento di animali, ed altri) ed usi industriali (evaporazione, essiccamento, distillazione, sterilizzazione di prodotti, ecc.).

Per quanto riguarda la disponibilità delle risorse, la prima raccolta sistematica delle informazioni di superficie e profonde del territorio nazionale, utili ad incoraggiare lo sviluppo dell'energia geotermica in Italia, si deve alla Legge 9 dicembre 1986, n. 896, che aveva previsto l'Inventario delle risorse geotermiche nazionali, realizzato poi nel 1988 da ENEL, ENI-AGIP, CNR e ENEA con il coordinamento del Ministero dello sviluppo economico. Il progetto risulta costituito da un insieme di rapporti regionali con relativi elaborati grafici, dal database delle sorgenti geotermiche e da quello dei pozzi geotermici. Nel 1994 sono stati eseguiti alcuni aggiornamenti relativi alla valutazione del potenziale geotermico nazionale e di alcune aree del paese.

Ciò ha permesso di individuare zone a diverso interesse geotermico in relazione alla interazione tra sorgente di calore e corpi idrogeologici presenti nel sottosuolo, e descrivere le aree più promettenti per lo sfruttamento delle risorse geotermiche, sia quelle con risorse di alta temperatura suscettibili di sviluppo per la produzione di energia elettrica, sia quelle con risorse di media e bassa temperatura suscettibili di utilizzazione a fini di riscaldamento, balneoterapia ed altre applicazioni dirette del calore geotermico.

### **2.3 Anomalie geotermiche del territorio italiano**

La prima classificazione geotermica del territorio italiano ha permesso di individuare le caratteristiche geotermiche delle aree più promettenti: in Toscana, nel Lazio, nei Campi Flegrei (Napoli), in alcune zone della Pianura Padana ed infine aree interessanti sono presenti in Sicilia ed in Sardegna.

Tuttavia, l'esplorazione geotermica effettuata negli anni '80 dall'ENEL (Ente nazionale per l'energia elettrica) e dall'AGIP (Azienda Generale Italiana Petroli) ha portato alla luce delle particolarità sfavorevoli per quanto riguarda la produzione di energia elettrica: numerose aree risultate molto calde in profondità (temperature superiori a 250 °C), specialmente nel Lazio e nella Campania, sono purtroppo caratterizzate da permeabilità discontinua e dunque economicamente poco sfruttabili. Le aree migliori per la produzione di energia elettrica sono situate in Toscana nelle zone di Larderello, Travale- Radicondoli e Monte Amiata. Il loro sviluppo è condizionato dalla capacità ricettiva delle potenziali utenze e da eventuali vincoli ambientali.

Nel riscaldamento di edifici, uno dei progetti di maggior rilevanza realizzato in Italia è il teleriscaldamento del centro storico di Ferrara, la cui base viene fornita dalla geotermia, con integrazione di altre fonti energetiche (rifiuti urbani e cogenerazione). Infatti, già negli anni '60, durante la ricerca di nuovi giacimenti di idrocarburi presso la località Casaglia, si scoprì un bacino sotterraneo di acqua calda ad una profondità media di ca. 1.500 m. La fonte geotermica è acqua calda a 95 °C,

estratta dall'acquifero intercettato da due pozzi di prelievo con portata di 200 m<sup>3</sup>/h che cedono calore in scambiatori di calore a boccapozzo. Il fluido viene, infine, reiniettato nel sottosuolo, con un decremento della temperatura fino a minimo 30°C. Si valuta un risparmio di combustibile intorno a 6.600 tonnellate equivalenti di petrolio all'anno (per il solo apporto geotermico).

Il regime termico della regione mediterranea occidentale risulta grandemente influenzato dai fenomeni geodinamici e vulcano-tettonici che si sono susseguiti nel corso degli ultimi pochi milioni di anni, in particolare nel bacino tirrenico. Tali fenomeni, dovuti alla formazione delle catene delle Alpi e degli Appennini ed associati all'apertura del bacino tirrenico, consistono principalmente in assottigliamento crostale, risalita del mantello, intrusione nella crosta di corpi ignei da esso alimentati, formazione di batoliti acidi a piccola profondità nella crosta superiore, ed eruzioni vulcaniche in diverse aree del Lazio, della Campania, della Toscana meridionale e della Sicilia.

In Figura 5 è illustrata la distribuzione del flusso di calore conduttivo nell'area italiana e nella limitrofa zona mediterranea: i valori di flusso variano tra un minimo di 30 mW/m<sup>2</sup> e un massimo di 100 mW/m<sup>2</sup>, con picchi nel settore tirrenico fino a 450 mW/m<sup>2</sup>, circa 8 volte più grande rispetto al valore medio terrestre, pari a 60 mW/m<sup>2</sup> (Cataldi et al. 1995).

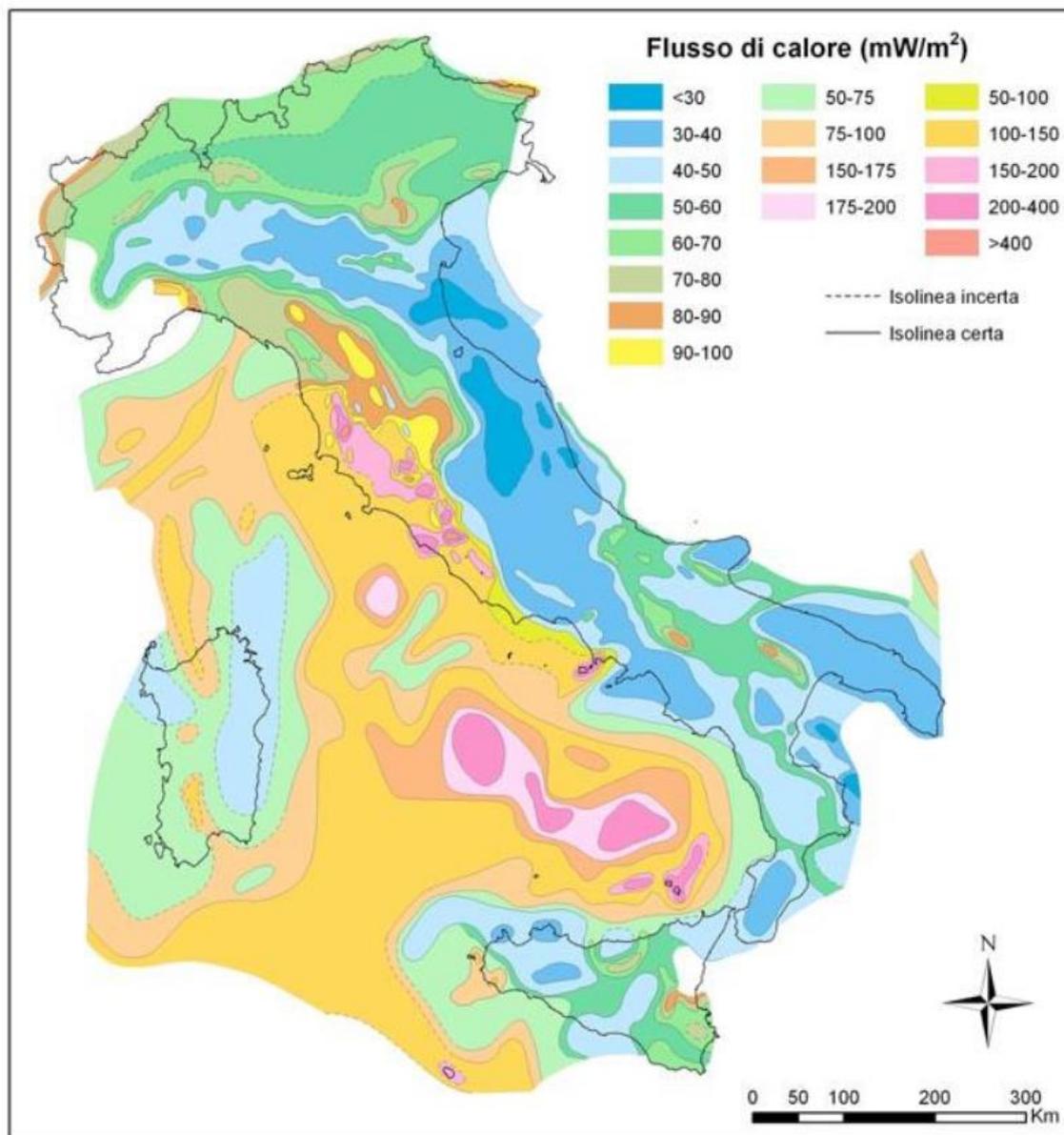


Figura 5 – Flusso di calore conduttivo nell'area italiana (Cataldi et al., 1995)

## 2.4 I serbatoi dei campi geotermici italiani

Un sistema geotermico può essere definito 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). Esso è formato da tre elementi fondamentali: la sorgente di calore, il serbatoio ed il fluido, ovvero il mezzo

che trasporta il calore. La sorgente di calore può essere una intrusione magmatica a temperatura molto alta ( $>600^{\circ}\text{C}$ ), posizionata a profondità relativamente bassa (5-10 km), oppure, in certi sistemi a bassa temperatura, il normale calore della Terra. Il serbatoio, invece, risulta caratterizzato da un complesso di rocce sedimentarie e/o metamorfiche più o meno permeabili, nelle cui fratture e pori circola il fluido presente in profondità permettendo lo scambio di calore. Il fluido geotermico, solitamente, è acqua meteorica in fase liquida o vapore, in dipendenza dalla sua temperatura e pressione, ricca di sostanze chimiche e gas, come  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  ed altri. I serbatoi risultano spesso ricoperti da formazioni impermeabili che agiscono da isolamento termico contro la dispersione del calore verso l'alto: si parla di serbatoi "confinati", a differenza di quelli definiti "liberi" in quanto non ricoperti da formazioni impermeabili.

I fluidi presenti nelle porzioni superiori dei serbatoi confinati, essendo più freddi e più densi di quelli ospitati nelle porzioni inferiori dei serbatoi stessi, tendono per gravità a spostarsi verso il basso, dove vi sono temperature che possono essere anche molto maggiori di quelle di partenza.

In condizioni particolari di temperatura e pressione si può verificare la trasformazione di fase del fluido da acqua a vapore: in questo caso si parla di serbatoio a vapore dominante; se il fluido nel serbatoio rimane in fase liquida, si parla invece di serbatoio ad acqua dominante, nel quale possono convivere le due fasi del fluido, quella liquida e quella vapore.

In aree ristrette della Toscana, del Lazio, e della Campania si possono raggiungere temperature elevate ( $> 150\text{-}200^{\circ}\text{C}$ ) anche a poche centinaia di metri, e superare i  $350\text{-}400^{\circ}\text{C}$  a profondità di qualche chilometro. Questa situazione si verifica dove i serbatoi geotermici sono formati da rocce metamorfiche e/o carbonatiche e/o vulcaniche sovrastanti a corpi magmatici profondi, nonché nelle isole vulcaniche del Tirreno meridionale dove, entro alcuni chilometri di profondità, i serbatoi geotermici sono costituiti da successioni laviche e/o piroclastiche.

In ambienti geologici diversi da quelli descritti precedentemente, la sorgente di calore deriva dalla risalita verso l'alto di acque riscaldate in livelli profondi, con circolazioni convettive all'interno di formazioni carbonatiche permeabili sepolte a piccola profondità e corrispondenti ad alti strutturali, ovvero zone sollevate rispetto

alle contigue in seguito ad attività tettonica. Questi alti possono costituire sia sorgenti di calore per acquiferi geotermici sovrastanti, sia serbatoi dai quali le acque calde risalgono lungo faglie verso livelli meno profondi, fino a dar luogo localmente a sorgenti termali in superficie; ciò avviene particolarmente lungo i margini della Pianura Padana e del versante occidentale dell'Appennino.

Il principale acquifero caldo, presente quasi ovunque a varie profondità nel nostro territorio, è costituito da rocce carbonatiche mesozoiche (190÷65 Ma), generalmente fratturate e perciò permeabili.

I serbatoi a media e bassa temperatura, da cui provengono le acque delle sorgenti termali, sono spesso in equilibrio idrogeologico con i contigui affioramenti di rocce permeabili attraverso cui si infiltrano le acque meteoriche che li alimentano. Le maggiori sorgenti termali italiane emergono infatti da rocce carbonatiche che, talvolta prossime alla superficie (si tratta di alti strutturali sepolti), corrispondono ad acquiferi con circolazione convettiva di acqua calda. Tali situazioni si verificano più spesso ai margini della Pianura Padana ed in altre zone ai bordi degli Appennini centro-meridionali e dell'Arco Calabro-Peloritano. Altre sorgenti calde e fumarole sono presente nelle rocce vulcaniche eruttate da vulcani recenti o attivi, come nei Campi Flegrei, nelle Isole Eolie, in Sicilia ed a Pantelleria.

Infine, acque con basse temperature, comprese tra i 30 e i 50°C, sono presenti in acquiferi prevalentemente sabbiosi della Pianura Padana ed in alcuni corpi magmatici della fascia preappenninica tosco-laziale-campana, della Sardegna e della Sicilia, che risultano essere prossimi al completo raffreddamento.

## **2.5 Geotermia ad alta e media entalpia**

In base all'Inventario delle Risorse Geotermiche Nazionali (par. 2.2) ed ai dati di numerosi pozzi più o meno profondi successivamente perforati da vari Enti pubblici ed Istituzioni di ricerca, è stato possibile creare delle mappe di temperatura, variabili a scala regionale e locale. Ad esempio, nella Figura 6 seguente è riportato l'andamento delle temperature ad una profondità di 1 km dal piano campagna.

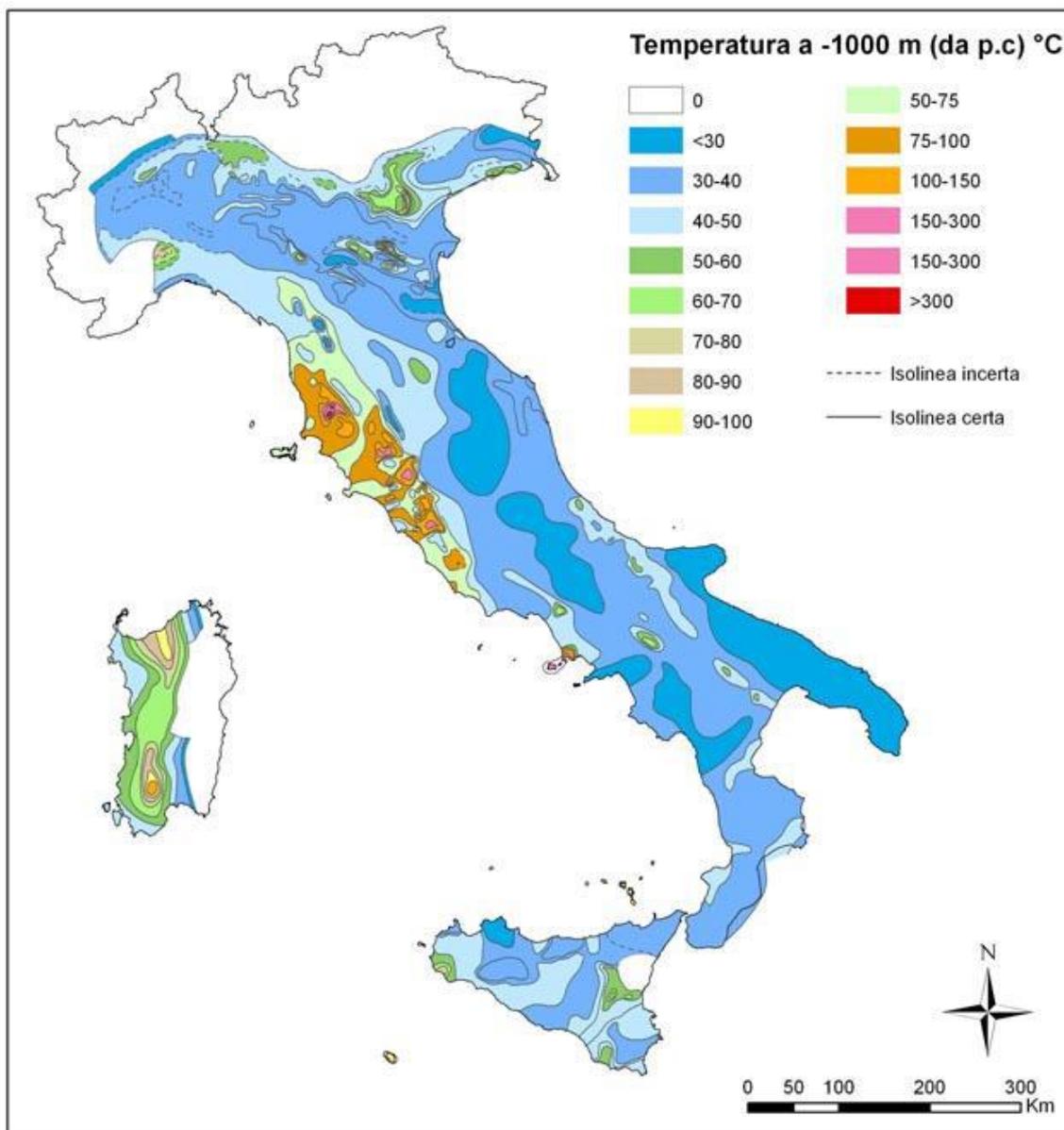


Figura 6 - Distribuzione delle temperature a 1000 m di profondità (Cataldi et al., 1995)

Questa mappa di temperatura evidenzia come nel settore occidentale e centrale dell'Italia settentrionale, l'obiettivo principale della esplorazione geotermica è costituito dagli acquiferi clastici delle pianure lombarda e piemontese, dove le temperature hanno un andamento compreso tra 30 e 45 °C da 0,3 a 1 km di profondità.

In particolare, nella regione piemontese, le aree più favorevoli sono state individuate ad Ovest di Vercelli, a Nord di Saluzzo e ad Est di Novara.

Inoltre, un notevole interesse è assunto dalla zona di Acqui Terme-Visone dove, secondo studi molto recenti, sono presenti sorgenti con acqua a 70 °C, e temperature nel serbatoio fino a 100÷130 °C.

Per quanto riguarda il centro Italia, la costa tirrenica che interessa la Toscana e l'Umbria, è caratterizzata dalle temperature più alte del territorio italiano, con una media di 75÷100 °C, arrivando a toccare anche oltre 150 °C in zone limitate. La costa adriatica, d'altra parte, presenta un andamento pressoché costante di 30÷40 °C e la regione siciliana, invece, risulta di notevole interesse per il settore geotermico, in quanto si raggiungono anche i 100 °C a 1000 m di profondità.

## **2.5.1 Avanzamenti tecnologici attesi**

Secondo il lavoro *Previsioni di crescita della geotermia in Italia fino al 2030 – per un nuovo manifesto della geotermia italiana* (Cataldi et al.) svolto da un gruppo di esperti in diverse discipline della geotermia, soci dell'UGI (Unione Geotermica Italiana), sono attesi avanzamenti nelle metodologie di esplorazione e produzione, e nelle tecnologie di sfruttamento delle risorse geotermiche ad alta e media entalpia. Essi possono essere ricondotti ai seguenti gruppi di metodologie di lavoro e tecnologie di sfruttamento:

- esplorazione dei campi geotermici;
- produzione di fluido con perforazione di pozzi;
- generazione di energia geotermoelettrica;

### **2.5.1.1 Esplorazione dei campi geotermici**

Per quanto riguarda i metodi di indagine (geologici, geofisici e geochimici), di analisi di laboratorio (petrografici, chimici, isotopici, ecc.), e di processamento integrato dei dati, usati per identificare e caratterizzare aree con differenti tipi di risorse idonee alla produzione di elettricità o calore per usi diretti da sistemi idrotermali, non sono attese importanti novità metodologiche in questo campo.

Sono, invece, attesi a breve termine miglioramenti nella strumentazione e nelle tecniche di rilevamento ed elaborazione automatica dei dati con mezzi elettronici e con l'uso del computer, per permettere di individuare orizzonti fratturati e campi di fessure in potenziali serbatoi profondi, e per ricostruire più precisi modelli geotermici tridimensionali di nuove aree di sfruttamento, o di campi già in esercizio. Essi consentono la previsione dell'evoluzione nel tempo delle caratteristiche termoidrauliche del serbatoio in diverse condizioni di esercizio e di localizzare le aree più idonee alla reiniezione dei reflui o alla iniezione di acque superficiali, fatte con il triplice scopo di ravvenare idraulicamente il serbatoio, rallentare il naturale declino di portata e di pressione dei pozzi, ed aumentare il tasso di estrazione del calore dalle rocce.

L'insieme di questi avanzamenti avrà come vantaggio, una riduzione dei costi di reperimento e produzione del fluido che, pur modesta in termini assoluti e percentuali, assume importanza sul piano economico poiché consente di diminuire il rischio minerario di un progetto, aumentare il rapporto di successo dei pozzi, e calibrare meglio nel tempo la coltivazione delle risorse estraibili e lo sviluppo della vita utile degli impianti di generazione geotermoelettrica e/o di produzione del calore.

#### **2.5.1.2 Perforazione con metodi tradizionali**

L'estrazione di calore dal sottosuolo avviene quasi sempre attraverso emungimento di fluido (acqua, vapore, e miscele acqua-vapore, con maggiore o minore presenza di gas disciolti), mediante l'utilizzo di pozzi che attingono in un acquifero il più delle volte confinato ed a temperatura più o meno elevata, in base al valore locale del gradiente di temperatura.

Bisogna, dunque, perforare pozzi più o meno profondi a seconda dei casi, il cui costo varia molto in funzione della profondità, del diametro, della litologia delle rocce e di altri fattori; costi che rappresentano quasi sempre la frazione principale di un progetto geotermico. Risulta molto importante contenere questa frazione,

soprattutto nel caso di pozzi con diametro al fondo maggiore di 7÷8 pollici (18-20 cm) il cui costo cresce esponenzialmente con la profondità.

I più importanti avanzamenti tecnologici nel settore della perforazione riguardano:

- la *spallation drilling*: fratturazione e/o riduzione di tenacità delle rocce in pozzo mediante ugello posto al fondo dello scalpello di perforazione attraverso il quale viene iniettato gas ad alta temperatura e pressione, senza giungere però alla fusione delle rocce (Figura 7). Le maggiori velocità di perforazione e la minore usura della testa di perforazione sono i principali vantaggi che contribuiscono alla riduzione dei costi. Il coefficiente di trasmissione del calore lato fluido tra il getto della fiamma e la roccia impattante è stato identificato come parametro curiale nel processo di perforazione.

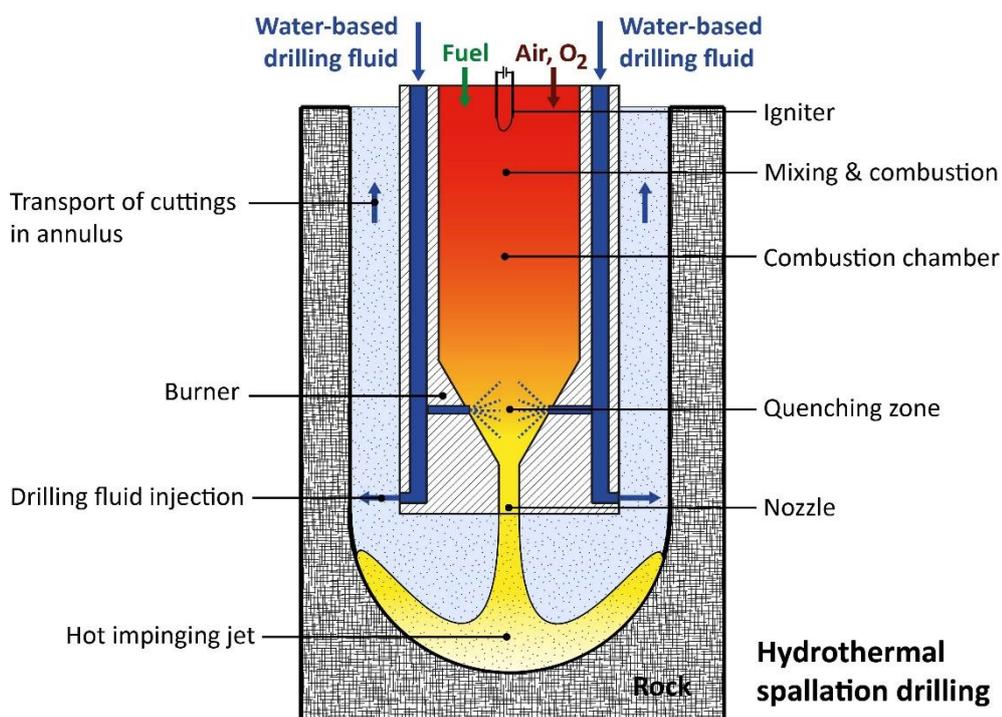


Figura 7 - Spallation drilling (ETH zürich)

In pozzi riempiti d'acqua a una certa profondità, la pressione supera la pressione critica dell'acqua (220,64 bar) e quindi, è preferibile l'utilizzo della fiamma per procedere alla frammentazione delle rocce termiche. L'obiettivo di questa tecnica è principalmente la progettazione di un bruciatore idrotermale, la caratterizzazione del trasferimento di calore in

condizioni di acqua supercritica e lo sviluppo di dispositivi con sensore del flusso di calore applicabili nelle difficili condizioni di fondo foro;

- riduzione dei tempi di *tripping*: semplificazione di tutte le operazioni di estrazione dal pozzo della batteria delle aste per il cambio degli scalpelli, e della successiva sua reintroduzione in pozzo per proseguire la perforazione;
- costruzione di scalpelli con dentatura più abrasiva e con l'uso di materiali più duri di quelli attuali;
- apparecchiature e tecniche di controllo dell'azimut e dell'angolo di inclinazione dei *pozzi direzionati*, che possano essere usate anche in presenza nelle rocce di minerali ferro-magnetici. Queste tecniche servono per evitare avvitamenti dell'asse del pozzo, e per centrare gli obiettivi stabiliti entro scostamenti di pochi metri anche alle grandi profondità;
- fabbricazione di tubazioni di rivestimento dei pozzi (*casing*) in materiali speciali, plastici o metallici, capaci di resistere ad alte temperature e pressioni ed alla aggressione causata da fluidi corrosivi. Consiste in un tubo di grande diametro che viene assemblato e inserito in una sezione perforata (Figura 8).

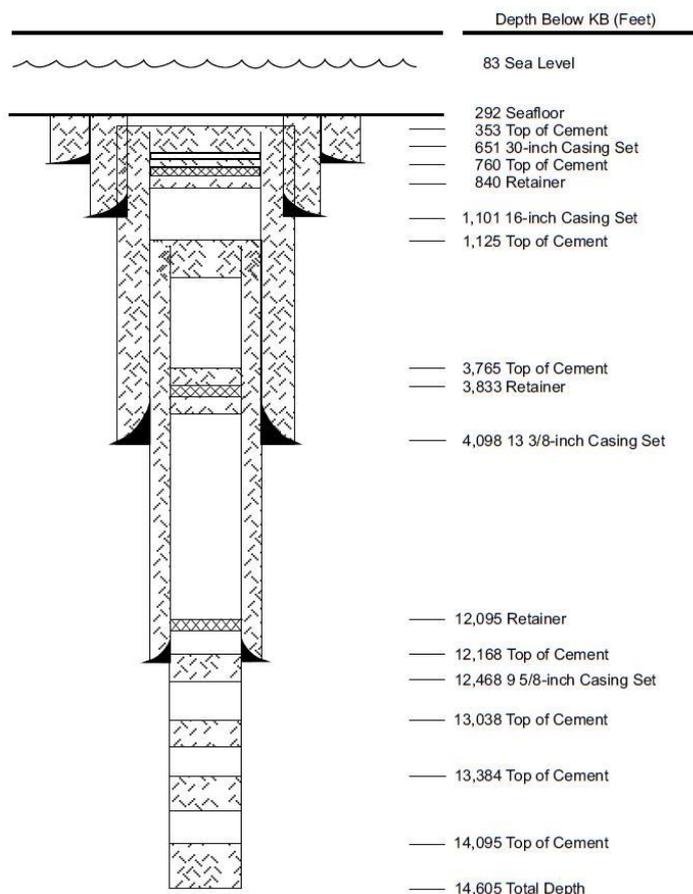


Figura 8 - Schema progettuale del casing (Minerals Management Service, 2000)

Similmente alle ossa di una colonna vertebrale che proteggono il midollo spinale, il rivestimento è posto all'interno del pozzo trivellato per proteggere e supportare il pozzo. L'involucro cementato favorisce il processo di perforazione in diversi modi: prevenendo la contaminazione delle zone dei pozzi d' acqua dolce, fornendo una solida base superiore per consentire l'uso del fluido di perforazione ad alta densità per continuare a perforare più in profondità, sigillando zone ad alta pressione, riducendone al minimo il rischio di scoppio.

Con gli avanzamenti sopra detti si conta di abbattere i costi di perforazione almeno del 20 % rispetto a quelli attuali, migliorandone contemporaneamente l'efficienza delle operazioni e diminuendone gli impatti ambientali.

### 2.5.1.3 Perforazione con metodi avanzati

Due tecnologie già applicate in alcuni casi nel settore petrolifero ed in quello dei minerali pregiati, ma non ancora sperimentate in campo geotermico, costituiscono un possibile sviluppo:

- la prima riguarda la perforazione di pozzi che partendo dalla verticale vengono, da una certa profondità in poi, progressivamente deviati con angolo di inclinazione via via crescente fino a giungere ad una giacitura sub-orizzontale dell'asse del pozzo. In questo modo, sono stati realizzati fino ad ora nel settore petrolifero pozzi con tratto sub-orizzontale lungo anche diversi chilometri.

Le difficoltà di queste tecnologie sono da ricercarsi nella diversa natura litologica delle rocce da perforare (spesso molto disomogenee, dure ed abrasive), nel diametro di maggior dimensioni necessario per i pozzi di produzione, e nelle elevate temperature del serbatoio che, a parità di profondità, sono sempre, nei campi geotermici, molto più alte di quelle dei giacimenti petroliferi;

- la seconda tecnologia riguarda l'estrazione di calore da rocce calde profonde e poco fratturate (HDR-EGS, *Hot dry rock - Enhanced geothermal systems*). I sistemi geotermici migliorati sono sistemi di terza generazione che incrementano il rendimento delle centrali geotermoelettriche nella produzione di energia elettrica a partire da vapore naturale.

La tecnica consiste nel pompare acqua attraverso fenditure e porosità naturali delle rocce in corrispondenza di serbatoi o giacimenti geotermici cioè punti della crosta terrestre in cui esistono temperature elevate ad una profondità facilmente accessibile. Purtroppo, la grande maggioranza delle rocce calde è poco permeabile, perciò lo sfruttamento industriale dell'energia geotermica si è dovuto inizialmente limitare ai rari siti in cui già esisteva un sistema di circolazione idrotermale. Per questo motivo, è possibile aumentare la permeabilità del suolo con opportuni scavi e perforazioni (a seconda dell'accessibilità, o meno): una buona permeabilità delle rocce calde, infatti, è indispensabile per l'estrazione di

calore.

Mentre la produzione di energia idrotermale può sfruttare solo i fluidi caldi già presenti nella crosta terrestre, un sistema HDR recupera il calore della terra da regioni asciutte tramite la circolazione del fluido pressurizzato. Iniettando acqua fredda a grande pressione si cerca di creare fenditure che collegano il pozzo di perforazione con eventuali altre fratture già presenti nella matrice rocciosa. La pressione del fluido rende possibile lo scorrimento in rocce sollecitate a taglio (hydroshearing) e, quando la pressione supera anche la minima compressione principale della roccia, l'apertura di una fenditura perpendicolare alla direzione di minima compressione (hydrofracturing). Questa tecnica (Figura 9) ha lo scopo di rendere possibili centrali geotermoelettriche anche in siti in cui non esistono serbatoi geotermici. Il fluido iniettato nel serbatoio assorbe l'energia termica dalle superfici di roccia ad alta temperatura e funge quindi da trasportatore per il trasporto del calore sulla superficie per l'uso pratico.

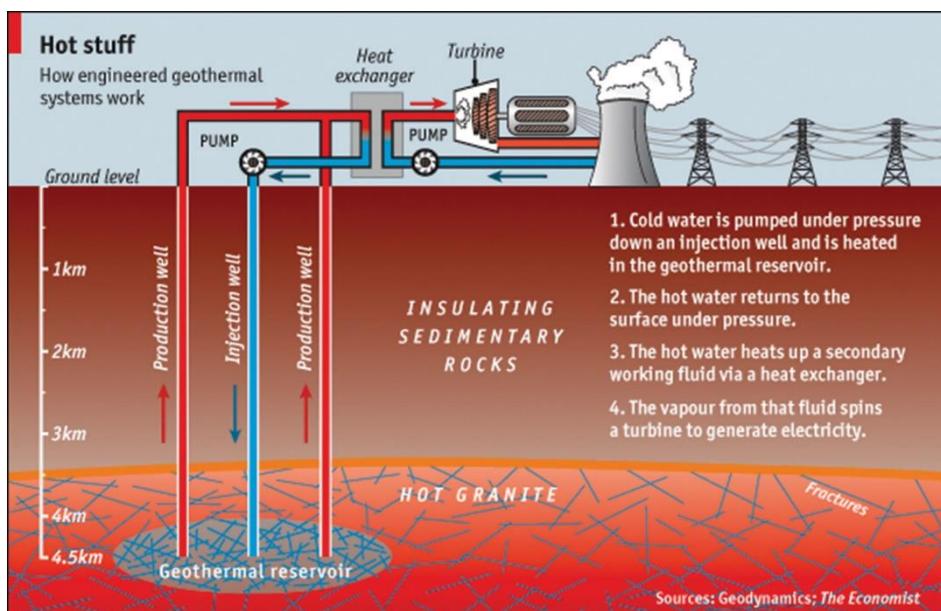


Figura 9 – Schema HDR-EGS (Geodynamics: The Economist, 2010)

Il vantaggio principale di questo schema operativo rispetto a quello dei progetti HDR fino ad ora svolti consisterebbe nella eliminazione delle molte decine di pozzi da 4-5 km di iniezione, e di altrettanti pozzi di eguale profondità di produzione, necessari per azionare un impianto >100 MWe,

sostituendoli con un solo pozzo centrale di grande diametro e con diverse decine di pozzetti di iniezione e di produzione di piccolo diametro e breve lunghezza complessiva. A parità di potenza per impianti di almeno 100 MWe, ciò comporterebbe una riduzione considerevole del costo di costruzione.

#### **2.5.1.4 Generazione di energia elettrica**

Si ritengono possibili nel campo della generazione di energia elettrica i seguenti avanzamenti tecnologici:

- aumento del rendimento in nuovi impianti alimentati da serbatoi idrotermali di alta temperatura a vapore surriscaldato, ulteriore miglioramento dei materiali nella palettatura di turbina per ridurre fenomeni di erosione/corrosione allo scarico, miglior rendimento degli estrattori dei gas incondensabili, ed aumento di efficienza del sistema di condensazione;
- sviluppo degli impianti a ciclo binario, per l'utilizzo di risorse di media temperatura (90 ÷ 150 °C);
- ottimizzazione dei nuovi impianti alimentati da serbatoi idrotermali di alta temperatura ad acqua dominante, attraverso l'inserimento di un impianto ausiliario a ciclo binario sullo scarico dell'acqua proveniente dai separatori di vapore, prima della reiniezione, con aumento significativo della potenza elettrica ottenibile;
- realizzazione di impianti combinati "generazione elettrica-teleriscaldamento", con aumento di efficienza complessiva nello sfruttamento della risorsa geotermica;
- realizzazione di nuovi impianti alimentati da sistemi geotermici non convenzionali.

## 2.6 Geotermia a bassa entalpia

Esistono due tipi di impianti geotermici: quello classico, relativo allo sfruttamento di anomalie geologiche (par. 2.5), e la tipologia impiantistica a "bassa entalpia", che valorizza il sottosuolo come serbatoio termico, dal quale estrarre calore durante la stagione invernale ed al quale cederne durante la stagione estiva. Ovvero la tipologia di impianto geotermico a bassa entalpia sfrutta la temperatura costante che il terreno ha lungo tutto il corso dell'anno; ad esempio, normalmente, già a qualche metro di profondità, le temperature risultano pari a circa 10-15°C costanti lungo tutto l'anno.

Data la relativamente bassa temperatura (si parla di energia geotermica a bassa entalpia quando le temperature dei fluidi sono al di sotto dei 100°C), questo tipo di energia si presta molto bene ad utilizzi diretti ed in particolare faremo riferimento ad usi civili, agricoli e industriali e quindi lasceremo fuori dal discorso il settore della produzione di energia elettrica. Fra gli usi civili quello del riscaldamento è una delle forme più antiche e diffuse.

Le temperature di esercizio dei fluidi richiesta varia in funzione degli impianti termici adottati. Occorrono valori di 50-80°C per impianti termosifone e 35-50°C per i pannelli radianti a parete, pavimento o soffitto. Quando i fluidi non raggiungono le temperature sopraindicate, queste si potranno raggiungere ricorrendo a sistemi noti come pompe di calore.

La pompa di calore permette lo scambio di calore a partire da una sorgente a temperatura inferiore rispetto al pozzo, ovvero il punto dove si immette il calore. In un impianto di riscaldamento, l'edificio rappresenta il "pozzo caldo"; viceversa, in un impianto di condizionamento l'edificio è la "sorgente fredda" dalla quale viene estratto il calore. Il suolo rappresenta per la pompa di calore una sorgente (quando essa lavora in riscaldamento) o un pozzo (in modalità raffrescamento) di calore. Rispetto all'aria atmosferica la temperatura del suolo ad una certa profondità subisce variazioni annuali molto più contenute: a profondità di 5-10 m la temperatura del suolo è pressoché costante tutto l'anno ed è equivalente all'incirca alla temperatura media annuale dell'aria, ovvero circa 10-15 °C. Ciò significa che il

suolo, rispetto all'aria, è più caldo d'inverno e più fresco d'estate, a vantaggio del rendimento della pompa di calore.

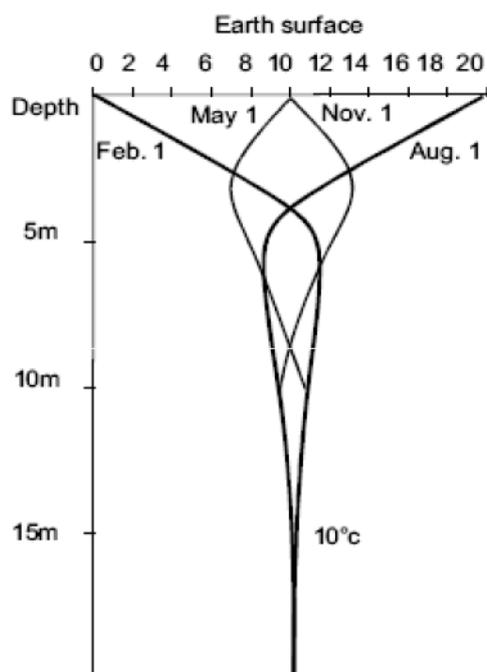


Figura 10 - Andamento della temperatura nel sottosuolo (<https://www.researchgate.net>)

In Figura 10 è rappresentato il profilo termico di un terreno ideale in funzione della profondità.

### 2.6.1 Pompe di calore

Le pompe di calore (PdC) sono macchine che permettono il trasferimento di energia termica da un corpo ad un basso livello termico ad un altro a temperatura superiore; ciò non può avvenire in maniera spontanea perché il flusso naturale del calore tende a passare dal corpo più caldo al corpo più freddo e ciò comporterebbe una violazione del secondo principio della termodinamica.

Il funzionamento delle PdC è basato sulla capacità dei fluidi di assorbire o cedere calore quando vaporizzano o condensano: grazie ad una combinazione di trasformazioni termodinamiche e ad un apporto energetico dall'ambiente esterno, viene trasferito calore da un corpo ad un livello di temperatura inferiore ad uno a temperatura superiore.

La PdC è costituita da un circuito chiuso percorso da un fluido termovettore che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato liquido o di vapore.

I componenti che costituiscono il circuito sono (Figura 11):

- *Evaporatore*: uno scambiatore di calore che permette lo scambio termico tra refrigerante interno e fluido esterno; durante il passaggio attraverso l'evaporatore il fluido refrigerante acquisisce calore dalla sorgente esterna evaporando; la temperatura è costante e l'entalpia aumenta;
- *Compressore*: crea la differenza di pressione che permette al ciclo di funzionare; esso aspira il fluido refrigerante attraverso l'evaporatore, dove il fluido stesso evapora a bassa pressione assorbendo calore, lo comprime e lo spinge all'interno del condensatore. Nella fase di compressione assorbe ulteriore quantità di calore grazie al lavoro del compressore; il vapore si trova perciò ad una temperatura più elevata di un vapore saturo alla stessa pressione;
- *Condensatore*: è uno scambiatore di calore che permette lo scambio termico tra refrigerante interno e fluido esterno; durante il passaggio attraverso il condensatore il fluido cede energia termica al fluido dell'impianto di riscaldamento, si raffredda e passa dallo stato vapore a liquido condensando (trasformazione isoterma con perdita di entalpia). Il fluido in uscita dal condensatore è allo stato liquido;
- *Valvola di espansione* (o Valvola di laminazione): per completare il ciclo il liquido deve tornare alla pressione di evaporazione. La valvola di espansione permette un'espansione ed un raffreddamento del fluido; è posizionata tra il condensatore e l'evaporatore e permette di abbattere la pressione del fluido condensato prima del raggiungimento dell'Evaporatore. La sua attività (apertura e chiusura) è controllata dalla presenza di un bulbo termostatico che misura temperatura e pressione dell'evaporatore. Nel passaggio attraverso la valvola di espansione si ha una caduta di pressione e la trasformazione è isoentalpica;
- *Valvola di inversione*: è una valvola a quattro vie che consente il doppio

funzionamento della pompa grazie all'inversione del ciclo; si può ottenere perciò riscaldamento nel periodo invernale e raffreddamento in estate, invertendo evaporatore e condensatore.

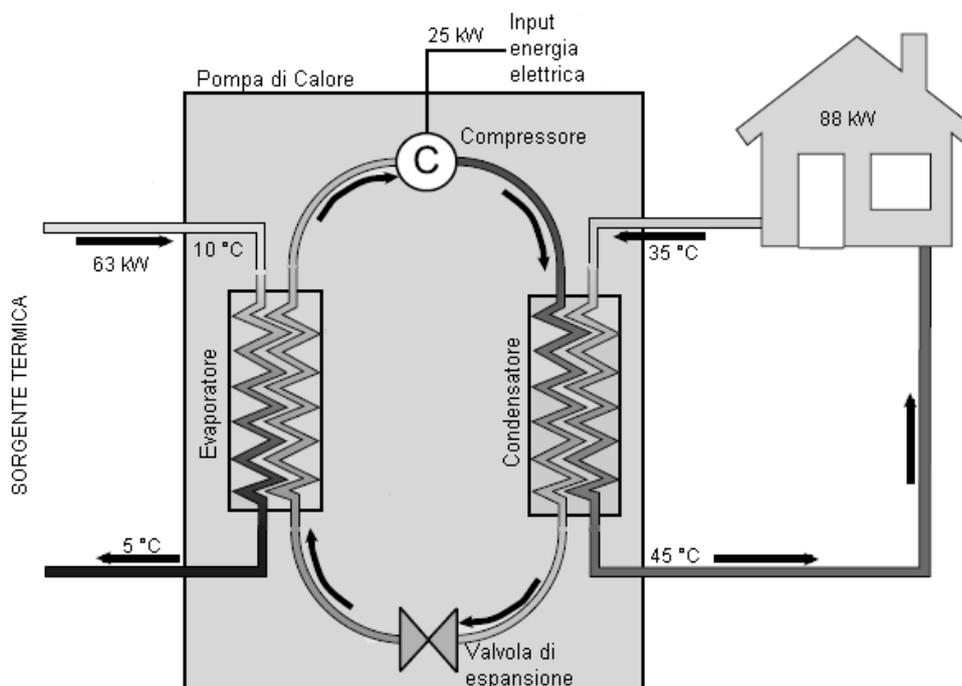


Figura 11 – Schema di funzionamento di una pompa di calore (Banks, 2008)

Il funzionamento della PdC permette perciò l'estrazione di calore da una sorgente termica e la cessione all'utenza del calore prelevato; grazie al passaggio del fluido attraverso l'evaporatore viene prelevata l'energia termica che viene in un secondo momento ceduta all'ambiente da riscaldare durante il passaggio attraverso il condensatore. Il consumo dell'energia elettrica si ha per permettere il funzionamento del compressore.

Al fine di ottenere un elevato rendimento dell'impianto, il livello termico della sorgente deve essere il più possibile prossimo a quello dell'ambiente di restituzione dell'energia termica: la differenza di temperatura tra i due corpi deve essere minima ed il livello termico della sorgente deve mantenersi costante nel tempo. La classificazione delle pompe di calore può avvenire sulla base del tipo di alimentazione (elettrica o a gas), sulla base del tipo di ciclo termodinamico (a compressione di vapore o a compressione termica) o sulla base del tipo di sorgente

termica, che può essere costituita da aria (PdC ad aria), acqua (PdC ad acqua) e terreno (PdC geotermiche - GSHP).

L'aria esterna risulta essere la sorgente maggiormente utilizzata grazie alla sua disponibilità ed ai bassi costi di investimento per la realizzazione di un impianto di climatizzazione con pompe di calore ad aria; tuttavia bisogna tener conto di alcune limitazioni legate alla variabilità della temperatura ed allo sfasamento dei periodi di massima disponibilità termica rispetto ai periodi di massima richiesta energetica.

Le pompe di calore ad acqua, invece, risultano essere meno suscettibili alle variazioni delle condizioni ambientali esterne poiché estraggono calore dall'acqua superficiale (fiumi, laghi) o sotterranea.

Infine, lo sfruttamento del terreno come sorgente termica garantisce una maggiore stabilità ed inerzia termica; la limitazione risiede nella complessità e nel costo di realizzazione dell'impianto di scambio termico. Le GSHP (Ground Source Heat Pump) sono pompe di calore abbinata ad una o più sonde geotermiche all'interno delle quali scorre il fluido termovettore che scambia energia con il terreno (Figura 12); il terreno possiede infatti un livello termico elevato e costante (o con oscillazioni sfasate e smorzate rispetto le variazioni della temperatura in superficie).

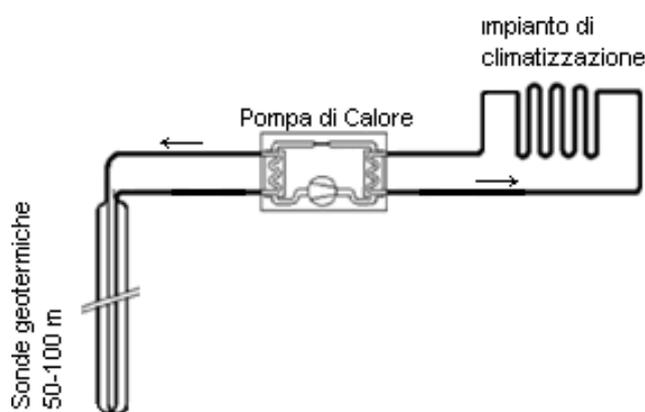


Figura 12 – Schema di funzionamento di una GSHP (Banks, 2008)

Un impianto geotermico a bassa entalpia è composto da una o più pompe di calore, da un insieme di sonde geotermiche e da una rete di distribuzione del calore.

Le pompe di calore sono generalmente reversibili e possono essere usate sia per fornire che per sottrarre calore ad un ambiente svolgendo una funzione riscaldante

nel periodo invernale e refrigerante nel periodo estivo. La configurazione dell'impianto e il ciclo termodinamico sono gli stessi nelle due configurazioni: il cambiamento dell'effetto della pompa è ottenuto tramite la valvola di inversione che permette l'inversione del ciclo, come si può osservare nella Figura 13.

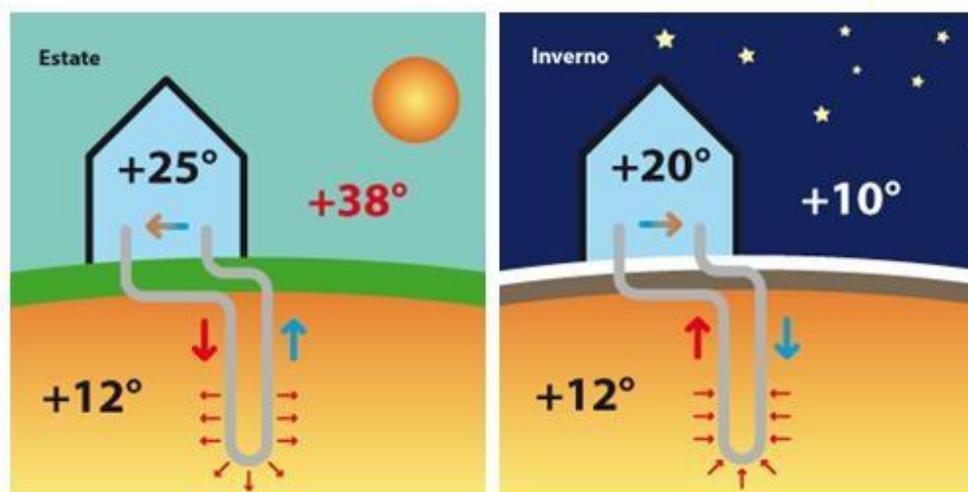


Figura 13 – Schematizzazione del funzionamento di un impianto di geoscambio (<http://www.iocasa.it>)

Negli impianti che funzionano in entrambe le modalità di riscaldamento e di raffreddamento il calore viene ciclicamente prelevato e stoccato nel terreno: quando i fabbisogni energetici estivi e invernali sono bilanciati il bilancio energetico complessivo del terreno risulta pari a zero.

Per effettuare un corretto dimensionamento dell'impianto bisogna conoscere le caratteristiche termiche dei due ambienti e la quantità di energia che è possibile trasferire nell'unità di tempo (potenza); per definire quanta energia è possibile asportare prima di sotto raffreddare l'ambiente a bassa temperatura o di surriscaldare l'ambiente a temperatura maggiore è necessario conoscere le caratteristiche dell'ambiente da cui si preleva il calore e dell'ambiente in cui si riversa l'eccesso di calore.

Le GSHP sono in genere PdC elettriche, in cui il lavoro che permette il movimento del compressore è dato dall'energia elettrica prodotta da un motore elettrico ad esso collegato. Esse permettono un risparmio energetico in quanto il calore prelevato dal terreno è disponibile gratuitamente ed il costo complessivo per

l'attività della PdC è legato unicamente all'energia elettrica spesa per il funzionamento del compressore.

Lo scambio di calore con il sottosuolo può avvenire in tre modi:

- *scambio diretto*, dove il circuito dell'evaporatore/condensatore della pompa di calore è a diretto contatto con il sottosuolo;
- impianti a *circuito aperto*, nei quali viene prelevata acqua di falda sulla quale viene effettuato lo scambio termico;
- impianti a *circuito chiuso*, dove la pompa di calore effettua lo scambio termico col suolo indirettamente, a mezzo di un circuito idraulico nel quale scorre un fluido termovettore (Figura 14). I sistemi a circuito chiuso possono essere a loro volta suddivisi in tre principali sottosistemi:
  - *Sonde geotermiche verticali*;
  - *Sonde geotermiche orizzontali*;
  - *Geostrutture energetiche*.

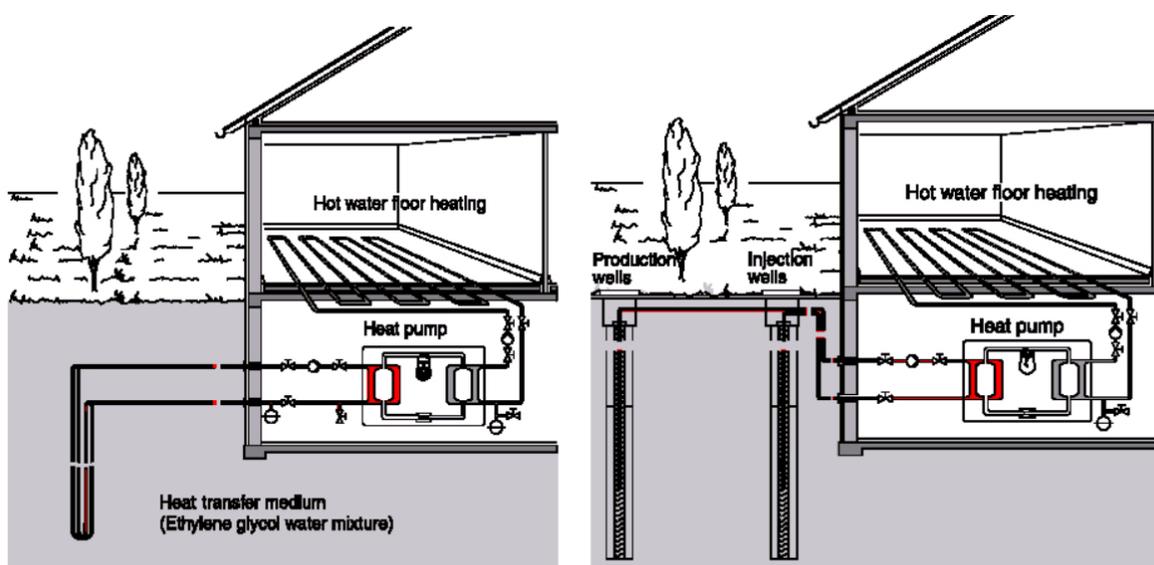


Figura 14 - A sinistra un esempio di impianto a circuito chiuso; a destra un esempio di impianto a circuito aperto (Banks, 2008)

## 2.6.2 Sistemi a circuito aperto

I sistemi a circuito aperto prevedono il prelievo delle acque sotterranee da una falda per restituirle in un sistema aperto ad una temperatura differente. La restituzione avviene generalmente nel medesimo acquifero, ma possono essere considerati anche i sistemi idrografici superficiali, la restituzione in acquiferi differenti, in bacini (aperti o chiusi) tramite trincee drenanti o pozzi. I due pozzi (prelievo e reimmissione) devono essere installati a una distanza sufficiente, in modo da evitare la cortocircuitazione termica, che si verifica quando l'acqua termicamente alterata dal pozzo di reimmissione raggiunge il pozzo di prelievo. L'acqua, grazie all'elevata capacità ed inerzia termica può accumulare calore e risente poco delle fluttuazioni stagionali: essa costituisce una buona sorgente per lo scambio termico. Dunque, le acque sotterranee e superficiali possono essere sfruttate come sorgente per lo scambio termico con la pompa di calore; tuttavia non sono disponibili ovunque e la possibilità di realizzazione di un impianto a circuito aperto è condizionata dalla presenza o meno di un serbatoio d'acqua. In aggiunta a ciò, bisogna considerare anche i vincoli, le limitazioni e i divieti dalle normative vigenti (Minchio, 2008).

Gli impianti geotermici a circuito aperto sono costituiti da un sistema di prelievo e uno di restituzione dell'acqua, da una o più pompe di calore e da un sistema di distribuzione (Figura 15).

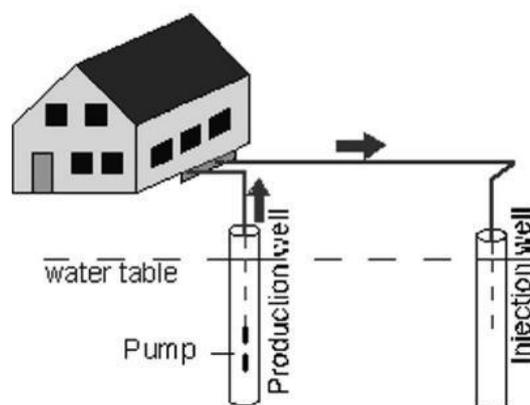


Figura 15 - Sistema geotermico a circuito aperto ([www.geo-energy.org](http://www.geo-energy.org))

Per la movimentazione dell'acqua sono necessarie pompe idrauliche (Noce, 2009); nel caso in cui lo scambio termico avvenga con le acque sotterranee, i costi di pompaggio per l'estrazione dell'acqua aumentano all'aumentare della soggiacenza della falda.

Prima di poter realizzare un sistema open loop è necessario valutare la qualità e le caratteristiche chimiche dell'acqua, le caratteristiche della falda e le caratteristiche idrogeologiche dell'area. Infatti, in alcuni casi è possibile che il chimismo dell'acqua in ingresso possa provocare incrostazioni o intasamenti dei circuiti della PdC; viene quindi inserito un circuito secondario. Quando invece la qualità dell'acqua è tale da garantire un corretto funzionamento dell'impianto, la pompa di calore viene direttamente collegata allo scambiatore.

Lo sfruttamento di acque superficiali per lo scambio termico permette di minimizzare i costi di pompaggio ma richiede, in molti casi, la presenza di un circuito secondario a causa della tendenza delle acque superficiali a formare incrostazioni e corrosioni. Tutto ciò comporta elevati costi di manutenzione e funzionamento; e diversi ostacoli dovuti al lungo iter autorizzativo richiesto per il rilascio delle autorizzazioni.

### **2.6.3 Sistemi a circuito chiuso**

Nei sistemi a circuito chiuso il calore viene ceduto dal sottosuolo all'ambiente da climatizzare mediante un fluidovettore circolante all'interno di sonde verticali in polietilene o altro materiale. Tali sonde sono infisse verticalmente nel terreno a profondità variabili (generalmente tra i 50 ed i 100 m di profondità). È un metodo per evitare problematiche legate alla reimmissione dei fluidi dopo l'utilizzo e per creare un impianto geotermico anche in assenza di acquiferi o acque superficiali. In questo tipo di soluzione, infatti, non avviene scambio di fluidi ma il calore viene prelevato o immesso nel sottosuolo attraverso un sistema di tubazioni all'interno delle quali il fluido circola in un loop continuo. Nei sistemi a circuito chiuso il serbatoio termico da cui viene estratto il calore è il sottosuolo; in questo tipo di impianti si genera lo scambio termico grazie alla circolazione di un fluido

termovettore attraverso una o più sonde geotermiche ("Borehole Heat Exchangers"-BHE).

La sonda geotermica consiste in un circuito chiuso, composto da un insieme di tubazioni in polietilene ad alta densità (HDPE), collegate in parallelo, nelle quali circola il fluido termovettore e che rappresentano le batterie di scambio del calore; tale geoscambiatore valorizza l'energia termica presente nel sottosuolo ed anche nelle eventuali falde acquifere intersecanti. In particolare, tali tubazioni possono essere disposte verticalmente nel terreno a grandi profondità, a circa 100 metri (in tale evenienza si parlerà di "sonde geotermiche verticali"), oppure orizzontalmente a circa 2-4 metri di profondità (in tal caso si denomineranno "sonde a collettori orizzontali"). Dal punto di vista costruttivo, al fine di avere un controllo puntuale su ogni singola sonda, in termini di portata e pressione, tutte le tubazioni sono solitamente collegate in parallelo tramite due collettori geotermici (uno per in flusso in mandata ed uno per il flusso di ritorno) muniti di valvola di intercettazione e valvola di bilanciamento della portata, per ogni singola sonda. Inoltre, al fine di proteggere le tubazioni in polietilene da lacerazioni ed eventuali schiacciamenti, durante il processo di posa viene solitamente predisposto un letto di sabbia con spessore minimo di 10 cm ed uno strato di ricopertura di sabbia litta (priva di ciottoli) di almeno 10 cm, con al di sopra un nastro segnaletico con dicitura "condotte per acqua".

Le sonde geotermiche possono essere distinte in due principali categorie:

- sonde geotermiche "ad U": sono composte da due tubazioni diritte unite da una giunzione "ad U" al piede della sonda; all'interno di un foro possono essere inserite una o più sonde geotermiche "ad U" (singola, doppia e tripla U) (Figura16).

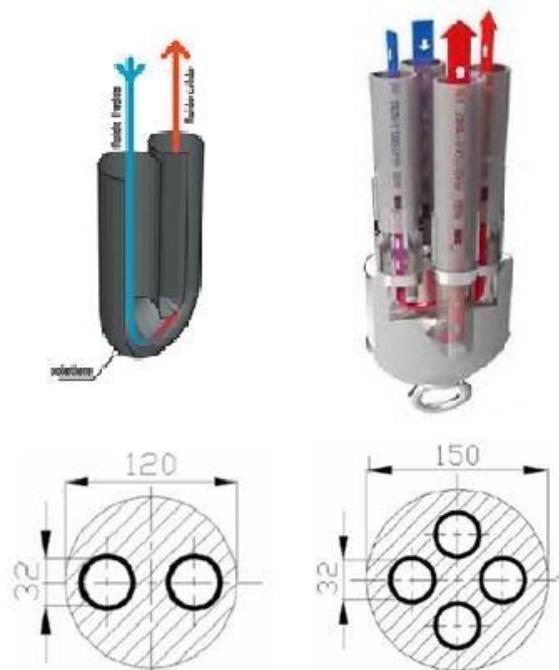


Figura 16 – Sonde geotermiche a singola e doppia U ([www.isolportale.com](http://www.isolportale.com))

- sonde geotermiche coassiali (o concentriche): sono composte da due tubazioni di diverso diametro inserite una all'interno dell'altra; nella tubazione più esterna, realizzata in acciaio, scorre il fluido caldo di mandata, in quella più interna, realizzata in polietilene, il fluido freddo per il ritorno (Figura 17).

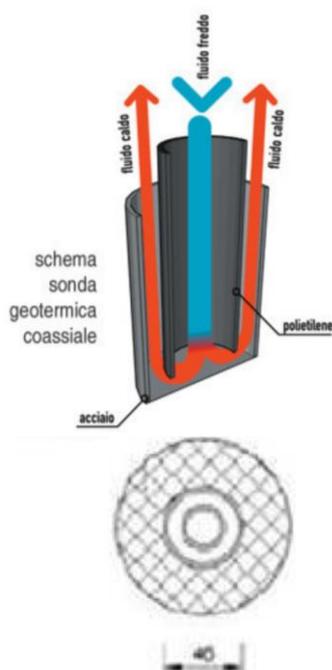


Figura 17 – Sonde geotermiche coassiali ([www.isolportale.com](http://www.isolportale.com))

Come già detto, i materiali con cui vengono solitamente fabbricate le sonde geotermiche sono il polietilene ad alta densità o il polietilene reticolato ad alta densità HDPE, in quanto tali materiali risultano caratterizzati da una buona resistenza e flessibilità.

Il diametro e lo spessore delle tubazioni devono essere tali da garantire lo scambio termico e da assicurare un regime di flusso turbolento all'interno della tubazione. Durante il passaggio attraverso la pompa di calore, il fluido termovettore cede/acquista l'energia termica e dopo essersi raffreddato/riscaldato rientra all'interno del circuito delle sonde geotermiche.

Il fluido termovettore può essere acqua nel caso in cui le temperature del fluido stesso non scendano al di sotto della temperatura di congelamento; nel caso in cui le temperature siano molto basse, invece, al fluido termovettore vengono addizionati anticongelanti che abbassano la temperatura di congelamento.

A differenza degli impianti a circuito aperto, l'attività di un impianto a circuito chiuso non genera il problema di smaltimento di fluidi, poiché dal terreno viene estratto solo il calore e non vi è trasferimento di massa.

I sistemi a circuito chiuso possono avere diverse configurazioni a seconda della tipologia di sonde geotermiche utilizzate.

### **2.6.3.1 Sonde geotermiche verticali**

Le sonde geotermiche verticali (sistemi GCHP - *Ground-Coupled Heat Pumps*) sono perforazioni verticali costituite da un circuito chiuso (andata-ritorno) di tubi in cui scorre un fluido termovettore che trasferisce il calore dal o al terreno.

Le profondità di perforazione variano tra i 40-250 m (mediamente tra gli 80-150 m) a seconda delle locali condizioni geologiche e idrogeologiche e dei vincoli normativi. Questi sistemi sfruttano la proprietà del sottosuolo di mantenere una temperatura costante durante l'anno a partire da una profondità di 15-20 m.

In questo tipo di impianti vengono realizzati dei fori all'interno dei quali vengono inserite le sonde geotermiche.



Figura 18 - Sistema geotermico a circuito chiuso - sonde geotermiche verticali ([www.geo-energy.org](http://www.geo-energy.org))

Una volta realizzato il foro e calate le sonde geotermiche all'interno dello stesso, viene iniettata a partire dalla base del foro fino al piano campagna, mediante un tubo di iniezione (a perdere), una miscela cemento-bentonitica (in questo modo si evita la presenza di interstizi vuoti e si garantisce il contatto termico tra sottosuolo e sonda).

Il dimensionamento di un sistema a sonde verticali è un processo critico da cui dipende l'efficienza, la durabilità e la sostenibilità economica dell'intero sistema di climatizzazione. È essenziale che gli scambiatori non siano né sovra né sottodimensionati: un sottodimensionamento delle sonde verticali non consentirebbe infatti un prelievo/smaltimento dell'energia termica utile al fabbisogno energetico richiesto dall'edificio, con necessità di utilizzo di sistemi integrativi e una conseguente riduzione dell'efficienza del sistema. Inoltre, in modalità riscaldamento, un sottodimensionamento degli scambiatori provocherebbe una diminuzione di temperatura del fluido termovettore, con un conseguente aumento della sua viscosità (quindi maggiore richiesta di energia impiegata dalle pompe di circolazione) e allargamento della perturbazione termica attorno gli scambiatori.

Il dimensionamento di sonde verticali ha per obiettivo una stima della loro lunghezza complessiva, mantenendo un controllo delle temperature del fluido termovettore in entrata e in uscita dalla pompa di calore. Il calcolo della lunghezza deve essere vincolato alle seguenti condizioni:

- le temperature del terreno in prossimità del pozzo non devono scendere al di sotto di 0 °C per evitare il congelamento delle porzioni di terreno umido;
- il raggiungimento di potenze adeguate al fabbisogno termico e/o frigorifero dell'edificio e compatibile con la potenza ottenibile tramite la PdC;
- la stima e il controllo degli effetti termici dovuti al prelievo o smaltimento di calore nel terreno sul breve e sul lungo periodo, per evitare che si verifichi un eccessivo decremento o incremento termico del sottosuolo;
- il controllo delle temperature del fluido termovettore in modo che la PdC operi dentro un intervallo compatibile con il suo corretto funzionamento.

Indipendentemente dalla taglia del progetto, per ottenere ciò è indispensabile che il progettista definisca l'insieme dei fattori impiantistici e geologici che determinano il funzionamento delle sonde verticali e, in particolare il fabbisogno energetico annuo e la potenza termica complessiva richiesta per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio.

Gli impianti che utilizzano le sonde geotermiche verticali, se paragonati con impianti che utilizzano scambiatori di tipo superficiale, permettono una resa più elevata, consentono la realizzazione dell'impianto anche in spazi ristretti; inoltre, se correttamente realizzati e collaudati non richiedono manutenzione ed i rischi di danneggiamento successivi alla realizzazione sono limitati.

### **2.6.3.2 Sonde geotermiche orizzontali**

I sistemi a circuito chiuso con sonde geotermiche orizzontali funzionano secondo lo stesso principio dei sistemi a sonde geotermiche verticali ma si differenziano per il fatto di essere costituiti da sonde installate poco al di sotto del piano campagna con uno sviluppo orizzontale.

Questa soluzione richiede minori investimenti iniziali rispetto alla soluzione con sviluppo verticale a causa delle mancate spese di perforazione; di contro è una soluzione meno efficiente poiché gli strati più superficiali di terreno risentono maggiormente delle variazioni climatiche esterne.

Indagini sperimentali e prassi di buona pratica hanno contribuito a definire una profondità standard alla quale posare i collettori: la profondità massima degli scavi oscilla tra 1,5 m e 2,5 m, tale da risentire dell'onda termica stagionale, attenuando e traslando nel tempo l'escursione termica.

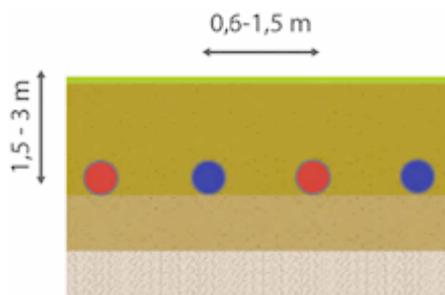


Figura 19 – Sezione di un sistema con sonde geotermiche orizzontali ([www.rossatogroup.com](http://www.rossatogroup.com))

L'influenza termica del collettore orizzontale sul terreno è maggiore data l'estensione del collettore: è consigliabile che la superficie di terreno sia interessata solo da vegetazione con apparato radicale poco profondo in modo da non risentire di variazioni termiche dovute alla presenza dell'impianto.

Le sonde geotermiche orizzontali possono avere uno sviluppo lineare ed essere connesse "in serie" o "in parallelo" o possono avere uno sviluppo a spirale.

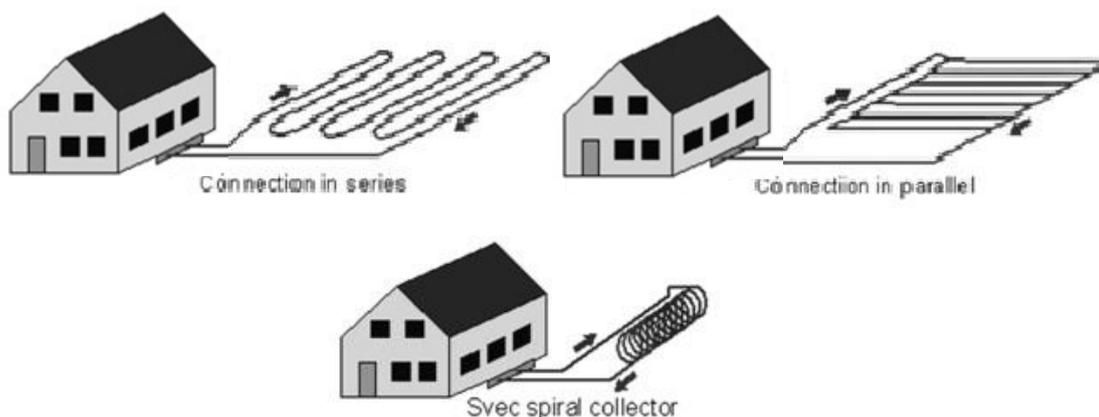


Figura 20 – Sistemi geotermici a circuito chiuso - sonde geotermiche orizzontali ([www.geo-energy.org](http://www.geo-energy.org))

La ricarica energetica del terreno che scambia calore con le sonde orizzontali è dovuta principalmente dall'energia proveniente dalla radiazione solare; di questo bisogna tener conto nella progettazione dell'impianto in quanto è scorretto

posizionare le sonde al di sotto di edifici o sotto aree asfaltate ed impermeabili (Noce, 2009).

La disposizione orizzontale delle sonde permette di evitare costose perforazioni ma necessita della disponibilità di ampi spazi, fino anche a due volte la superficie da climatizzare, per effettuare lo scavo che può essere realizzato mediante sbancamento o mediante la realizzazione di una trincea (Figura 21). Nel caso dello sbancamento, viene movimentata un'ampia superficie di terreno per una profondità di circa 1 m; dopo il posizionamento delle sonde viene posato uno strato di sabbia ed il tutto viene ricoperto con il terreno scavato precedentemente. Nel caso della posa delle sonde all'interno di trincee si ha una notevole riduzione del materiale di scavo e dell'impatto di cantiere: vengono realizzate trincee larghe generalmente 60 cm e profonde fino a 3 m al cui interno vengono posizionati gli scambiatori. Al fine di minimizzare l'effetto di interferenza termica tra trincea e trincea è necessario che queste siano adeguatamente distanziate tra loro (circa 2,5 m).

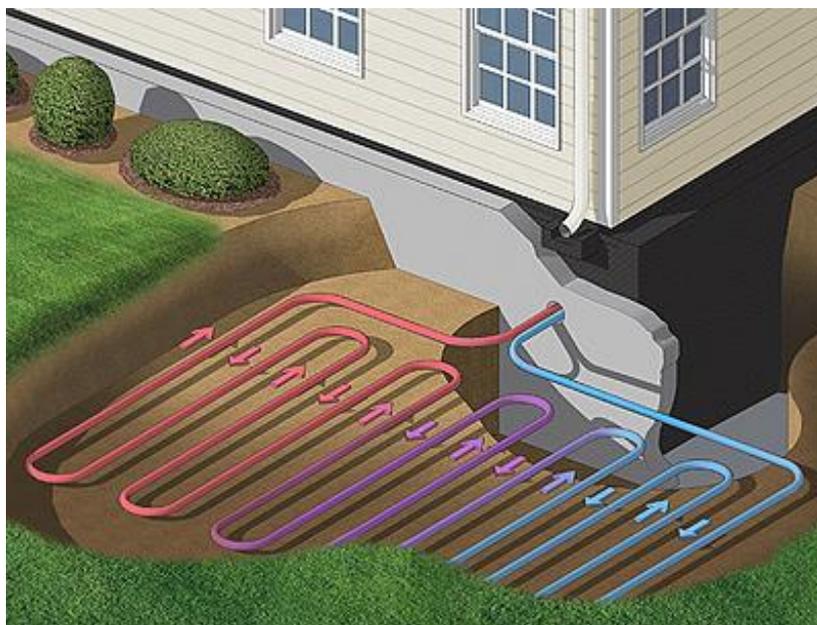


Figura 21 – Schema di installazione di un sistema geotermico a sonde orizzontali ([www.consulente-energia.com](http://www.consulente-energia.com))

Il principale vantaggio rispetto alla soluzione classica a sonde verticali consiste nella minore incidenza dei costi della parte di captazione geotermica; per contro, si evidenziano i seguenti svantaggi:

- sistema meno performante perché la sua efficienza è influenzata dalle

- temperature esterne;
- non è consigliabile per raffrescamento estivo, se abbinato ad un impianto di distribuzione ad alta temperatura deve essere opportunamente sovradimensionato;
  - sull'area interessata dal campo sonde non è possibile edificare, realizzare pavimentazioni, piantumare alberi ad alto fusto e sempreverdi (non ci sono problemi per la destinazione a giardino o a frutteto).

### 2.6.3.3 Geostrutture energetiche

Le geostrutture energetiche sono una forma di sfruttamento dell'energia geotermica a bassa profondità. Sono elementi costruttivi di edifici che si trovano a diretto contatto con il terreno e sono in grado di trasmettere il calore. L'idea è quella di sfruttare strutture esistenti o comunque create per un'altra finalità e utilizzare la loro posizione (ovvero il contatto con il terreno e con l'acqua di falda ad una certa profondità) per ricavare energia geotermica, sotto forma di calore, tenendo a mente che questo è solo un fine secondario. In linea teorica tutte le geostrutture (pali e platee di fondazione, diaframmi, rivestimenti delle gallerie, tiranti) a contatto con il suolo possono essere utilizzate per scambiare calore. Nella pratica ci sono strutture più adatte e più performanti rispetto ad altre: ne fanno parte, ad esempio, i cosiddetti pali energetici, le solette o le pareti di seminterrati e garage sotterranei. La costruzione di un edificio in terreni con scarsa capacità portante richiede la realizzazione di pali che migliorino le caratteristiche del sottosuolo; queste strutture possono permettere lo scambio termico con il terreno se all'interno delle stesse viene cementato un circuito chiuso costituito da sonde in polietilene.

Le fondazioni sotterranee o su pali equipaggiate di scambiatori termici per la produzione di energia vengono detti *pali energetici* o fondazioni fredde (Minchio, 2008). Normalmente, con le geostrutture il calore viene ottenuto dalle componenti costruttive situate nel sottosuolo saturo d'acqua. Rispetto ai circuiti verticali classici, i pali di fondazione hanno un'unica differenza: la loro funzione primaria è quella di sostegno della sovrastruttura e quindi, nella posa e nella scelta delle

dimensioni dei tubi, non si può trascurare questo aspetto, in modo da non intaccare le caratteristiche meccaniche della fondazione (Figura 22).

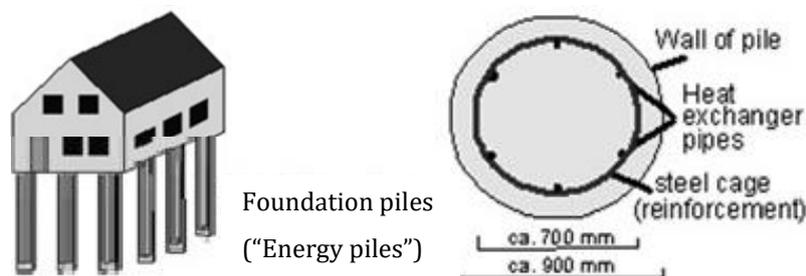


Figura 22 - Sistemi a circuito chiuso - Sezione di un palo energetico ([www.geo-energy.org](http://www.geo-energy.org))

Nel caso di elementi portanti di grosse dimensioni la posa dei circuiti viene effettuata in cantiere all'interno dell'armatura; in caso contrario il circuito viene installato all'interno dell'armatura ex-situ; questo tipo di soluzione è applicabile anche ai micropali.

Rispetto alle sonde geotermiche verticali, viste precedentemente, le geostrutture risultano ancora poco diffuse: solo circa l'1% di tutti gli impianti a pompa di calore che sfruttano la geotermia riceve calore dalle geostrutture.

Il principio di funzionamento è a circuito chiuso: quelle componenti in calcestruzzo che sono a contatto con la terra sono dotate di tubi nei quali circola un fluido termovettore; questo liquido, tramite il calcestruzzo, riceve o cede calore geotermico.

In Figura 23 è riportato un esempio di palo energetico, in cui il circuito assorbente è connesso alla gabbia di armatura: si osservi che le porzioni terminali del circuito sono protette da un tubo posto in corrispondenza della parte superiore del palo. Similmente a quanto avviene con i sistemi geotermici tradizionali a circuito chiuso, le tubazioni sono disposte a formare un insieme di percorsi a U (Brandl, 2006).



Figura 23 – Schema di tubi scambiatori di calore fissati alla gabbia di armatura di un palo energetico di fondazione (Brandl, 2006)

Un'altra geostruttura impiegata per lo scambio termico è il *diaframma*.

In confronto a un sistema di pali energetici, nel sistema a diaframma possono essere utilizzati, per il trasferimento di calore geotermico, volumi di terra potenzialmente più grandi. Questa struttura viene utilizzata spesso quando siamo in situazioni in cui viene utilizzato il metodo di scavo chiamato *cut and cover* dove i diaframmi vengono utilizzati per il sostegno del terreno laterale (Brandl, 2006). Tale metodo consiste in uno scavo sotto battente di bentonite e posa di paratie di protezione; attraverso le seguenti fasi di costruzione:

- infissione, tramite una macchina munita di un argano e di una benna mordente, in trincee riempite di fanghi bentonitici;
- inserimento di armature metalliche all'interno delle trincee;
- scavo a cielo aperto fino alla profondità necessaria;
- copertura dello scavo con un impalcato provvisorio;
- rinterro superiore.

Il principio di funzionamento è identico a quello descritto per i pali di fondazione energetici: i tubi dello scambiatore di calore sono fissati alla gabbia di rinforzo in acciaio strutturale inserita nel diaframma, come mostrato nella Figura 24. La posizione dei tubi all'interno del calcestruzzo è solitamente vicina al lato del

terreno, ciò può ridurre la resistenza termica del calcestruzzo e migliorare le prestazioni termiche complessive della parete di energia (Figura 25).

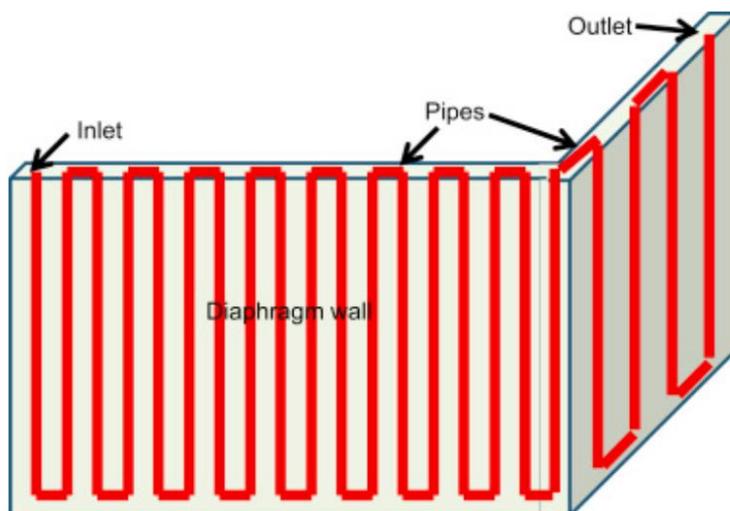


Figura 24 – Schematizzazione di un diaframma (www.sciencedirect.com)

Esistono due modalità operative possibili: sia per il riscaldamento che per il raffreddamento e solo per il riscaldamento. Se viene utilizzato un diaframma per un seminterrato, il lato interno del muro è isolato per garantire che il calore dagli scambiatori si trasferisca nel terreno piuttosto che nel seminterrato. Facendo così, può provvedere sia al riscaldamento che al raffreddamento delle strutture fuori terra.

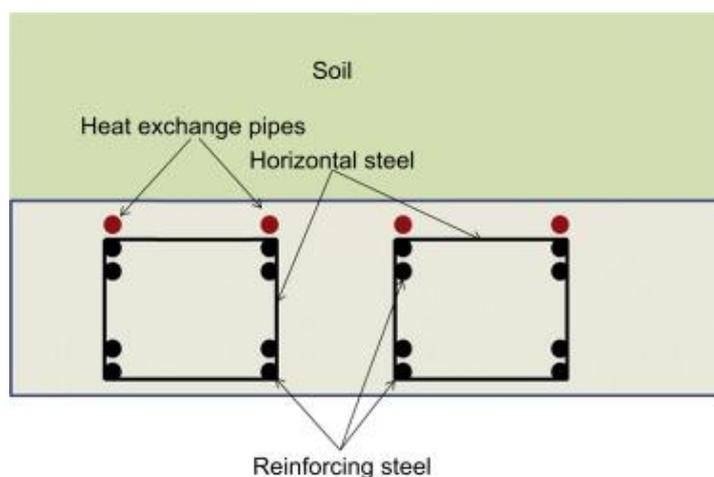


Figura 25 – Sezione trasversale di un diaframma con evidenziate le posizioni degli scambiatori di calore (www.sciencedirect.com)

In Figura 26 è riportato un esempio di paratia, in cui, similmente al caso riportato in Figura 23, è possibile osservare il circuito di tubazioni fissate all'armatura. L'utilizzo di paratie e diaframmi è particolarmente conveniente in aree urbane, dove la disponibilità di spazio risulta limitata e la necessità di controllare i cedimenti associati negli edifici richiedono che le pareti di scavo siano supportate e rinforzate.



*Figura 26 – Schema di armatura di un diaframma energetico e tubazioni di scambio di calore (Brandl, 2006)*

Inoltre, l'attivazione energetica di tali strutture risulta funzionale data la vicinanza di edifici che possono sfruttare l'energia geotermica superficiale per il condizionamento degli ambienti interni.

#### **2.6.4 Avanzamenti tecnologici attesi**

Gli avanzamenti attesi nell'ambito delle risorse geotermiche a bassa entalpia si possono suddividere in due gruppi riferibili, il primo all'estrazione del calore, ed il secondo alla tecnologia di utilizzazione del calore estratto:

- nel primo gruppo rientrano i materiali delle sonde e dei fluidi in esse circolanti, che consentono di aumentare il tasso di estrazione oraria del calore (e quindi dell'efficienza), e quindi le apparecchiature e la strumentazione di controllo del circuito primario.
- il secondo gruppo include il macchinario, le attrezzature di scambio

termico, gli impianti termici e la rete di distribuzione del calore agli utenti, tutti in superficie.

È atteso un notevole sviluppo di tutti i comparti di applicazione del calore geotermico, ed in particolare di quello per la climatizzazione di ambienti ed il teleriscaldamento.

Le sonde sono costituite da una o più coppie di “tubi ad U” in polietilene alloggiati in pozzi di 100÷150 m di profondità e sigillati con cemento bentonitico, nei quali viene fatta circolare una miscela di acqua e fluido anticongelante (glicole propilenico, o altro). Per piccole applicazioni, e quando esiste spazio sufficiente, si utilizzano anche scambiatori con tubi in polietilene interrati fino a circa 2 m di profondità, con diverse configurazioni: a treccia, a serpentina, a cerchi concentrici, ad andamento elicoidale, ecc., in giacitura orizzontale o verticale.

Un'ulteriore possibilità consiste nell'inserimento nei pali di fondazione (fino a 10÷20 m) dell'edificio o struttura edilizia da climatizzare, di tubi scambiatori di calore.

In tutti questi casi, siccome la variazione di temperatura tra andata e ritorno del fluido della sonda, ottenuta dallo scambio diretto con le rocce in pozzi di 100÷150 m, o con il terreno circostante ai pali di fondazione fino a 10÷20 m, o ancora con il suolo in trincee profonde fino a 2 m, risulta assai modesta (10÷30 °C), al fine di ottenere la temperatura necessaria allo scambiatore finale di climatizzazione dell'ambiente, bisogna interporre nel circuito termico una pompa di calore (par. 2.7.1).

È dunque probabile un notevole sviluppo nella costruzione di pompe di calore di piccole e medie dimensioni, con prestazioni sempre più avanzate, capace di favorire la progressiva sostituzione delle attuali caldaie di riscaldamento domestico. Le pompe di calore geotermiche, infatti, oltre a dare la doppia possibilità di riscaldamento invernale e raffrescamento estivo, per la loro semplicità di impianto ed economia di esercizio, nonché per i vantaggi ambientali derivanti dalle emissioni evitate di CO<sub>2</sub>, risultano comunque più convenienti (anche per solo riscaldamento) rispetto a tutti i tipi di caldaia attualmente in uso, comprese quelle a condensazione.

## 2.7 Generalità sullo scambio termico

Alla base dei sistemi di scambio termico che son stati presentati precedentemente vi è un processo fisico relativamente complesso che è quello dello scambio termico. Per trasmissione del calore si intende il trasferimento di calore e quindi di energia termica tra due sistemi, causato da una differenza di temperatura tra i due. Generalmente nei processi fisici questo scambio può avvenire secondo tre modalità:

- 1) *Conduzione*: la trasmissione di calore che avviene tra corpi solidi, liquidi o aeriformi a contatto tra loro, che si trovano a temperature differenti. Nella zona di contatto tra i due corpi, le particelle del corpo a temperatura maggiore, che possiedono un'energia cinetica più elevata, urtandosi con le particelle del corpo a temperatura minore, che possiedono un'energia cinetica più bassa, trasferiscono loro una parte dell'energia cinetica. Nella conduzione il calore si propaga attraverso gli urti tra le particelle. La conseguenza è un aumento della temperatura del corpo più freddo e una diminuzione della temperatura del corpo più caldo fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. Questo fenomeno avviene senza che ci sia trasporto macroscopico di materia;
- 2) *Convezione*: il processo di trasferimento di calore tipico dei fluidi. Supponendo di prendere due corpi a diversa temperatura non a diretto contatto tra loro, ma separati da una cavità all'interno della quale vi è un fluido, in presenza di gradienti di temperatura, le particelle del fluido cominciano a muoversi. Aumentando di temperatura per conduzione, il fluido a contatto con il corpo caldo si espande e diminuisce di densità, e a causa della spinta di Archimede sale essendo meno denso del fluido che lo circonda che è più freddo. Si generano così moti convettivi, in cui il fluido caldo sale verso l'alto e quello freddo scende verso il basso. È un tipo di trasporto di materia ed energia assente nei solidi e trascurabile per i fluidi molto viscosi, causato da un gradiente di pressione e dalla forza di gravità e caratterizzato da moti di circolazione interni al fluido;
- 3) *Irraggiamento*: un processo di trasferimento del calore che non necessita di

un mezzo per lo scambio di energia tra corpi, ma può avvenire anche nel vuoto, poiché si sviluppa attraverso la propagazione di onde elettromagnetiche. I corpi trasmettono calore per irraggiamento anche a bassa temperatura, in quanto emettono dei raggi infrarossi, cioè aventi una lunghezza d'onda superiore a 780 nm, quindi non visibili dall'uomo.

Il funzionamento di un impianto geotermico si basa sugli scambi di calore tra le diverse parti coinvolte. La forza trainante è la differenza di temperatura tra il suolo, il fluido circolante e l'edificio. Nel primario uso di geostrutture energetiche, ovvero riscaldamento durante l'inverno (fluido più freddo rispetto al suolo), il calore è trasmesso dal terreno, attraverso il materiale strutturale al fluido che circola, e questo lo porta alla pompa di calore. Nella modalità di riscaldamento il calore va dalla pompa di calore al fluido circolante e viene quindi trasmesso al terreno.

Per quanto riguarda i materiali porosi, come cemento e suolo in un sistema a circuito chiuso, il trasferimento di calore può avvenire per conduzione, convezione e cambiamento di fase, il cui contributo risulta non significativo e viene quindi trascurato nelle applicazioni di geostrutture energetiche.

Secondo la legge di Fourier il flusso di energia termica [W/m<sup>2</sup>] generato per conduzione  $q_{cond,i}$  risulta pari a:

$$q_{cond,i} = -\lambda^{th} \cdot \nabla T$$

dove:

- $\lambda^{th}$  è la conducibilità termica del mezzo;
- $\nabla$  è il gradiente;
- T è la temperatura.

Nel caso in cui il mezzo poroso all'interno del quale i tubi sono inseriti (il terreno) fosse saturo, ovvero in presenza di falda, il flusso di energia è la somma dei flussi di calore attraverso la fase fluida e solida; la conducibilità termica  $\lambda^{th}$ , assumendo il mezzo omogeneo ed isotropo, può essere espressa come segue:

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

dove:

- $n$  è la porosità;
- $\lambda_f$  è la conduttività termica del fluido;
- $\lambda_s$  è la conduttività termica del solido.

Nel mezzo saturo d'acqua, il flusso di potenza termica [W/m<sup>2</sup>] generato per convezione  $q_{conv,i}$  è corrispondente al calore trasportato dalla circolazione del fluido (acqua). Di conseguenza, per definizione, il suo contributo è significativo solo se è presente un flusso di acqua costante. Esso risulta pari a:

$$q_{conv,i} = C_{pw} \cdot \rho_w \cdot v_{w,i} \cdot (T - T_0)$$

Dove:

- $C_{pw}$  è la capacità termica specifica;
- $\rho_w$  è la densità dell'acqua;
- $v_{w,i}$  è la velocità relativa dell'acqua rispetto allo scheletro solido;
- $T_0$  è la temperatura di riferimento.

A seconda della geostruttura energetica è possibile estrarre una certa quantità di energia (Barla et al., 2017). In particolare:

- Pali di fondazione con diametro  $D = 0.3-0.5$  m: 40-60 W per m lineare;
- Pali di fondazione con diametro  $D \geq 0.6$  m: 35 W per m<sup>2</sup> di area di contatto con la terra;
- Diaframmi, pareti (completamente incassati nel terreno): 10-50 W per m<sup>2</sup> di area di contatto con la terra, le differenze possono dipendere dalla profondità dell'installazione, dalle proprietà termiche e idrauliche del terreno, e specialmente dalla presenza di acque sotterranee;
- Gallerie: 10-50 W per m<sup>2</sup>, in questo caso in particolare bisogna considerare l'effetto della temperatura e della velocità dell'aria all'interno della galleria, se calda, infatti, rappresenterebbe una risorsa ulteriore di calore durante l'inverno, al contrario comporterebbe uno svantaggio in

estate;

- Platee: 10-30 W per m<sup>2</sup> di superficie di contatto.

Ulteriori considerazioni su questo aspetto e la sua analisi a seconda della specifica situazione possono essere trovati in Bourne-Webb (2013): quando viene applicata l'iniezione di calore, la capacità di stoccaggio della massa del suolo diventa il parametro fondamentale. Il calore  $Q$  [J] che può essere estratto dalla riduzione della temperatura media del terreno di un grado Celsius, è pari a:

$$Q = C_{sp} \cdot \Delta T_{soil}$$

con  $C_{sp}$  pari a:

$$C_{sp} = \rho_c \cdot L_A \cdot A$$

dove:

- $C_{sp}$  [J/K] è la capacità specifica di accumulo di calore;
- $L_A \cdot A$  è il volume di terreno coinvolto;
- $\rho_c$  è la capacità termica volumetrica.



## CAPITOLO 3

### Campo sperimentale: Energy Center

Il Comune di Torino, con il contributo di istituzioni, imprese, centri di formazione d'eccellenza nell'ambito del settore energetico-ambientale ha elaborato una serie di interventi volti al sostegno alla ricerca, alla multidisciplinarietà, allo stimolo all'innovazione, puntando sul tema della sostenibilità energetica.

Nel 2016 nasce, ad opera del Politecnico di Torino, l'*Energy Center Initiative (ECI)*, con lo scopo di attivare progetti per fornire sostegno e consiglio strategico alle autorità locali, enti nazionali e transnazionali, sulle politiche e tecnologie energetiche da adottare ([www.energycenter.polito.it](http://www.energycenter.polito.it)).

I due pilastri di ECI sono:

- l'*Energy Center House (EC-H)*: un nuovo edificio in grado di ospitare aziende, start-up e pubbliche amministrazioni ed altri soggetti attivi nei comparti dell'R&D, del management, e della policy e decision-making in campo energetico;
- l'*Energy Center Lab (EC-L)*: il Centro Interdipartimentale per l'Energia, che riunisce un gruppo multidisciplinare di ricercatori e docenti del Politecnico dedicato allo studio di tecnologie e sistemi integrati per la transizione ad una società più sostenibile verso l'uso dell'energia e l'ambiente ([www.energycenter.polito.it](http://www.energycenter.polito.it)).

L'*Energy Center* è un'infrastruttura multifunzionale orientata verso la fase terminale del processo di ricerca industriale, dedicata ad attività di ricerca e

trasferimento tecnologico. La sua struttura è uno spazio attrezzato e flessibile per la fornitura di servizi qualificati per le imprese, un laboratorio al servizio del territorio in cui sviluppare e testare tecnologie e soluzioni applicative innovative in campo energetico ([www.compagniadisanpaolo.it](http://www.compagniadisanpaolo.it)).

La sua realizzazione ha visto il coinvolgimento della Città di Torino, del Politecnico di Torino, della Regione Piemonte, della Compagnia di San Paolo e della Fondazione CRT.

La superficie impiegata per la costruzione dell'Energy Center è di 7000 m<sup>2</sup> totali, di cui 5000 m<sup>2</sup> destinati al centro e 2000 m<sup>2</sup> di parcheggio pertinenziale. Esso ha l'obiettivo di promuovere e sostenere la ricerca, condividere le soluzioni, attrarre i finanziamenti europei, nazionali e privati sul tema dell'energia (Figura 27).



*Figura 27 – Energy Center ([www.Mattioda.it](http://www.Mattioda.it))*

La costituzione dell'Energy Center a Torino tende quindi a favorire e concepire lo sviluppo locale secondo un modello “a tre eliche”, i cui poli siano innovazione, formazione e industria, con una connessione stretta e diretta con le politiche energetiche (europea, nazionale e regionale) e i loro attori (Commissione Europea, Ministeri, Regione Piemonte) ([www.politocomunica.polito.it](http://www.politocomunica.polito.it)).

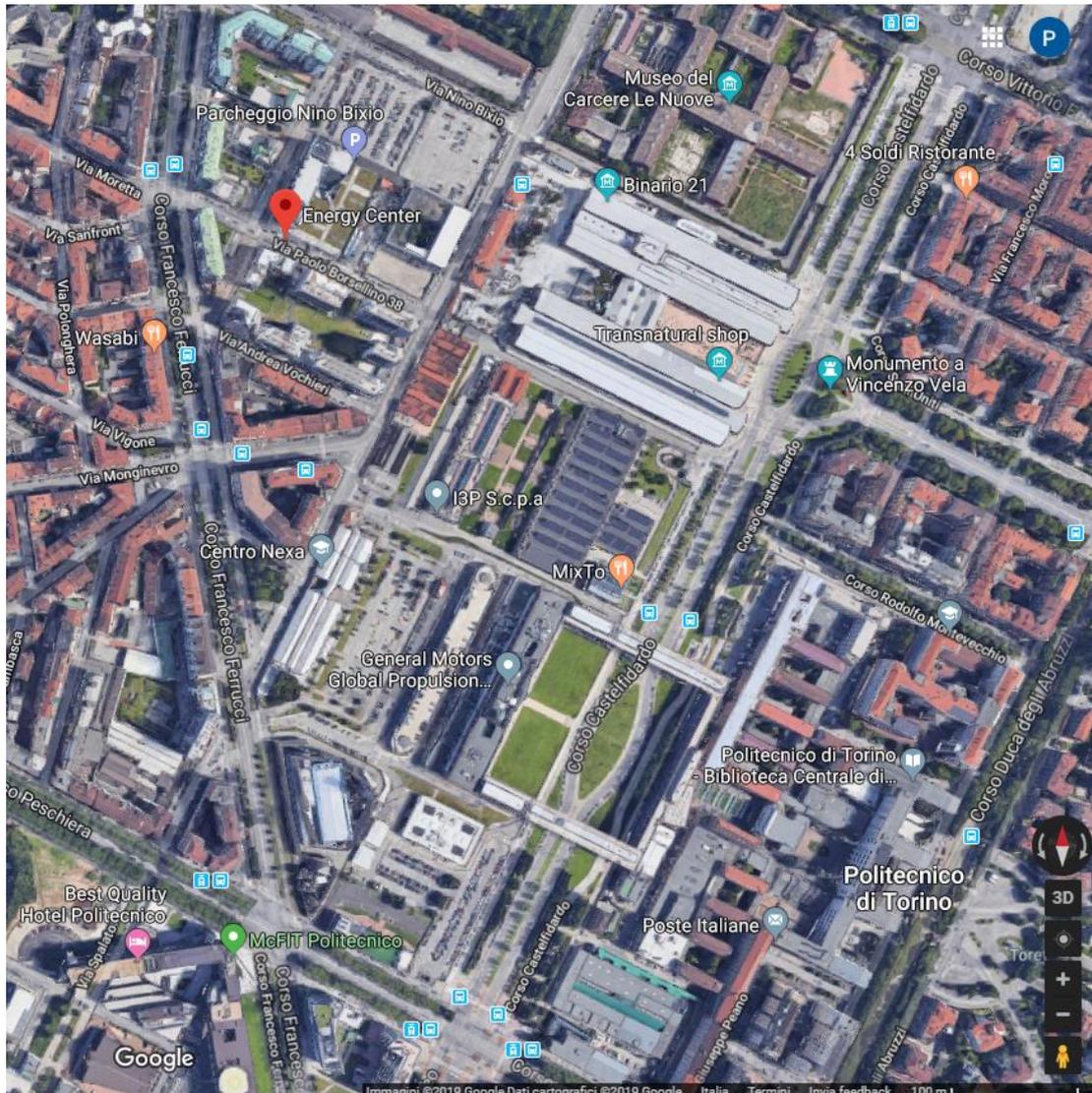


Figura 28 – Vista dall'alto dell'Energy Center (Google Maps)

Come si può osservare dalla Figura 28, il suo posizionamento all'interno della città di Torino non è casuale, ma risponde all'esigenza di collocarlo in un contesto già fertile e dedicato alla ricerca e all'innovazione: in particolare, mantiene la vicinanza con il campus universitario Politecnico di Torino, dove dipartimenti universitari, incubatori di imprese e punti di aggregazione convivono in una miscela tra pubblico e privato già collaudata. Verrà posta particolare attenzione ai bisogni provenienti dall'energia e si cercherà di offrire una risposta in termini di ricerca e di creazione di soluzioni efficaci.

Ciò grazie anche alla disponibilità di dati energetici di vasta scala: l'Energy Center sarà l'occasione per costituire una data-house di supporto alle decisioni politiche e

alla creazione di nuove iniziative imprenditoriali, in un'epoca in cui la disponibilità e la gestione dei dati assume una valenza strategica ([www.fondazioneecrt.it](http://www.fondazioneecrt.it)). L'Energy Center sarà dunque una casa comune per soggetti pubblici e privati, dove la vicinanza anche fisica favorirà il co-working e la cooperazione, incoraggiando la costruzione nuovi progetti a partire da competenze diverse che agiscono con obiettivi comuni. Studenti, ricercatori pubblici e privati, amministratori, soggetti finanziari (investitori) e imprenditori, startupper e sviluppatori informatici: un luogo di incontro e di accensione di idee nuove che conferma la capacità di Torino di essere Città della Conoscenza viva e ospitale, nonché del Piemonte di essere una regione all'avanguardia a livello nazionale nelle scelte su temi di rilevanza strategica per lo sviluppo dell'ecosistema territoriale ([www.politocomunica.polito.it](http://www.politocomunica.polito.it)).

### **3.1 Realizzazione dell'impianto a sonde geotermiche**

L'obiettivo del lavoro svolto presso l'Energy Center è stato quello di inserire dei pannelli modulari di sonde geotermiche a contatto tra il terreno e la superficie della struttura realizzata.

Il processo di attivazione termica è avvenuto applicando le sonde geotermiche su una struttura già esistente secondo le seguenti fasi:

- identificazione della zona di interesse della struttura;
- scavo del terreno a contatto con la superficie perimetrale della struttura,
- installazione dei pannelli modulari delle sonde geotermiche;
- ripristino della terra spostata, a posizionamento completo, ottenendo la condizione iniziale con le serpentine inserite.

Procedendo in questo modo la struttura e il terreno non vengono alterati minimamente ma ciò ha permesso l'attivazione termica delle sonde geotermiche.

I lavori di scavo sono iniziati in data 26/06/2019: lo scavo è stato effettuato per mezzo di un escavatore: una macchina utilizzata per tutte le operazioni che richiedono un movimento di terra, ovvero la rimozione di porzioni di terreno non particolarmente coerente, tale da consentirne una relativamente facile

frantumazione. La protezione dello scavo a cielo aperto, in presenza di pareti verticali, è stata eseguita con sistemi di armatura e di puntellamento delle stesse con elementi di sostegno realizzati in acciaio. L'utilizzo di sistemi metallici prefabbricati modulari e testati secondo normativa tecnica, consente vantaggi maggiori rispetto a quelli realizzati in legno che si concretizzano in: facilità di posa, recupero dopo posa, profili di notevole inerzia, flessibilità geometrica, scelta delle caratteristiche di resistenza in base alla distanza del puntello di base e della larghezza interna di puntellamento, ambienti di diversa natura con o senza presenza di acqua.

Si è proceduto, dunque, con uno scavo parziale fino a 80/120 cm, successivamente si è disposta l'armatura tramite infissione nel terreno e si sono installati i puntoni di contrasto. In aggiunta a ciò, il puntello è un componente che oppone resistenza alle forze di compressione e trazione e ai momenti nei collegamenti terminali: esso è elemento necessario sia nei sistemi di puntellamento per scavi che nei sistemi di sostegno e contrasto mediante infissione di palancole prefabbricate. È riportata nella Figura 29 lo schema delle armature precedentemente spiegato con la presenza di un miniescavatore a fondo scavo che facilita la fase di rimozione del materiale.



*Figura 29 – Armatura di scavo*

I sistemi di sostegno e contrasto sono stati installati secondo le istruzioni fornite dal fabbricante e sono stati messi in opera per infissione: spingendo ciascun pannello verso il basso tramite l'utilizzo della benna dell'escavatore i pannelli sono stati così spinti alternativamente lungo ogni montante (Figura 30).

Il sistema statico o a pressione idraulica è composto da un braccio meccanico che afferra la palancola e la spinge per un tratto nel terreno mediante pressione; in aggiunta a ciò l'infissione avviene anche sfruttando il peso dell'attrezzatura stessa e la resistenza all'estrazione delle palancole precedentemente infisse su cui si fa leva. L'assenza di vibrazione ha consentito l'applicazione del palancole anche a distanza ridotta dalla struttura esistente eliminando il rischio di danni collaterali

per cedimenti o altri danni che le vibrazioni potevano provocare. Per limitarne la flessibilità della struttura, i pannelli sono stati vincolati al terreno con puntoni di ancoraggio.

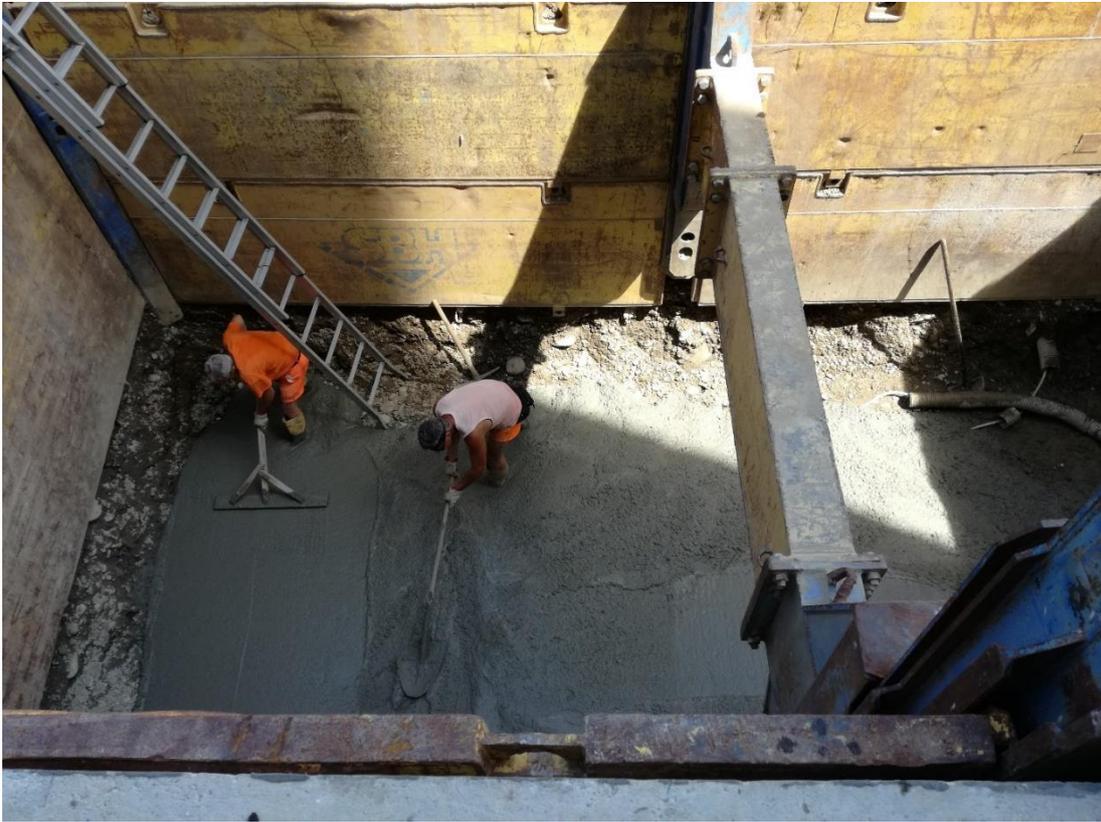


*Figura 30 – Infissione paratie per mezzo della benna*

Una volta che è stato effettuato lo scavo è stata utilizzata la beton pompa per la realizzazione di un magrone a circa 4,70 m di profondità, mantenendo l'orizzontalità del piano utilizzando un radar in linea con il proprio ricevitore (Figura 31).

Il magrone è un calcestruzzo "magro", ovvero realizzato con quantitativi ridotti di cemento (meno di  $150 \text{ kg/m}^3$ ), e una curva granulometrica degli inerti a dimensione abbastanza grossa.

Lo scopo del magrone nell'utilizzo come sotto fondazione è stato quello di costituire un piano orizzontale e pulito per il posizionamento del trabattello, utile per poter operare direttamente sul muro per il posizionamento delle sonde.



*Figura 31 – Stesa dello strato di magrone*

Successivamente sono stati effettuati, per mezzo di una carotatrice ad acqua, dei fori sul muro su cui verranno posizionate le sonde geotermiche per permettere il passaggio dei cavi della sensoristica applicata e delle sonde stesse. Una carotatrice risulta formata da due parti essenziali, la prima consiste nell'impugnatura con mandrino rotativo e la seconda consiste nella punta a tazza diamantata. In particolare, nella carotatrice ad acqua, questa è un elemento fondamentale per il carotaggio, difatti oltre a lubrificare la punta durante la fase di carotaggio va anche a raffreddarla riducendone il processo di usura. Questo tipo di carotatrice va, inoltre, collegata ad un rubinetto d'acqua tramite apposito tubo: una volta aperto ne garantirà lo scorrimento continuo sulla punta durante tutta la fase di carotaggio. Il suo utilizzo è ideale per i lavori più difficili come la perforazione del calcestruzzo,

del cemento armato come nel caso in esame. La tazza carotatrice è realizzata con metalli molto resistenti che ne garantiscono la robustezza e la resistenza all'abrasione nel tempo, in particolare la parte frontale adibita al taglio permette l'erosione di qualsiasi tipo di materiale grazie all'area diamantata. In Figura 32 è possibile osservare la carotatrice ad acqua adoperata e i fori di 130 mm di diametro effettuati sul muro dal lato esterno.



*Figura 32 – Carotatrice ad acqua e fori effettuati sul muro*

Una volta effettuati i fori sul muro, si è proceduto con il posizionamento delle sonde geotermiche secondo la geometria fornita con ancoraggio al muro tramite tasselli (in Figura 34 sono riportate le tre tipologie di geometria applicata con quotatura in cm). I tubi adoperati sono RAUTHERM S (REHAU S.p.A, *Unlimited Polymer Solution*), realizzati in polietilene reticolato in modo perossidico PE-Xa: questo tipo di reticolazione si ottiene ad alta temperatura e alta pressione con l'aiuto di perossidi (Figura 33).

La caratteristica identificativa di questa reticolazione è il fatto avviene nella massa fusa al di fuori del punto di fusione del cristallite.

La reazione di reticolazione avviene durante la formazione del tubo all'interno dell'estrusore: questo procedimento garantisce una reticolazione uniforme e molto elevata sull'intera sezione, anche sui tubi con pareti molto spesse.



Figura 33 – Tubo RAUTHERM S 20x2.0 mm

Il tubo risulta conforme alla norma DIN 4726 (Istituto tedesco per la standardizzazione) : la registrazione DIN CERTCO conferma l'utilizzabilità dei tubi e il collegamento a manicotto autobloccante relativo nelle installazioni per riscaldamento secondo la norma DIN 4726/UNI EN ISO 15875 classe di applicazione 5 e la tenuta stagna contro l'ossigeno per essi necessaria. In Tabella 1 vi sono elencati i possibili diametri e rispettivi spessori per il tubo, con evidenziato quello adoperato nel caso in esame, ovvero RAUTHERM S con  $d = 20$  mm e  $s = 2.0$  mm, fornito in rotoli di 119 m.

d mm	s mm	Vol. l/m	Confezione
10,1	1,1	0,049	Rotolo
14	1,5	0,095	Rotolo
16	2,0	0,113	Rotolo
17	2,0	0,133	Barra / Rotolo
20	2,0	0,201	Barra / Rotolo
25	2,3	0,327	Barra / Rotolo
32	2,9	0,539	Barra

Tabella 1 - Fornitura tubo RAUTHERM S (REHAU)

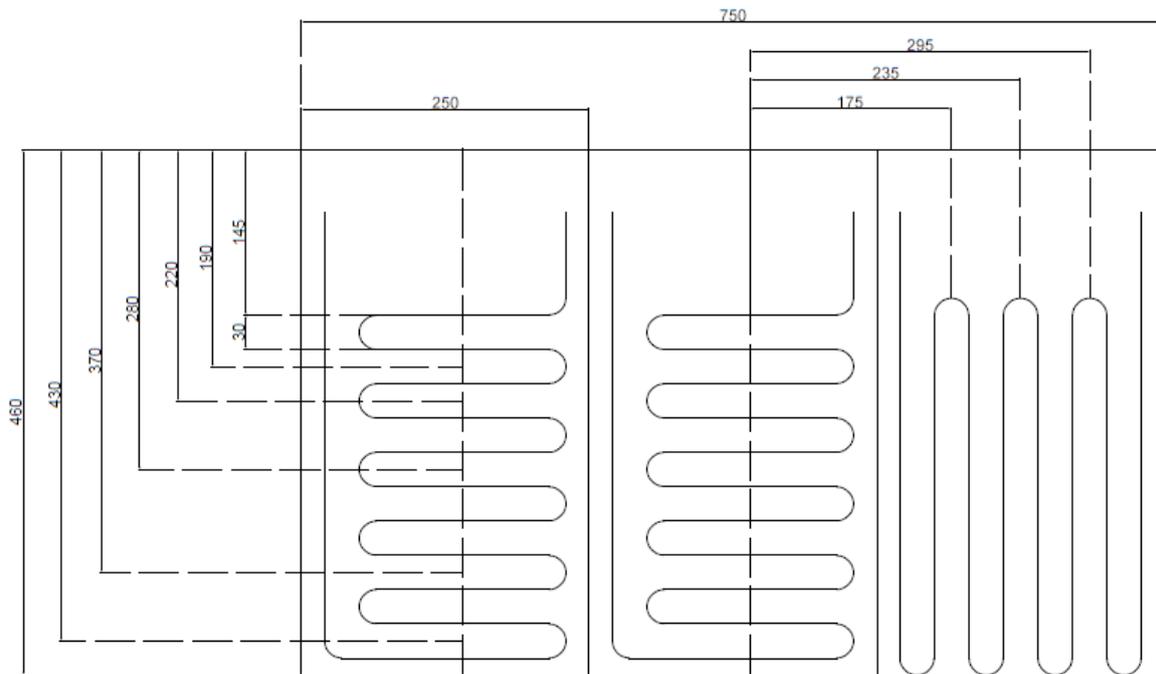


Figura 34 - Geometria quotata (cm) delle sonde geotermiche

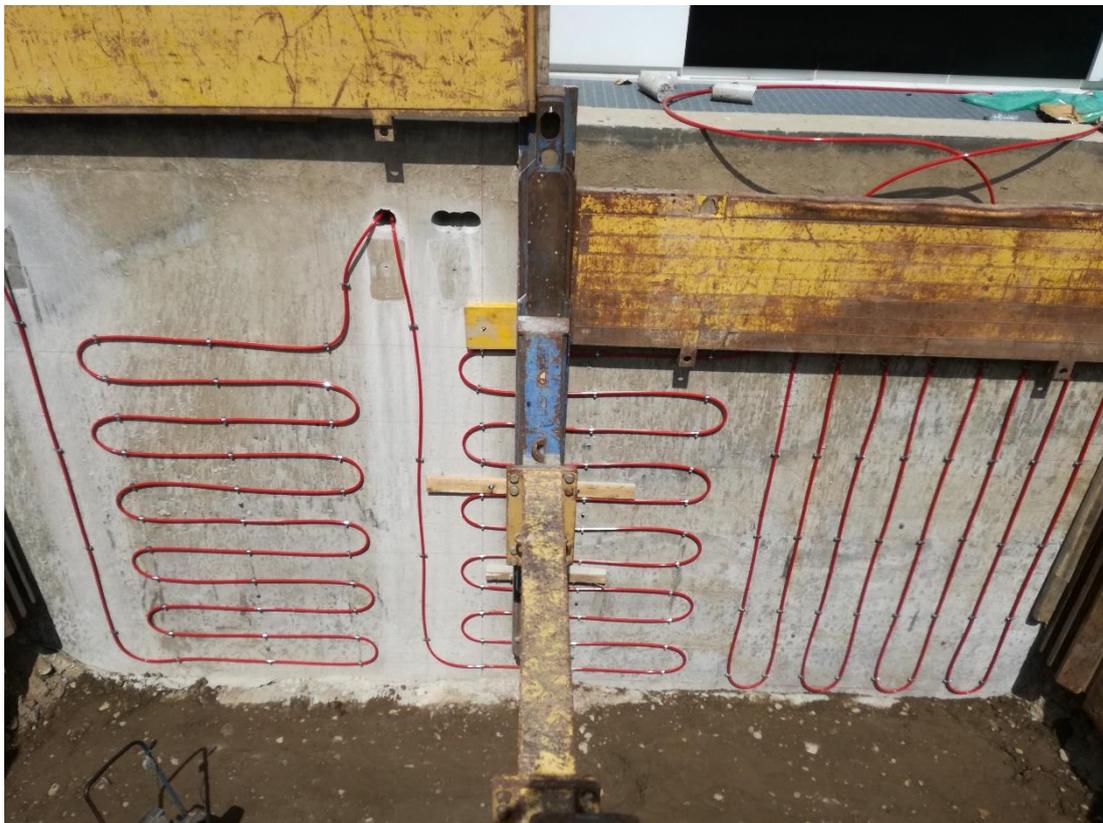


Figura 35 - Posizionamento sonde geotermiche

In seguito al posizionamento delle sonde geotermiche sul muro (Figura 35), si è proceduto con la posa della sensoristica (sensore di temperatura, barretta estensimetrica, cella di pressione, sentek drill & drop probe, misuratore di potenziale idrico) collegata ad un'unità di acquisizione con sistema di trasferimento GPRS (General Packet Radio Service). La suddetta posa avviene in diverse fasi di reinterro, ed ha lo scopo di monitorare la temperatura e l'umidità del terreno posto di fronte alle sonde geotermiche, una volta che saranno attive. Nella Figura 36 sono evidenziati i 4 livelli di profondità A, B, C, D, sui quali è avvenuta la posa dei suddetti sensori.

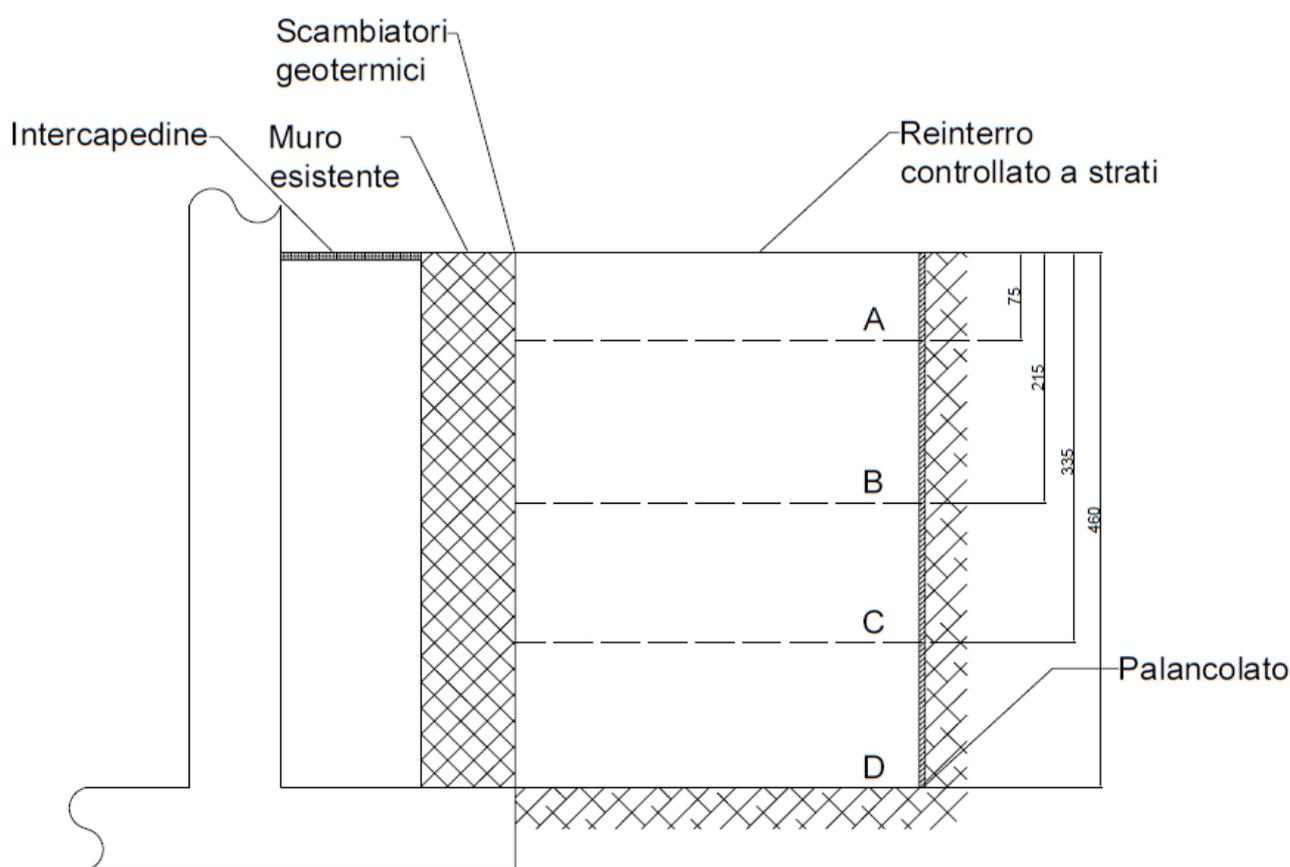


Figura 36 - Modello laterale

### 3.1.1 Descrizione della sensoristica installata

Di seguito sono riportate le caratteristiche della sensoristica Winet. Winet Srl è una giovane azienda che si occupa di progettazione e realizzazione di reti di sensori: l'obiettivo è quello di rilevare una svariata tipologia di grandezze fisiche

(temperatura, umidità, pressione,...), elaborare i dati ed inviarli ad un server tramite connessione GPRS. Ciò permette di monitorare costantemente lo stato del terreno frontale all'impianto geotermico.

I sensori installati comprendono:

- Sensore di temperatura immergibile (Figura37): viene utilizzato immerso in acqua o nel terreno oppure affogato nel calcestruzzo per controllare fenomeni con forti escursioni termiche, quali ad esempio il ciclo giorno/notte su strutture, o per compensare gli errori termici di alcuni strumenti. L'elemento sensibile (termoresistenza al platino) è protetto da un contenitore in acciaio inox IP68. Lo strumento si presenta come un cilindretto di acciaio inox al cui interno si trova il sensore annegato e sigillato mediante resine termoconduttive. Il campo di misura va da  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$  con un'accuratezza  $<0,1^{\circ}\text{C}$  e risoluzione pari a  $0,01^{\circ}\text{C}$ , inoltre l'altezza del cilindretto in acciaio è pari a 8,7 cm.



*Figura 37 – Sensore di temperatura immergibile*

La posa dei sensori di temperatura nei diversi livelli di profondità avviene a determinate distanze dal muro dopo aver effettuato una prima fase di reinterro col materiale di scavo e in seguito uno strato di 15 cm di sabbia dentro cui immergere il sensore.

- Barretta estensimetrica resistiva (Figura 38): utilizzata per misurare gli stati tensionali esistenti in strutture portanti o per monitorare le tensioni esistenti nelle centine, durante le fasi di scavo delle gallerie. Tale controllo si rende necessario per la verifica delle tensioni e delle deformazioni delle opere di sostegno sia provvisorie che permanenti. I sensori estensimetrici sono installati al centro della barretta secondo una particolare disposizione che consente la compensazione del segnale elettrico dagli effetti termici e di flessione. La barretta estensimetrica può lavorare indifferentemente sia a trazione che a compressione, inoltre la parte sensibilizzata è resinata al fine di preservare la funzionalità dello strumento in caso di urti od immersione.



*Figura 38 – Barretta estensimetrica resistiva*

La lettura dei dati può avvenire mediante l'utilizzo della centralina portatile o tramite un sistema automatico di acquisizione dati, progettato per realizzare il monitoraggio in continuo. La barretta è a tenuta stagna, può essere applicata esternamente a strutture sollecitate oppure annegata in

getti di calcestruzzo per le misure delle sollecitazioni. Realizzata in lega di alluminio, essa presenta un'accuratezza di  $\pm 0.2\%$  FS e una risoluzione di 1 mV/V ed è caratterizzata da una lunghezza di 15 cm e un diametro pari a 2,5 cm. La posa delle barrette estensimetriche avviene nei diversi livelli di profondità attraverso fissaggio al muro come mostrato in Figura 38.

- Cella di pressione (Figura 39): utilizzata per il controllo delle pressioni agenti al contatto tra una opera di sostegno (ad esempio una centinatura in galleria) e un terreno spingente. La cella è costituita da un polmone d'acciaio di forma rettangolare riempito da un olio speciale e collegato ad un trasduttore elettrico che trasforma ogni variazione di pressione agente sul polmone in una variazione di segnale elettrico con uscita standard 4÷20 mA. Progettata in più versioni che la rendono altamente versatile e adatta ad ogni esigenza di montaggio, viene fornita in diverse forme:
  1. senza tubo idraulico e con trasduttore montato direttamente sulla cella orizzontalmente o verticalmente;
  2. con tubo idraulico per la messa in carica e con trasduttore montato direttamente sulla cella o sul tubo.

In particolare, il secondo tipo di cella, presenta la caratteristica di essere ripressurizzabile tramite una valvola di ricarica installata sull'estremità del tubo idraulico in rilsan, la cui lunghezza standard è di 1,5 metri. La ripressurizzazione di una cella di pressione si rende necessaria, ad esempio, quando il polmone viene annegato nel cls del rivestimento definitivo di una galleria il quale, in fase di consolidamento, subisce una contrazione che può determinare un difetto di contatto tra la superficie del polmone ed il cls. Mediante un'operazione di ripressurizzazione, è possibile garantire il normale funzionamento dello strumento, ripristinando l'aderenza del polmone al cls su tutta la superficie. La lettura dei dati del trasduttore elettrico di pressione può avvenire mediante l'utilizzo di una centralina portatile o tramite un sistema automatico di acquisizione dati progettato per realizzare il monitoraggio in continuo. Le dimensioni del modello quadrato sono 200x200 mm, il campo di misura è di 10-60 bar (altri a richiesta) con

un'accuratezza totale < 0.5% F.S.



*Figura 39 – Cella di pressione*

Esistono due diverse modalità di installazione:

1. Orizzontale (Figura 40): quando il terreno che deve essere investigato non è uniforme, prima dell'installazione della cella di pressione bisogna preparare uno strato di sabbia di circa 10 cm, compattato e, dopo il posizionamento del piatto di misura, un successivo strato di sabbia.

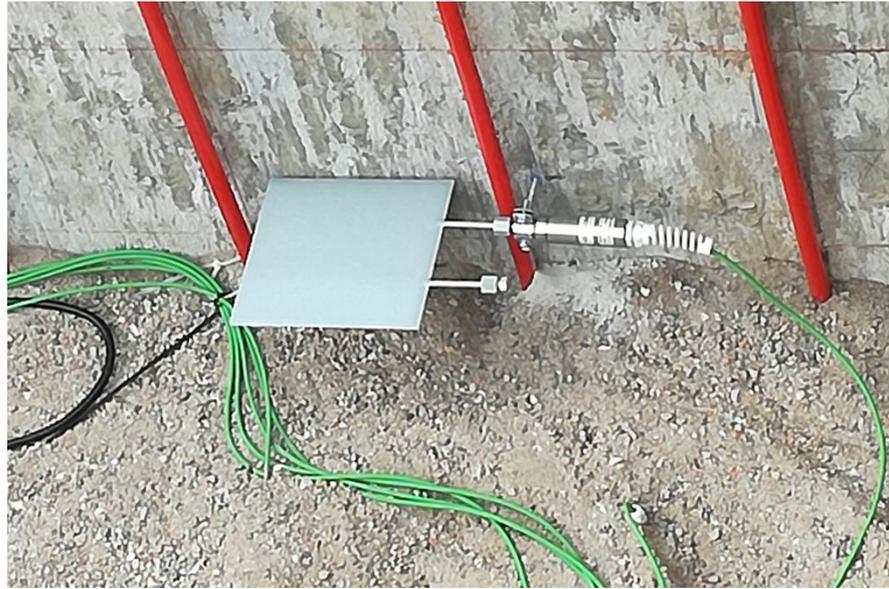


Figura 40 - Installazione orizzontale di una cella di pressione

2. Verticale (Figura 41): l'aspetto più rilevante in questa tipologia di installazione di celle di pressione totale consiste nel posizionare il piatto di misura in modo perfettamente aderente con la superficie a contatto. Questo accorgimento previene fenomeni di *arcining* (effetto arco), che possono inficiare le misure.

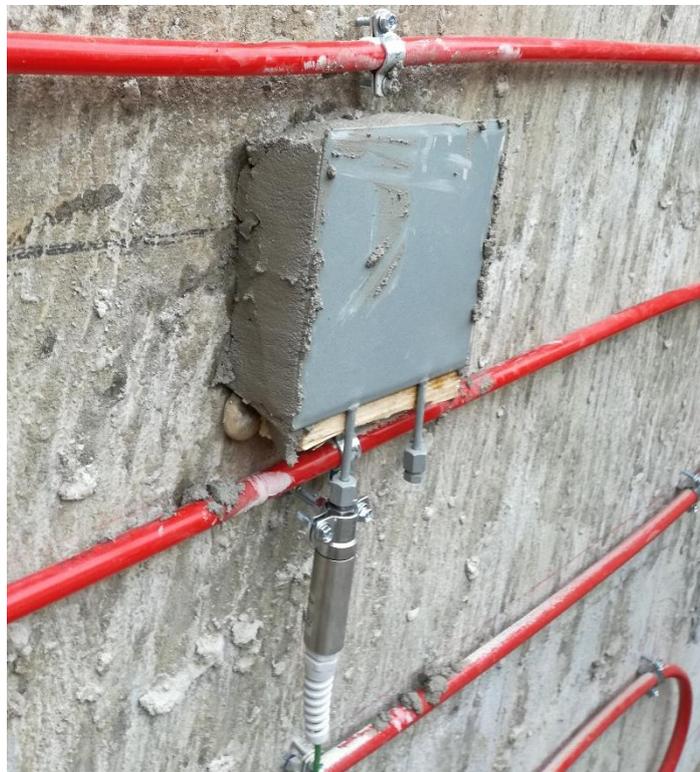


Figura 41 - Installazione verticale di una cella di pressione

- Sentek Drill & Drop Probe (Figura 42): basato su una tecnologia capacitativa (FDR, Riflettometria nel Dominio delle Frequenze) il sensore di umidità della Sentek fornisce misure estremamente accurate del contenuto di umidità del volume di suolo immediatamente prossimo. L'accuratezza può essere ulteriormente incrementata con calibrazioni specifiche per il tipo di suolo in cui la sonda viene installata. I sensori EnviroSCAN possono essere installati lungo tutta l'area di interesse, a 10 cm di distanza l'uno dall'altro. Per applicazioni particolari possono essere raggiunte anche profondità elevate. Analogamente all'EnviroSCAN per principio di misura e relazioni con il terreno circostante, il sensore TriSCAN aggiunge tuttavia la misura della salinità oltre che dell'umidità del suolo. Il risultato è ottenuto grazie ad un brevetto esclusivo della Sentek, che consente all'elettronica di distinguere il contenuto volumetrico di ioni presenti rispetto al contenuto volumetrico d'acqua. Per motivi inerenti alla tecnica di misura, non se ne raccomanda l'uso in terreni argillosi.



*Figura 42 – Sentek Drill & Drop Probe*

- Misuratore di potenziale idrico TEROS 21 (Figura 43): misura la permittività dielettrica di una matrice solida in ceramica per determinarne il contenuto d'acqua. La relazione tra contenuto d'acqua e potenziale della matrice, nota come curva caratteristica dell'umidità del suolo, viene utilizzata per calcolare il potenziale matrico del suolo. Questo approccio di misurazione, insieme al processo di calibrazione utilizzato nella produzione, consente misurazioni accurate del potenziale idrico. Il sensore TEROS 21 misura il potenziale idrico e la temperatura del suolo con dischi ceramici porosi: si rilevano le variazioni del contenuto di umidità di due dischi in ceramica inseriti tra schermi in acciaio inossidabile e il circuito stampato. La ceramica utilizzata ha un'ampia distribuzione delle dimensioni dei pori ed è coerente tra i dischi, dando ad ogni disco la stessa curva caratteristica dell'umidità. Pertanto, il potenziale idrico può essere dedotto dal contenuto d'acqua usando la curva caratteristica dell'umidità della ceramica. Questi sensori hanno un basso consumo energetico, che li rende ideali per la sepoltura permanente nel terreno e la lettura continua con un registratore di dati o una lettura periodica con un lettore portatile.

Tutte le tecniche di misurazione del potenziale idrico del suolo misurano l'energia potenziale dell'acqua in equilibrio con l'acqua nel suolo. La seconda legge della termodinamica afferma che i sistemi collegati con livelli di energia diversi si spostano verso un livello di energia di equilibrio. Quando un oggetto entra in contatto idraulico con il suolo, il potenziale idrico dell'oggetto entra in equilibrio con il potenziale idrico del suolo.

Poiché i due sono in equilibrio, la misurazione del potenziale idrico della matrice solida fornisce il potenziale idrico del suolo.

La permittività dielettrica di aria, ceramica solida e acqua sono rispettivamente 1, 5 e 80 C/Nm<sup>2</sup>. Pertanto, la permittività dielettrica dei dischi ceramici porosi dipende fortemente dalla quantità di acqua presente nei pori dei pori. TEROS 21 è calibrato a uno stato saturo (0 kPa), a uno stato secco-secco (-100.000 kPa) e in tre punti di calibrazione tra 0 e -100 kPa, con una precisione di  $\pm$  (10% della lettura + 2 kPa ) nell'intervallo da -9 a -100 kPa.



Figura 43 - Misuratore di potenziale idrico TEROS 21

- Unità di acquisizione con sistema di trasferimento GPRS (Figura 44): la peculiarità di questo sistema è quella di rilevare i dati provenienti dai sensori e di essere in grado autonomamente di trasmetterli ad un server attraverso un modem GPRS integrato ed una connessione dati. Il server riceve i dati e provvede ad archivarli, ad elaborarli ed a renderli disponibili in un'apposita area riservata e protetta alla quale l'utente può accedere con userid e password. L'accesso al sistema avviene con un normale browser internet e non comporta alcuna installazione presso il Cliente.

Sono disponibili direttamente sul portale WEB le seguenti funzioni:

1. Lettura delle variabili richieste;
2. Andamento grafico delle misure;
3. Esportazione dei dati in vari formati;
4. Gestione degli allarmi;
5. Memorizzazione eventi di allarme.

In Figura 44 si può osservare l'organizzazione dell'unità di acquisizione, con la presenza anche di una batteria ausiliaria.

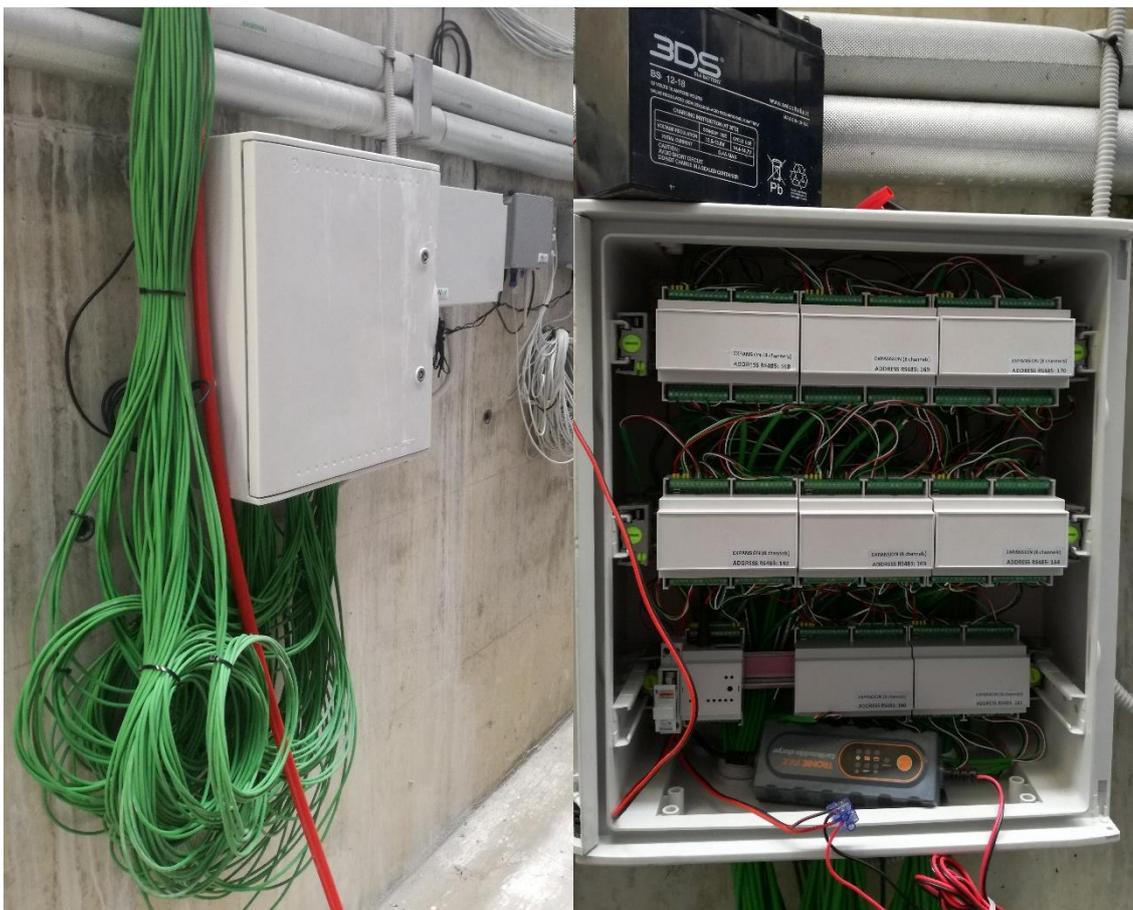


Figura 44 - Unità di acquisizione con sistema di trasferimento GPRS

### 3.2 Prove sperimentali di raffrescamento

Le prove sperimentali di raffrescamento condotte, sono state rese possibili per mezzo della pompa di calore geotermica, le cui componenti essenziali sono riportate nel Paragrafo 2.6.1.

Questo tipo di raffrescamento sfrutta le minori temperature della fonte di calore, ovvero il terreno situato a contatto con le sonde geotermiche, rispetto a quelle dell'aria esterna, che risentono maggiormente delle variazioni stagionali.

In modalità riscaldamento il fluido di circolazione scende attraverso la sonda di mandata ad una temperatura inferiore a quella del terreno e risale ad una

temperatura superiore, dopo avere “estratto” calore dal terreno per conduzione ([www.associazionefulviociancabilla.org](http://www.associazionefulviociancabilla.org)).

Invece, nella modalità raffreddamento il ciclo è invertito e l’acqua che circola nelle sonde geotermiche si raffredda per effetto della temperatura minore del terreno (Figura 45).

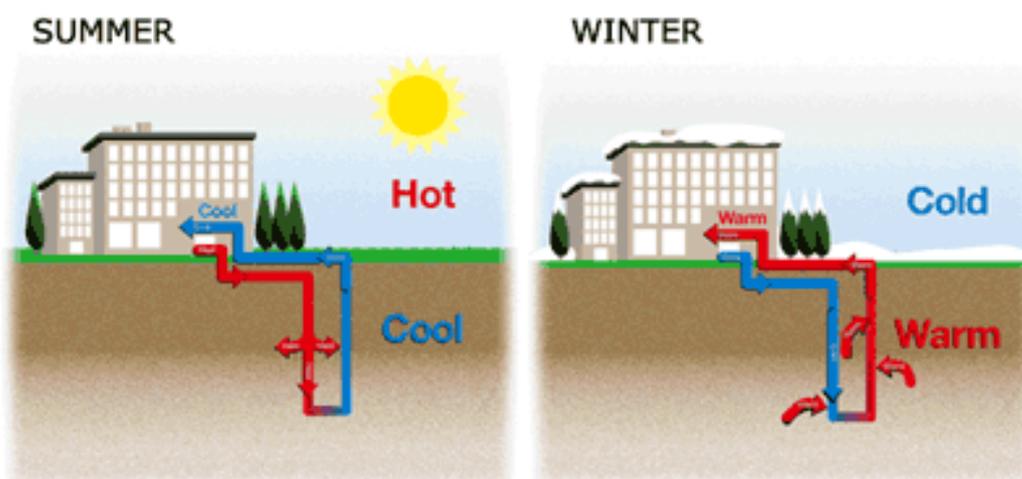


Figura 45 – Modalità di raffreddamento in estate e di riscaldamento in inverno ([www.consulente-energia.com](http://www.consulente-energia.com))

In Figura 46 è riportato il ciclo frigorifero della pompa di calore geotermica che permette il raffreddamento.

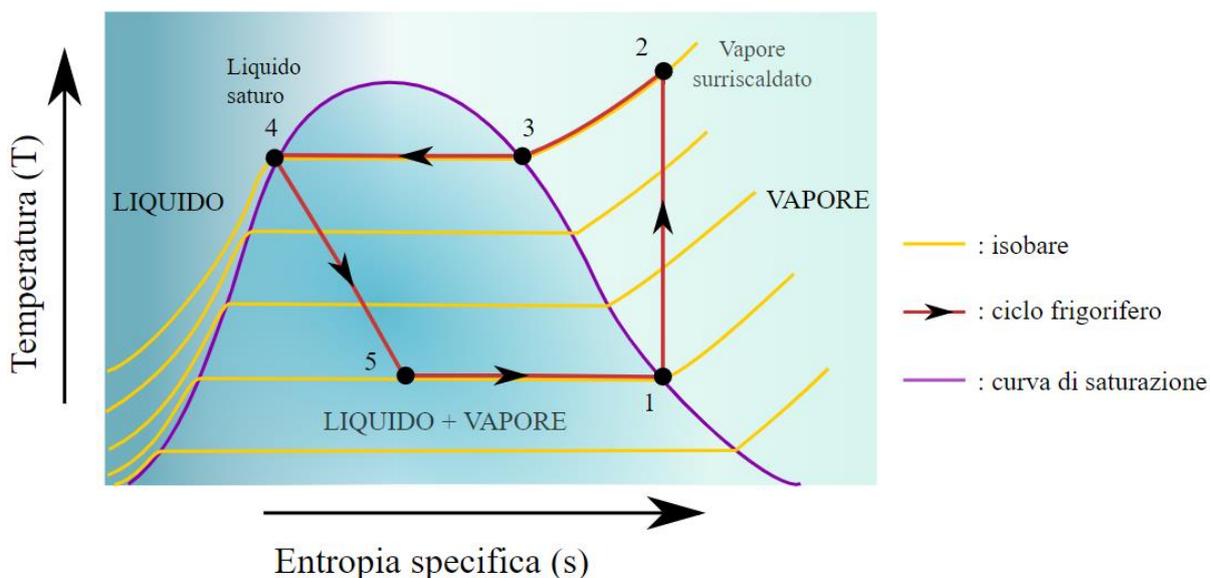


Figura 46 – Ciclo frigorifero (Daniele Pugliesi)

Il ciclo frigorifero si compie nella seguente serie di fasi ([www.edutecnica.it](http://www.edutecnica.it)):

- 1-2 Compressione: il vapore saturo a bassa pressione entra nel compressore subendo una compressione adiabatica reversibile (compressione isoentropica). In seguito alla diminuzione di volume, il vapore diventa liquido e aumenta la sua temperatura.
- 2-4 Condensazione: il calore viene ceduto all'ambiente in un processo a pressione costante attraverso il condensatore, per cui il fluido diventa un liquido saturo.
- 4-5 Espansione: attraverso la valvola di espansione, diminuisce la pressione del fluido e la sua temperatura, conservando l'entalpia iniziale (espansione isoentalpica). Il liquido, non essendo più compresso, è tornato allo stato di vapore.
- 5-1 Evaporazione: il calore viene ricevuto dal sistema a temperatura inferiore e avviene la chiusura del ciclo.

Il nostro impianto è caratterizzato dalla pompa di calore geotermica NIBE F1155 (Figura 47). F1155 risulta dotata di bollitore dell'acqua integrato, di pompe di circolazione e di un sistema di controllo.

La pompa di calore risulta collegata a un convettore, ovvero un sistema di distribuzione opzionale del calore a bassa temperatura. È predisposta anche per il collegamento a diversi prodotti e accessori, ad esempio al bollitore dell'acqua calda, al recupero della ventilazione, ad una piscina, al free cooling e a sistemi di climatizzazione con temperature diversificate. F1155 è dotato di un sistema di controllo per garantire un comfort adeguato e un funzionamento sicuro. Informazioni chiare su stato, tempo di funzionamento e tutte le temperature nella pompa di calore sono mostrate sul display ampio e di facile lettura. Il principale punto di forza di F1155 è il compressore controllato mediante inverter che si adatta automaticamente in modo ottimale ed economico all'edificio fornendo all'impianto energia rinnovabile.

Inoltre, è possibile effettuare una programmazione del comfort interno e dell'acqua calda per ciascun giorno della settimana o per periodi prolungati.



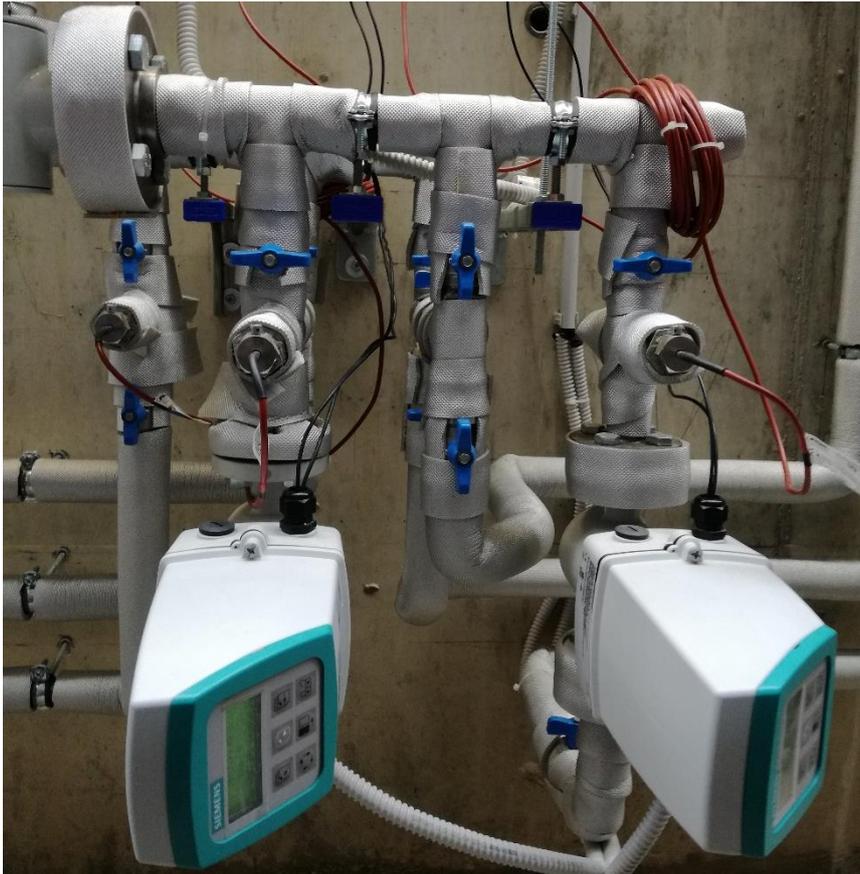
*Figura 47 – Pompa di calore geotermica NIBE F1155*

Sul lato interno del muro di posizionamento delle sonde geotermiche, invece, sono stati installati i contacalorie SITRANS FUE950 (SIEMENS) (Figura 48), ovvero dei sensori di temperatura che forniscono i valori di temperatura del fluido di mandata nelle sonde e di ritorno (campo di misura: portata  $Q_p \leq 360000 \text{ m}^3/\text{h}$ , potenza  $P \leq 15000000 \text{ kW}$ ).



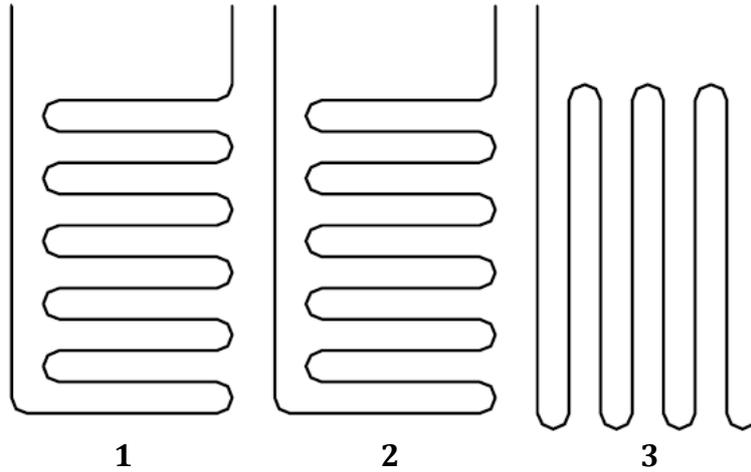
*Figura 48 - Contacalorie SITRANS FUE950*

Inoltre, sono stati installati i flussimetri SITRANS F M MAG (SIEMENS), che permettono di rilevare i valori di portata del fluido circolante (Figura 49). Essi sono trasmettitori basati su microprocessore, risultano altamente performanti e garantiscono una semplice installazione nonché una messa in servizio e una manutenzione senza problemi. I trasmettitori dispongono di una precisione di misura (incl. sensore) di  $\pm 0,4\%$  della portata.



*Figura 49 – Flussimetri SITRANS F M MAG*

Facendo riferimento allo schema in Figura 50 con le denominazioni dei tre circuiti di sonde geotermiche, sono state condotte due prove sperimentali di raffreddamento: la prima utilizzando il circuito 2 e 3 collegati in serie e la seconda, con il solo circuito 3.



*Figura 50 – Schema rappresentativo dei tre circuiti di sonde geotermiche*

### **3.2.1 Prova 1: raffrescamento con circuiti 2 e 3 in serie**

La prima prova sperimentale di raffrescamento ha avuto inizio in data 16/09/2019 ed è durata 3 giorni consecutivi. Sono stati collegati i circuiti 2 e 3 in serie alla pompa di calore geotermica, impostando un intervallo di acquisizione dati pari a 30 s, al fine di ottenere informazioni dettagliate sulle variazioni di temperatura del fluido circolante. Nel grafico in Figura 51 sono riportate le temperature di mandata all'impianto di sonde geotermiche (BT2) e di ritorno del fluido riscaldante (BT3) rilevate dall'istante in cui è stata attivata la modalità operativa di raffrescamento, ovvero alle ore 10:30:45 sino alle ore 00:00:00.

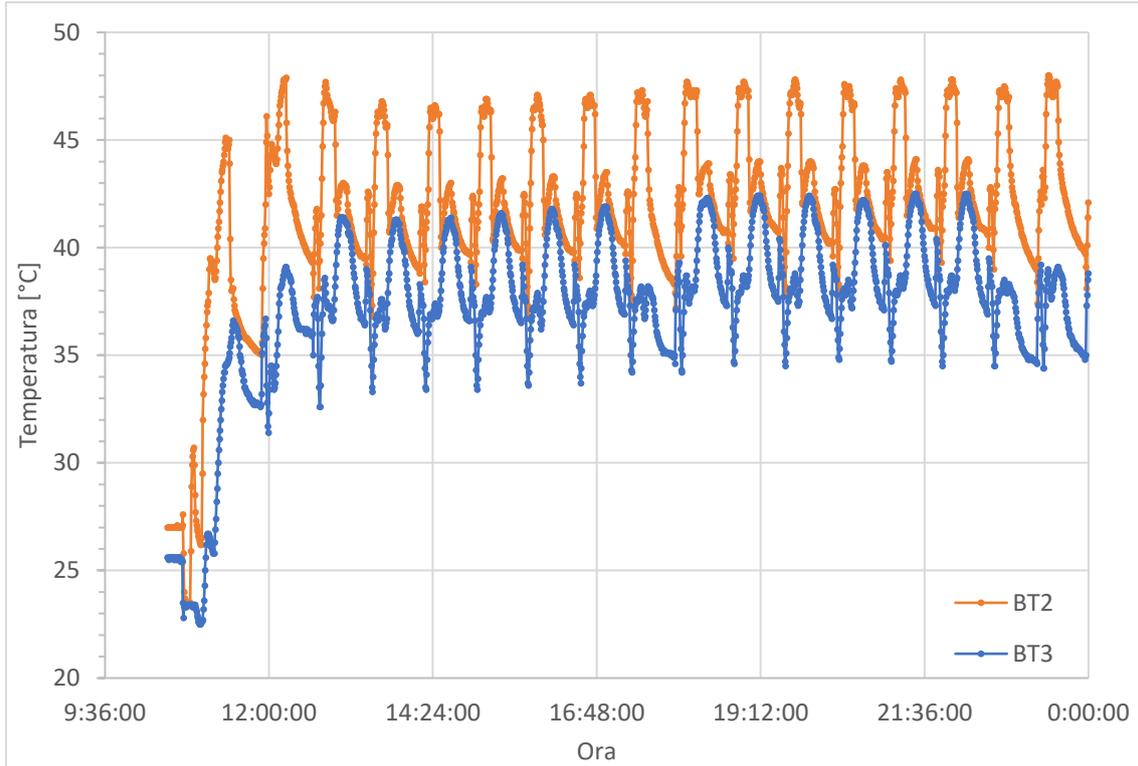


Figura 51 – Grafico BT2, BT3 Prova 1

Ciò che si evince dal grafico in Figura 51 è come, dopo il primo tratto crescente che corrisponde all'avviamento della modalità di raffreddamento, entrambe le curve tendano ad avere un andamento periodico: in particolare, risulta evidente la variazione di temperatura pressoché costante ( $\sim 5^{\circ}\text{C}$ ) tra il fluido di mandata all'impianto di sonde geotermiche BT2 e il fluido di ritorno BT3, che evidenzia l'efficacia dell'impianto geotermico, ovvero l'abbassamento delle temperature per effetto della cessione di calore al terreno con temperatura inferiore.

In data 18/9/2019, ovvero a due giorni dall'avviamento della prova, sono state cambiate le velocità della pompa lato impianto, impostando il valore della velocità di raffreddamento attivo al 100%: questa modifica ha permesso di aumentare ulteriormente i tempi di scarica. Questo passaggio è evidenziato nel grafico in Figura 52.

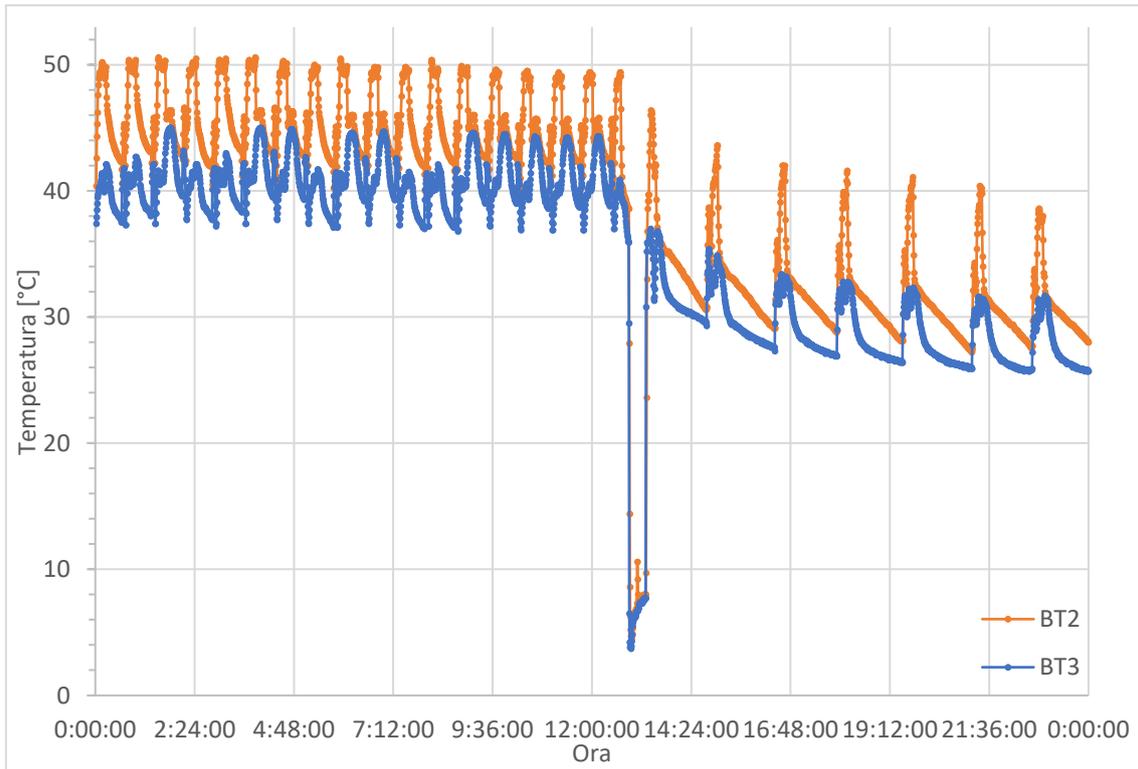


Figura 52- Grafico BT2, BT3 Prova 1

In particolare, è possibile analizzare un ciclo nel dettaglio (Figura 53): è evidente come le temperature di mandata all'impianto aumentino sino ad arrivare ad un massimo di circa 40,2 ° C in soli 15 minuti, e come, invece, è aumentata la fase di scarica, portando il tempo impiegato da un ciclo complessivo a circa 1 h e 27 min.

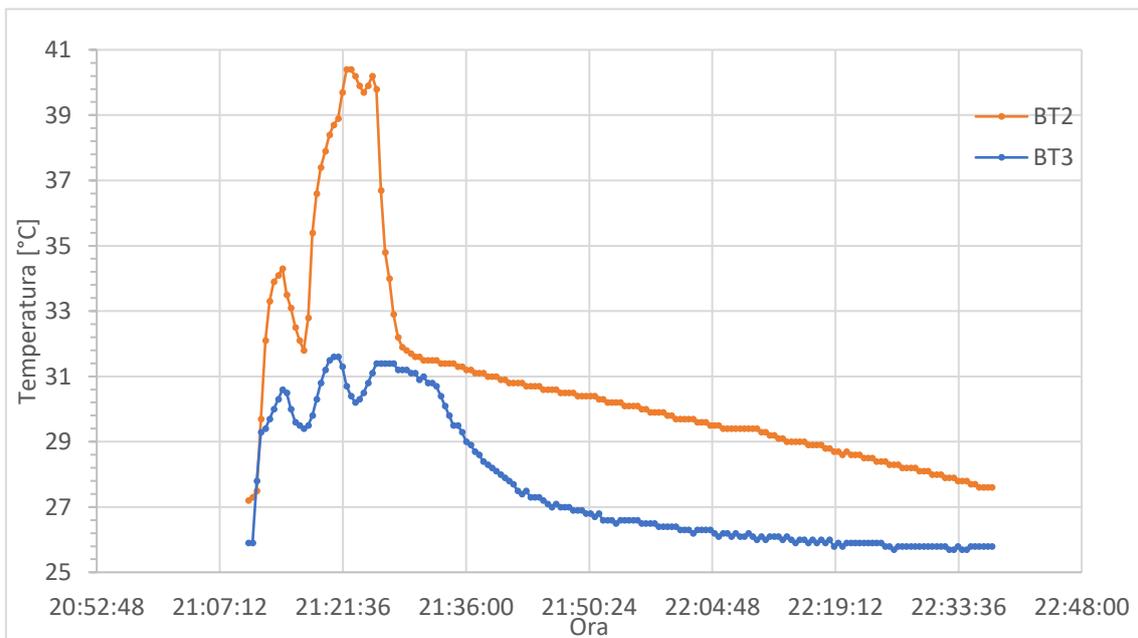


Figura 53 - Grafico ciclo BT2, BT3 Prova 1

È possibile, inoltre, analizzare più in dettaglio i dati del contacalorie, posizionato dal lato sonde, relativi a un singolo ciclo (Figura 54), dove sono evidenziate le differenze tra la temperatura di mandata (ct generale) e quella di ritorno (ht generale), rilevate rispettivamente all'ingresso e all'uscita del circuito 2+3. Dai flussimetri, invece, si rileva una portata di ~575 l/h durante la fase di incremento di temperatura e una portata nulla dove si ha un andamento decrescente della temperatura. La differenza tra i due grafici è dovuta alla rilevazione dei dati: in particolare nel grafico in Figura 53 i dati sono ricavati dalla pompa di calore, ovvero dal lato impianto; questi ultimi nel grafico in Figura 54, invece, sono ricavati dal lato sonde.

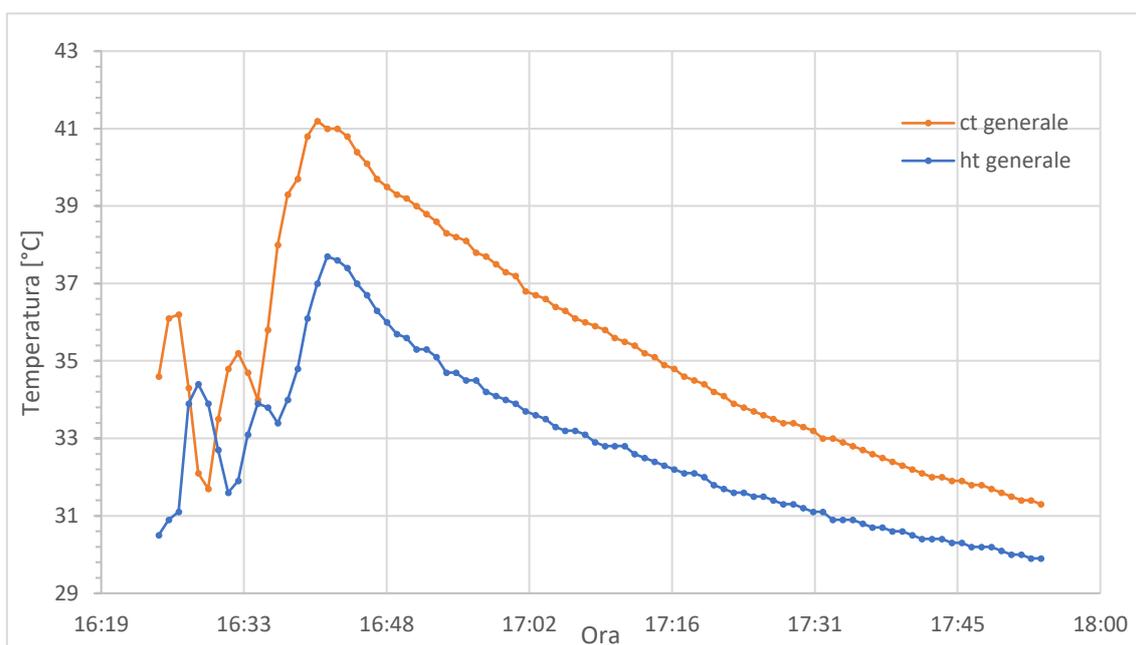


Figura 54 – Grafico ciclo ct, ht generale - ora

### 3.2.1.1 Quantificazione della potenza estraibile

La quantificazione della potenza estraibile è effettuata tenendo conto della differenza di temperatura tra il fluido in ingresso nelle sonde (BT2) e il fluido in uscita (BT3). In particolare, tenendo conto del grafico in Figura 53, si considera la fase a partire dall'istante di attivazione del ciclo, alle 21:10:31, sino al raggiungimento del valore massimo di temperatura alle 21:25:01.

È possibile, quindi, determinare la potenza estraibile  $Q$  [kW] con la seguente formula:

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

dove:

- $\dot{m}$  [kg/s] è la velocità di flusso massica;
- $c$  [kJ/kgK] è il calore specifico dell'acqua;
- $\Delta T$  [°C] è la variazione di temperatura tra fluido entrante e uscente dalle sonde geotermiche.

Quindi, all'aumentare della variazione di temperatura  $\Delta T$ , aumenta il calore scambiato, in accordo al primo principio della Termodinamica.

Tramite i dati in Tabella 2 è stato possibile ricavare il valore della potenza estraibile.

$\rho_w$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	0,997
P [l/h]	575
$\dot{m}$ [kg/s]	0,159
$c$ [kJ/kgK]	4,186

*Tabella 2 – Dati per il calcolo della potenza estraibile*

In Tabella 3 sono presenti le differenze di temperatura e il calcolo finale della potenza estraibile per ogni variazione di temperatura, determinata ogni 30 s.

Data	Ora	BT2	BT3	BT2-BT3	Q
		[°C]	[°C]	[°C]	[kW]
18/09/2019	21:10:31	27,2	25,9	1,3	0,87
18/09/2019	21:11:01	27,3	25,9	1,4	0,93
18/09/2019	21:11:31	27,5	27,8	-0,3	-0,20
18/09/2019	21:12:01	29,7	29,3	0,4	0,27
18/09/2019	21:12:31	32,1	29,4	2,7	1,80
18/09/2019	21:13:01	33,3	29,7	3,6	2,40
18/09/2019	21:13:31	33,9	30	3,9	2,60
18/09/2019	21:14:01	34,1	30,3	3,8	2,53
18/09/2019	21:14:31	34,3	30,6	3,7	2,47
18/09/2019	21:15:01	33,5	30,5	3	2,00
18/09/2019	21:15:31	33,1	30	3,1	2,07
18/09/2019	21:16:01	32,5	29,6	2,9	1,93
18/09/2019	21:16:31	32,1	29,5	2,6	1,73
18/09/2019	21:17:01	31,8	29,4	2,4	1,60
18/09/2019	21:17:31	32,8	29,5	3,3	2,20
18/09/2019	21:18:01	35,4	29,8	5,6	3,73
18/09/2019	21:18:31	36,6	30,3	6,3	4,20
18/09/2019	21:19:01	37,4	30,8	6,6	4,40
18/09/2019	21:19:31	37,9	31,2	6,7	4,47
18/09/2019	21:20:01	38,4	31,5	6,9	4,60
18/09/2019	21:20:31	38,7	31,6	7,1	4,73
18/09/2019	21:21:01	38,9	31,6	7,3	4,87
18/09/2019	21:21:31	39,7	31,3	8,4	5,60
18/09/2019	21:22:01	40,4	30,7	9,7	6,47
18/09/2019	21:22:31	40,4	30,4	10	6,67
18/09/2019	21:23:01	40,2	30,2	10	6,67
18/09/2019	21:23:31	39,9	30,3	9,6	6,40
18/09/2019	21:24:01	39,7	30,5	9,2	6,13
18/09/2019	21:24:31	39,9	30,8	9,1	6,07
18/09/2019	21:25:01	40,2	31,1	9,1	6,07

Tabella 3 – Potenza estraibile

In particolare, il valore massimo di variazione di temperatura si ha alle 21:23 e corrisponde a 10 °C, per il quale la potenza massima estraibile  $Q_{max}$  vale:

$$Q_{max} = 6,67 \text{ kW}$$

Conoscendo la potenza estraibile durante l'intero ciclo e, tenendo conto che, durante la fase di scarica la portata è nulla, e di conseguenza anche la potenza, è possibile determinare un valore di potenza medio associato al singolo ciclo.

$$Q_{media} = 0,69 \text{ kW}$$

Essendo la lunghezza complessiva del circuito 2+3 pari a 57 m, è possibile riportare il valore della potenza media in W per m lineare come segue:

$$Q'_{media} = 12,11 \text{ W/m}$$

Come visto nel Paragrafo 2.7, a seconda della geostruttura energetica è possibile estrarre una certa quantità di energia (Barla et al., 2017): in particolare, nel caso di pareti (completamente incassate nel terreno) si dovrebbero ottenere valori intorno ai 10-50 W per m<sup>2</sup> di area di contatto con la terra.

Conoscendo le dimensioni dei pannelli modulari che ospitano i circuiti di sonde geotermiche (lunghezza = 5 m; altezza = 4,60 m) si ottiene l'area di contatto  $A$ :

$$A = 23 \text{ m}^2$$

Il valore di potenza media estraibile  $Q''_{media}$  espressa in W per m<sup>2</sup> di area di contatto con la terra vale:

$$Q''_{media} = 29,99 \text{ W/m}^2$$

Si è ottenuto, quindi, un valore che rientra esattamente nell'intervallo di potenza estraibile previsto per le pareti energetiche.

Infine, considerando la durata complessiva del ciclo in Figura 53 (1 h 27 min), è possibile determinare il quantitativo di energia  $E$  [kJ].

$$E = Q_{media} \cdot t_{ciclo} = 3600,93 \text{ kJ}$$

Il valore di energia ottenuto si può riferire, come nel caso della potenza estraibile, all'area di contatto col terreno:

$$E'' = 156,56 \text{ kJ/m}^2$$

I risultati di questa prima prova sono riassunti in Tabella 4:

	<b>Prova 1</b>
$Q_{\max}$ [kW]	6,67
$Q_{\text{media}}$ [kW]	0,69
$Q'_{\text{media}}$ [W/m]	12,11
$Q''_{\text{media}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	29,99

*Tabella 4 - Risultati prova 1*

### 3.2.2 Prova 2: raffrescamento con circuito 3

La seconda prova sperimentale di raffrescamento ha avuto inizio in data 23/09/2019 ed è durata 3 giorni consecutivi. In questo caso è stato considerato il solo circuito 3. Prima di poter avviare la prova, è stato effettuato un controllo sui dati forniti dai sensori di temperatura Winet, per verificare che le condizioni di temperatura del terreno fossero idonee per effettuare la nuova prova, ovvero che il calore che il terreno aveva acquisito durante prova precedente era stato smaltito. Nei grafici in Figura 55 e in Figura 56 sono riportate le temperature relative alla catena termometrica C8 in funzione del tempo, situata nel piano B, ovvero a 215 cm di profondità dal piano campagna. In particolare, è stato considerato il sensore T1, distante 30 cm dalle sonde geotermiche, e il sensore T6, distante 280 cm.

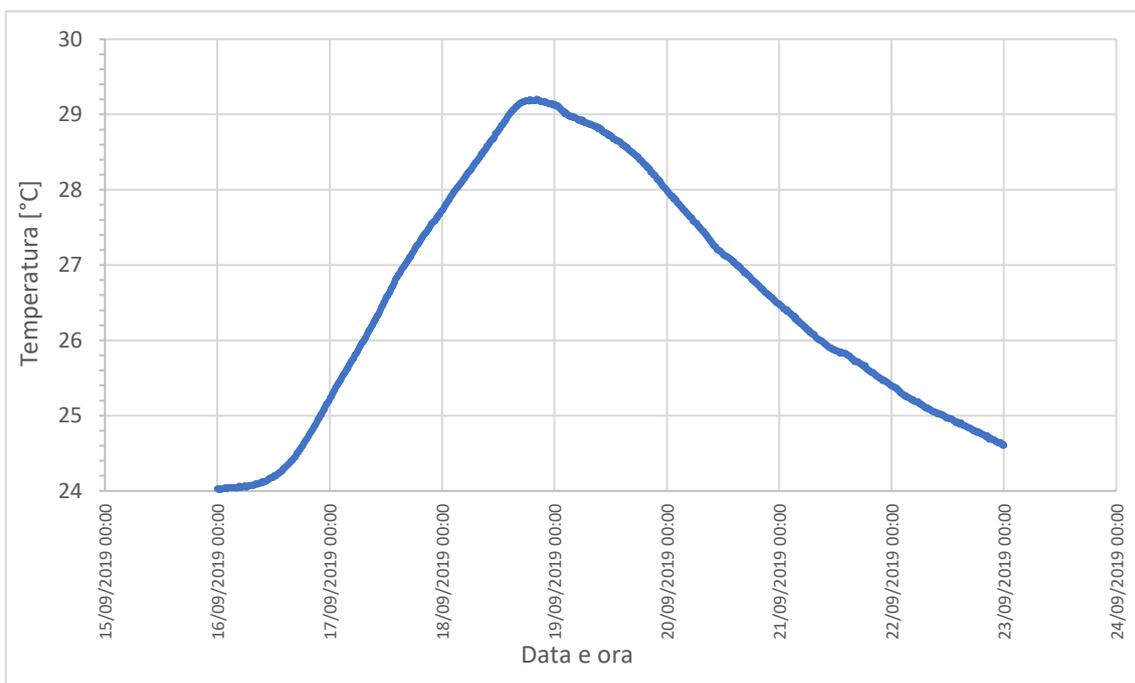


Figura 55 – C8T1 (Temperatura gestecno)

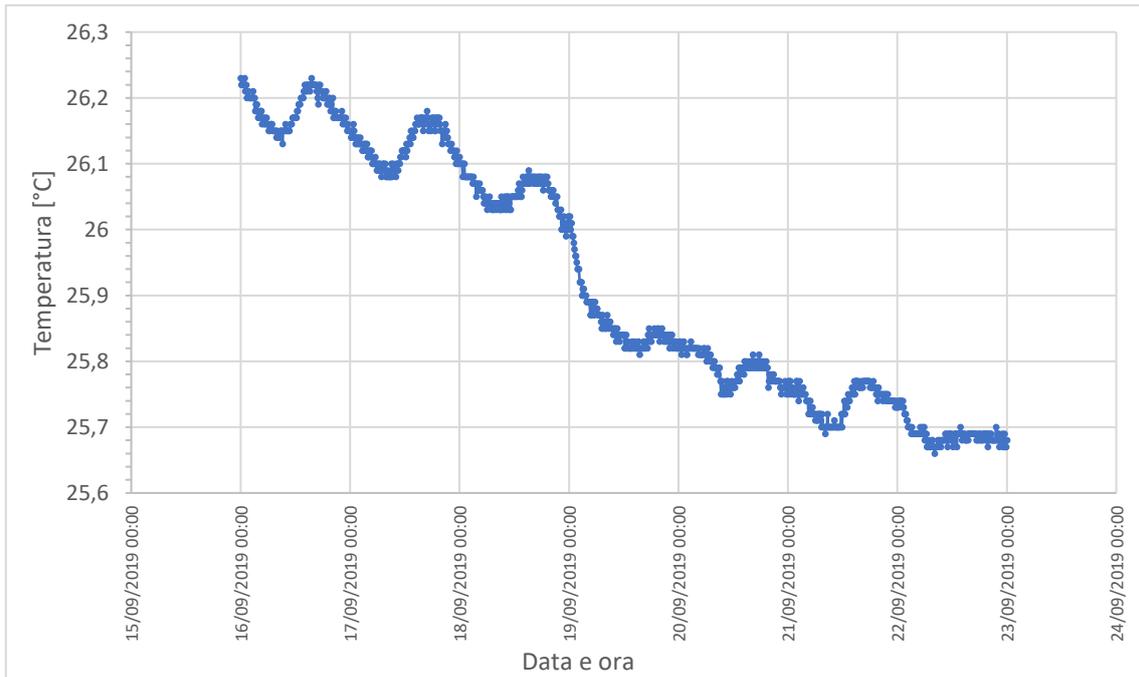


Figura 56 – C8T6 (Temperatura gestecno)

La seconda prova sperimentale di raffreddamento ha avuto inizio in data 23/09/2019 ed è durata 3 giorni consecutivi. Analogamente all'analisi dei dati della prima prova sperimentale, nel grafico in Figura 57 sono riportate le temperature BT2 (di mandata all'impianto di sonde geotermiche) e BT3 (di ritorno del fluido riscaldante) rilevate dalle ore 00:00:00 del 24/09/2019.

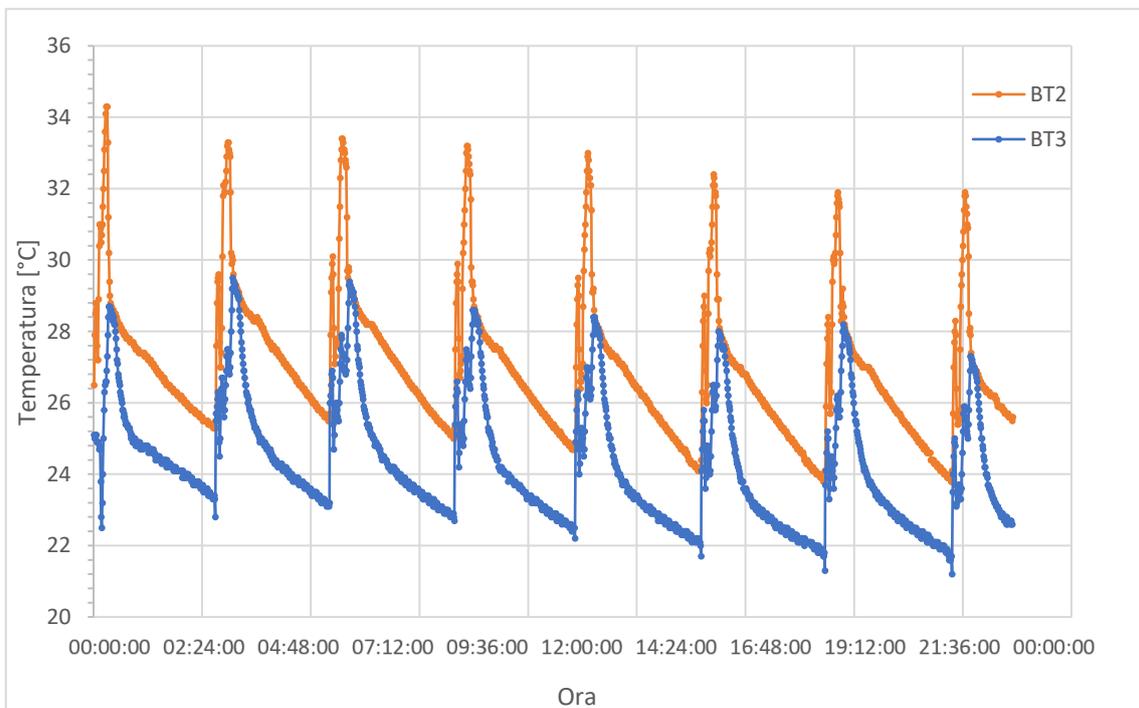


Figura 57 - Grafico BT2, BT3 Prova 2

In particolare, è possibile analizzare un ciclo nel dettaglio (Figura 58): è evidente come le temperature di mandata all'impianto aumentino sino ad arrivare ad un massimo di circa 33,3 ° C in soli 12 minuti, e come, invece, è aumentata la fase di scarica, portando il tempo impiegato da un ciclo complessivo a circa 1 h e 45 min.

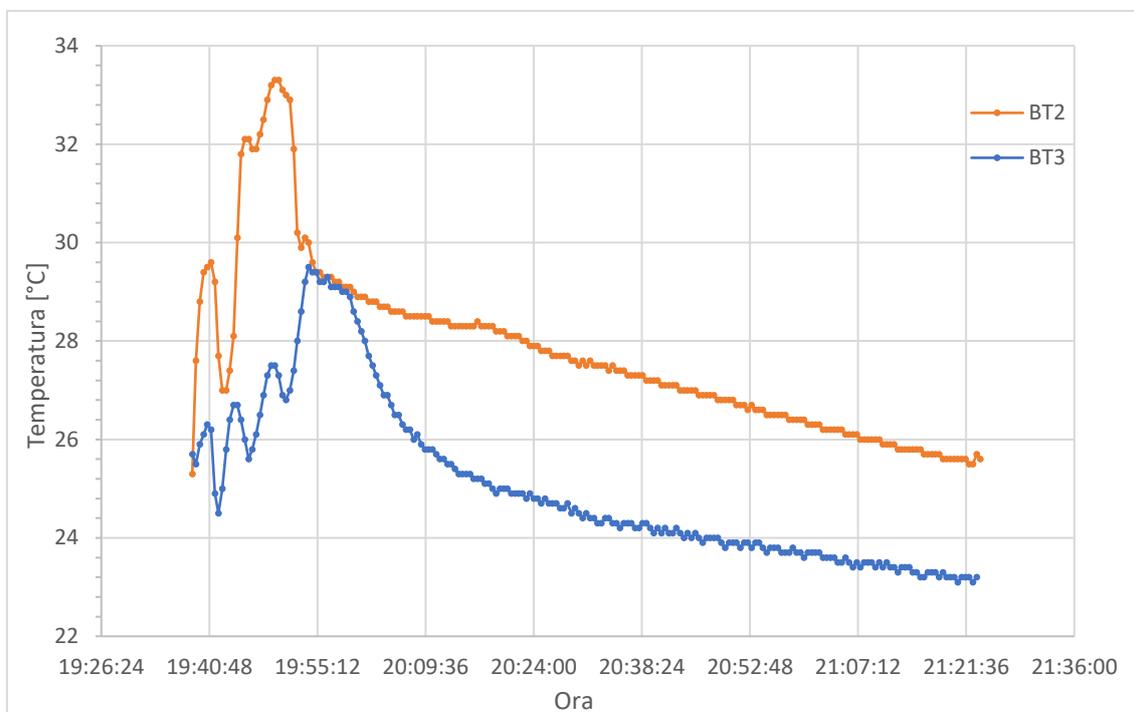


Figura 58 - Grafico ciclo BT2, BT3 prova 2

### 3.2.2.1 Quantificazione della potenza estraibile

La quantificazione della potenza estraibile è effettuata tenendo conto della differenza di temperatura tra il fluido in ingresso nelle sonde (BT2) e il fluido in uscita (BT3). In particolare, tenendo conto del grafico in Figura 58, si considera la fase a partire dall'istante di attivazione del ciclo, alle 19:38:31, sino al raggiungimento del valore massimo di temperatura alle 19:50:31.

È possibile, quindi, determinare la potenza estraibile  $Q$  [kW] tramite i dati in Tabella 5.

$\rho_w$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	0,997
P [l/h]	575
$\dot{m}$ [kg/s]	0,159
c [kJ/kgK]	4,186

Tabella 5 - Dati per il calcolo della potenza estraibile

In Tabella 6 sono presenti le differenze di temperatura e il calcolo finale della potenza estraibile per ogni variazione di temperatura, determinata ogni 30 s.

Data	Ora	BT2	BT3	BT2-BT3	Q
		[°C]	[°C]	[°C]	[kW]
24/09/2019	19:38:31	25,3	25,7	-0,4	-0,27
24/09/2019	19:39:01	27,6	25,5	2,1	1,40
24/09/2019	19:39:31	28,8	25,9	2,9	1,93
24/09/2019	19:40:01	29,4	26,1	3,3	2,20
24/09/2019	19:40:31	29,5	26,3	3,2	2,13
24/09/2019	19:41:01	29,6	26,2	3,4	2,27
24/09/2019	19:41:31	29,2	24,9	4,3	2,87
24/09/2019	19:42:01	27,7	24,5	3,2	2,13
24/09/2019	19:42:31	27,0	25,0	2	1,33
24/09/2019	19:43:01	27,0	25,8	1,2	0,80
24/09/2019	19:43:31	27,4	26,4	1	0,67
24/09/2019	19:44:01	28,1	26,7	1,4	0,93
24/09/2019	19:44:31	30,1	26,7	3,4	2,27
24/09/2019	19:45:01	31,8	26,4	5,4	3,60
24/09/2019	19:45:31	32,1	26,0	6,1	4,07
24/09/2019	19:46:01	32,1	25,6	6,5	4,33
24/09/2019	19:46:31	31,9	25,8	6,1	4,07
24/09/2019	19:47:01	31,9	26,1	5,8	3,87
24/09/2019	19:47:31	32,2	26,5	5,7	3,80
24/09/2019	19:48:01	32,5	26,9	5,6	3,73
24/09/2019	19:48:31	32,9	27,3	5,6	3,73
24/09/2019	19:49:01	33,2	27,5	5,7	3,80
24/09/2019	19:49:31	33,3	27,5	5,8	3,87
24/09/2019	19:50:01	33,3	27,3	6	4,00
24/09/2019	19:50:31	33,1	26,9	6,2	4,13
24/09/2019	19:51:01	33,0	26,8	6,2	4,13
24/09/2019	19:51:31	32,9	27,0	5,9	3,93

Tabella 6 - Potenza estraibile

In particolare, il valore massimo di variazione di temperatura si ha alle 19:46 e corrisponde a 6,5 °C, per il quale la potenza massima estraibile  $Q_{max}$  vale:

$$Q_{max} = 4,33 \text{ kW}$$

Conoscendo la potenza estraibile durante l'intero ciclo e, tenendo conto che, durante la fase di scarica la portata è nulla, e di conseguenza anche la potenza, è possibile determinare un valore di potenza medio associato al singolo ciclo.

$$Q_{media} = 0,32 \text{ kW}$$

Essendo la lunghezza complessiva del circuito 3 pari a 29,1 m, è possibile riportare il valore della potenza media in W per m lineare come segue:

$$Q'_{media} = 10,99 \text{ W/m}$$

Come visto nel Paragrafo 3.2.1.1, relativo alla prova 1, risulta di particolare interesse determinare la potenza estraibile in W per m<sup>2</sup> di area di contatto con la terra. Conoscendo le dimensioni dei pannelli modulari che ospitano i circuiti di sonde geotermiche (lunghezza = 2,5 m; altezza = 4,60 m) si ottiene l'area di contatto  $A$ :

$$A = 11,5 \text{ m}^2$$

Quest'area risulta essere esattamente la metà dell'area relativa ai circuiti 2 e 3 in serie (prova 1), in quanto comporta l'utilizzo del solo circuito 3.

Il valore di potenza media estraibile  $Q''_{media}$  espressa in W per m<sup>2</sup> di area di contatto con la terra vale:

$$Q''_{media} = 28,14 \text{ W/m}^2$$

Si è ottenuto, quindi, un valore che rientra esattamente nell'intervallo di potenza estraibile previsto per le pareti energetiche.

Infine, considerando la durata complessiva del ciclo in Figura 58 (1 h 45 min), è possibile determinare il quantitativo di energia  $E$  [kJ].

$$E = Q_{media} \cdot t_{ciclo} = 2038,10 \text{ kJ}$$

Il valore di energia ottenuto si può riferire, come nel caso della potenza estraibile, all'area di contatto col terreno:

$$E'' = 177,23 \text{ kJ/m}^2$$

I risultati di questa prima prova sono riassunti in Tabella 7:

	<b>Prova 2</b>
$Q_{max}$ [kW]	4,33
$Q_{media}$ [kW]	0,32
$Q'_{media}$ [W/m]	10,99
$Q''_{media}$ [W/m <sup>2</sup> ]	28,14

Tabella 7 - Risultati prova 2

Confrontando i risultati ottenuti dalla prima e dalla seconda prova sperimentale di raffrescamento in termini di potenza massima e media estraibile si evince come risulti più efficace utilizzare i due circuiti collegati in serie, in quanto, data la maggiore area di contatto, è favorito lo scambio di calore con il terreno a contatto col muro. Tuttavia, è anche da sottolineare un fattore che ha agito a sfavore della totale efficacia della seconda prova, ovvero la diminuzione delle temperature dell'aria nei giorni in cui è stato attivato il solo circuito 3, e, di conseguenza, della temperatura del terreno superficiale. Ciò, infatti, rappresenta sicuramente una condizione non ideale per poter effettuare una prova di raffrescamento.

Infine, avendo ottenuto valori di potenza media confrontabili, la potenza media estraibile  $Q''_{media}$  espressa in W/m<sup>2</sup> risulta leggermente superiore nella prova 1, in linea con quanto accade per la potenza  $Q_{max}$ .



## CAPITOLO 4

### Modellazione numerica

Per implementare il problema descritto precedentemente e per stabilire l'efficacia e l'efficienza del sistema geotermico è stato utilizzato il software FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system), realizzato e messo in commercio dal WASY GmbH (Institute for Water Resources Planning and Systems Research) di Berlino. FEFLOW permette la simulazione del flusso di acque sotterranee, il trasferimento di massa e il trasferimento di calore in mezzi porosi e fratturati.

Il software utilizza l'analisi agli elementi finiti per risolvere l'equazione del flusso di acque sotterranee in condizioni sia sature che insature, nonché il trasporto di massa e calore, compresi gli effetti della densità dei fluidi e la cinetica chimica per i sistemi di reazione multicomponente. L'analisi mediante i metodi numerici "agli elementi finiti" è basata sulla suddivisione del dominio di modellazione in un numero di elementi finiti non uniformemente distribuito nello spazio; ciascun elemento è correlato con i nodi ad esso associati e le caratteristiche fisiche del mezzo si suppongono costanti all'interno di ogni elemento. La possibilità, nel metodo degli elementi finiti, di poter scegliere dimensioni variabili per ogni maglia permette di ottenere simultaneamente rappresentazioni dettagliate in alcune zone del modello e rappresentazioni meno dettagliate laddove è minore l'interesse di dettaglio. A partire dalle equazioni costitutive, dalle condizioni al contorno e dalle condizioni iniziali, vengono generate mediante approssimazione delle equazioni algebriche che vengono risolte per ogni nodo della griglia. I metodi numerici permettono il

calcolo del parametro di interesse in corrispondenza dei nodi della griglia di discretizzazione; all'interno di ogni elemento la variazione spaziale della variabile dipendente di interesse viene approssimata con una funzione di interpolazione definita rispetto ai valori nodali associati all'elemento finito stesso. All'aumentare della densità della griglia aumenta la precisione numerica ma aumenta anche lo sforzo di calcolo richiesto al computer; possono inoltre insorgere problemi nella risoluzione delle equazioni se la griglia contiene tanti elementi dalla forma molto distorta.

### 4.1 Problema Termo-Idraulico accoppiato

L'insieme delle equazioni differenziali che definiscono un problema termo-idro-meccanico non può essere facilmente risolto attraverso soluzioni analitiche. Si possono trovare soluzioni approssimate utilizzando metodi numerici.

Nel problema THM (Thermo-Hydro-Mechanical) devono essere definite le leggi di compatibilità, le leggi di equilibrio e le leggi costitutive per l'analisi meccanica.

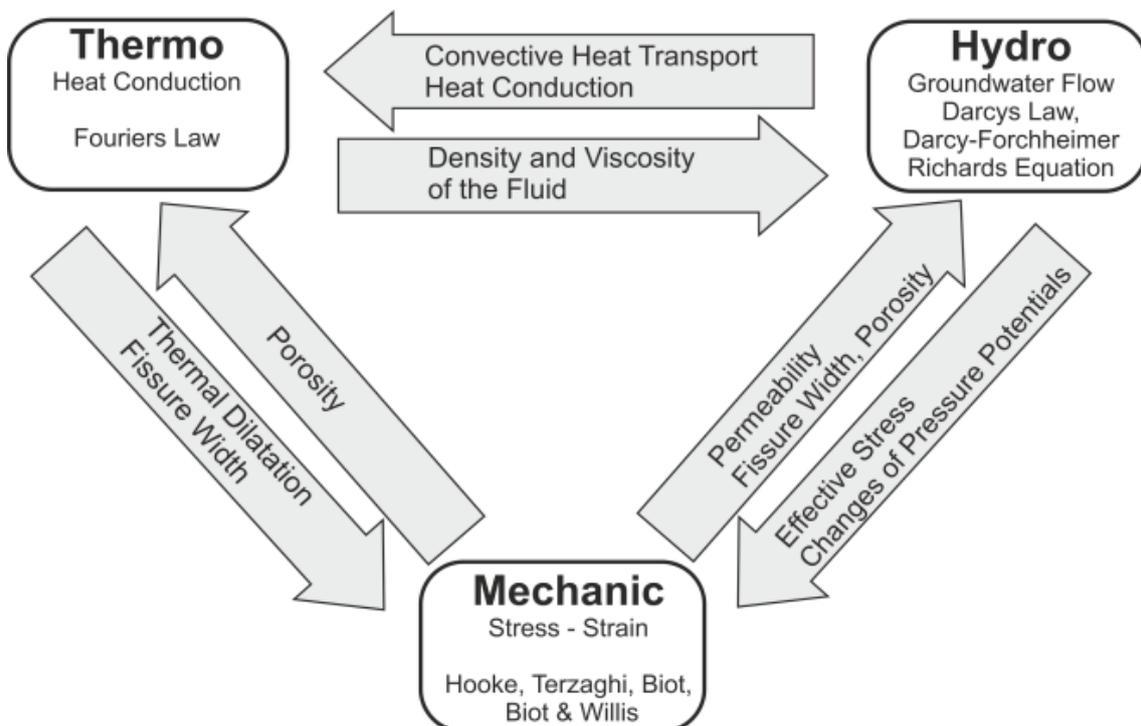


Figura 59 – Thermo-Hydro-Mechanical coupling approach (Wolfram Rühaak & Ingo Sass, 2013)

Come si osserva dallo schema del problema THM in Figura 59, il trasferimento di calore è controllato dalle equazioni di conservazione dell'energia ed il processo idraulico nei mezzi porosi è governato dalle equazioni della conservazione della massa e dalla velocità di Darcy. Bisogna definire diverse proprietà e parametri per caratterizzare i materiali coinvolti oltre alle equazioni suddette. Attraverso l'analisi accoppiata termoidraulica (TH), si unisce lo studio dei flussi idraulici con quello dei flussi di calore. Le equazioni che governano il problema TH risultano essere le seguenti:

1. Conservazione dell'energia;
2. Conservazione della massa;
3. Legge di Darcy.

Sia  $V = V(t)$  un volume materiale di fluido, cioè un volume di fluido che contiene sempre le stesse particelle fluide. Si noti che un volume materiale di fluido in generale si muove e si deforma con il tempo e i suoi contorni sono impermeabili alla massa. Dal principio di conservazione della massa sappiamo che "la massa associata alla porzione di fluido che occupa  $V$  non cambia col moto di  $V$ , tale volume essendo un volume materiale".

Si ha quindi che:

$$\nabla \cdot v_i = -\frac{1}{dV} \cdot \frac{d(dV)}{dt}$$

dove:

- $\nabla$  è la divergenza;
- $\nabla \cdot v_i$  è la velocità di dilatazione volumetrica relativa, nel punto in esame.

Evidenziando la deformazione volumetrica e assumendo due semplificazioni importanti, ovvero l'assunzione della fase solida come incomprimibile e della densità del fluido come costante, l'equazione precedente si può riscrivere come segue:

$$\nabla \cdot v_i = -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$$

dove:

- $\varepsilon_v$  è la deformazione volumetrica.

Poiché il moto di filtrazione fra due generici punti è governato solo dalla differenza di carico, la legge di Darcy risulta utile per identificare un legame tra le caratteristiche del moto (in particolare la velocità), le proprietà del terreno e la perdita di carico. Darcy, studiando il flusso monodimensionale dell'acqua attraverso strati orizzontali di sabbia (in condizioni di moto laminare), osservò che la portata per unità di superficie è direttamente proporzionale alla perdita di carico e inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso considerato. In termini vettoriali, in condizioni di flusso bi-, e tri-dimensionali l'equazione della suddetta legge risulta essere:

$$v_i = -k_i \cdot \nabla h$$

dove:

- $k_i$  è il coefficiente di permeabilità del mezzo poroso;
- $h$  è il carico idraulico.

Sostituendo la legge di Darcy nell'equazione ricavata precedentemente si ottiene:

$$\nabla \cdot (k_i \cdot \nabla h) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$$

Come visto nel paragrafo 2.8 il trasferimento di calore può avvenire per conduzione, convezione e calore di evaporazione: l'equazione finale, tenendo conto di questi fenomeni, per il principio della conservazione dell'energia viene riscritta come:

$$\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + c_w \cdot \rho_w \cdot v_i \cdot \Delta T - c \cdot \rho \cdot v_i \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

dove:

- $c \cdot \rho$  è capacità termica del terreno; suddividendo il contributo della fase solida e della fase liquida, vale:

$$c \cdot \rho = n \cdot c_w \cdot \rho_w + (1 - n) \cdot c_s \cdot \rho_s$$

#### 4.1.1 Tipi di condizioni al contorno

L'esistenza e l'unicità della soluzione del problema differenziale termo-idraulico (TH) sono garantite da diverse condizioni al contorno (Figura 60). La scelta della condizione al contorno è fondamentale per la risoluzione del problema computazionale: una sbagliata imposizione di condizione al contorno può portare alla divergenza della soluzione o alla convergenza a una soluzione errata.

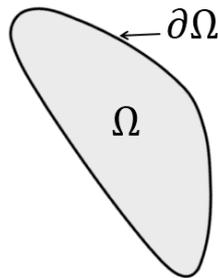


Figura 60 - Dominio di risoluzione e confine

Esistono diversi tipi di condizioni limite comunemente adoperate nella risoluzione di equazioni differenziali parziali:

1. La condizione al contorno di *Dirichlet* è un tipo di condizione al contorno che specifica il valore che la funzione sconosciuta deve assumere lungo il confine del dominio. Ad esempio:

$$\Delta \varphi(x) = 0 \quad \forall x \in \Omega$$

$$\varphi(x) = f(x) \quad \forall x \in \partial\Omega$$

dove:

- $\varphi(x)$  è la funzione sconosciuta;
- $x$  è la variabile indipendente;
- $\Omega$  è il dominio della funzione;
- $\partial\Omega$  è il contorno del dominio della funzione.

Nella meccanica dei fluidi computazionale, la classica condizione al contorno di Dirichlet consiste nel valore di velocità e/o pressione che deve essere assunto da un certo insieme di nodi.

Nelle analisi termoidrauliche questa condizione può descrivere un carico idraulico noto o una zona a temperatura nota.

2. La condizione al contorno di *Neumann* è un tipo di condizione al contorno, che, quando imposta su un'equazione differenziale ordinaria o parziale, specifica i valori che la derivata di una soluzione assumerà sul limite del dominio. Ad esempio:

$$\Delta \varphi(x) = 0 \quad \forall x \in \Omega$$

$$\frac{\partial \varphi(x)}{\partial n} = f(x) \quad \forall x \in \partial\Omega$$

dove:

- $n$  è l'unità normale alla superficie del contorno;
- $x$  è la variabile indipendente.

Nei rari casi in cui una dipendenza temporale viene risolta attraverso un approccio agli elementi finiti (invece della più comune differenza finita), questo tipo di condizione al contorno è la più comune. La condizione al contorno di Neumann è anche chiamata "naturale" perché appare naturalmente nello sviluppo della formulazione debole in qualsiasi approccio agli elementi finiti.

Nelle analisi termoidrauliche questa condizione è utilizzata per descrivere il flusso di un fluido (*fluid flux*) o il flusso di calore (*heat flux*).

3. La condizione al contorno di *Robin*, detta anche “condizione di impedenza” è un tipo di condizione al contorno che consiste in una combinazione lineare dei valori del campo e delle sue derivate sul confine. Ad esempio:

$$\Delta \varphi(x) = 0 \quad \forall x \in \Omega$$

$$a \cdot \varphi(x) + b \cdot \frac{\partial \varphi(x)}{\partial n} = f(x) \quad \forall x \in \partial\Omega$$

dove:

- $a, b$  sono parametri reali.

4. La condizione al contorno di *Cauchy* consiste nella sovrapposizione in serie dei due vincoli (1 Dirichlet *boundary condition* + 1 Neumann *boundary condition*), ovvero fornisce il valore della funzione incognita sui bordi del dominio del problema differenziale e il valore della sua derivata direzionale normale a tale superficie.

Nelle analisi termoidrauliche questa condizione è utilizzata per descrivere il trasferimento di un fluido (*fluid transfer*) o quello di calore (*heat transfer*).

## 4.2 Geometria del modello

La geometria del modello è stata creata attraverso il software di disegno AutoCAD (Figura 61) e successivamente importata attraverso il file DXF sul software FEFLOW convertendo gli elementi in punti, linee e poligoni. Questi tre elementi supportati da software numerico hanno permesso la creazione della geometria del dominio e dei sistemi di scambio termico. Le sonde geotermiche, dentro le quali circola il fluido termovettore, si trovano all'esterno della struttura realizzata, a contatto con il terreno. Le serpentine vengono posizionate in maniera modulare: i pannelli che le circoscrivono, infatti, vengono applicati lungo l'intero edificio in maniera modulare. La geometria esterna del modello 2D si presenta nella seguente maniera: i bordi della geometria 2D si trovano a una distanza di 20 cm dalle sonde geotermiche, ciò

consente di tenere in considerazione il fatto che sia a destra che a sinistra dei pannelli modulari studiati sono presenti altri moduli.

Il modello verrà sviluppato per 10 m nella direzione del terreno e di 5 m verso l'interno del fabbricato. A partire dal piano campagna il modello verrà limitato a una profondità di 15 m, dove si ritiene che la temperatura rimanga costante lungo tutto l'anno.

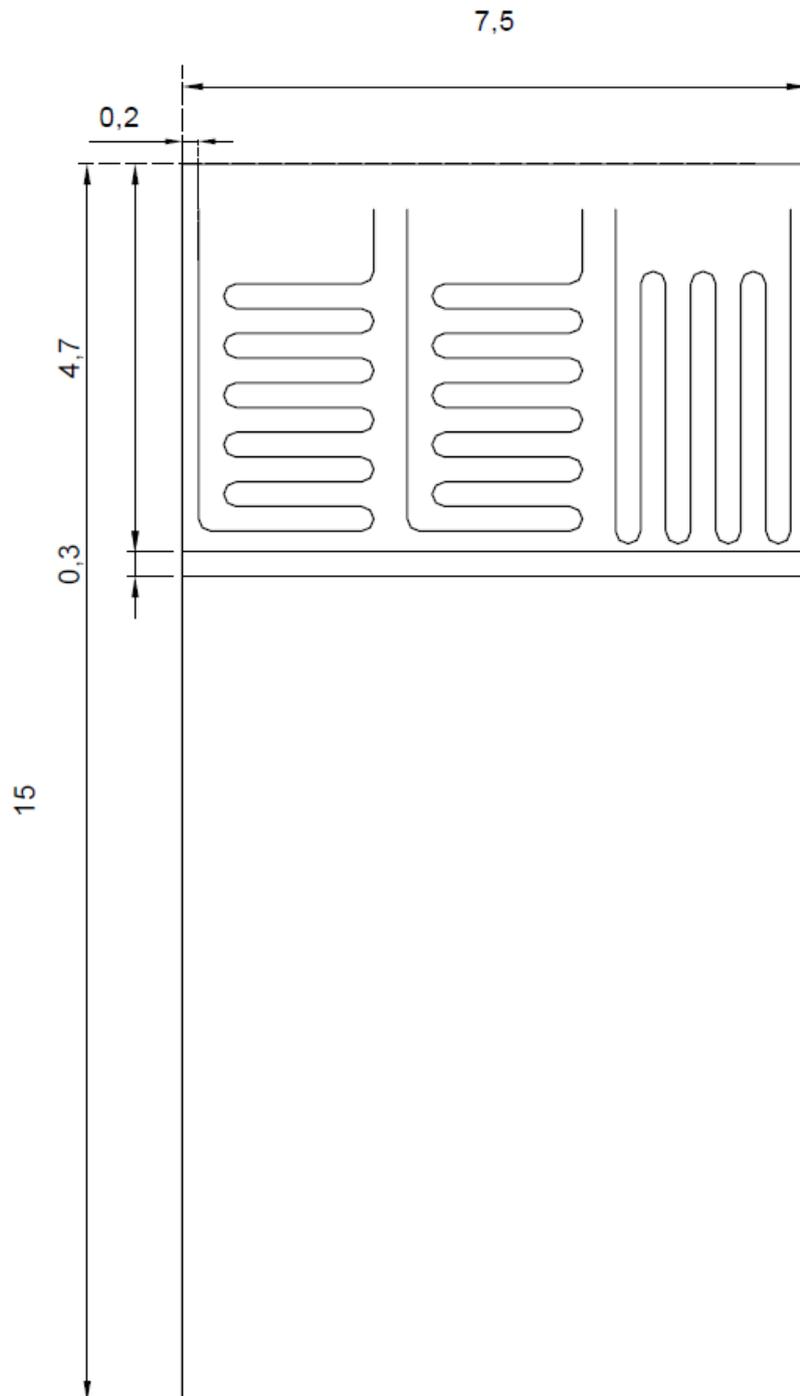


Figura 61 - Modello DXF importato su FEFLOW (quote in m) (AUTOCAD)

Una volta definite le geometrie, attraverso l'elemento "linea" sono state ricalcate le sonde geotermiche e con l'elemento "poligono" è stato definito il dominio. In particolare, le curvature delle serpentine sono state discretizzate attraverso delle polilinee, come visibile in Figura 62.

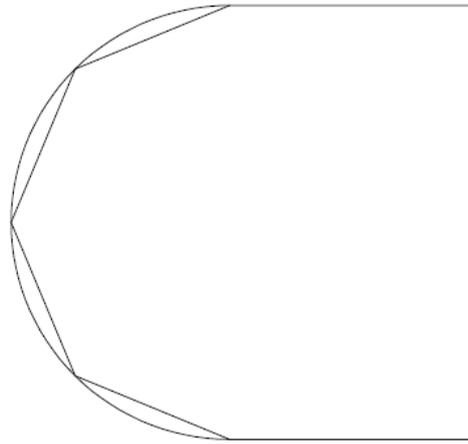


Figura 62 - Discretizzazione curvatura (AUTOCAD)

Definite le geometrie si procede alla generazione della *mesh* attraverso la quale il modello viene suddiviso in elementi finiti. La *Supermesh* del codice FEFLOW definisce i contorni del dominio di modellazione e, nel caso in esame, consiste in un unico poligono; essa determina i limiti del dominio necessari per la generazione della maglia di elementi finiti (*Finite Element Mesh*).

La generazione della mesh stessa viene eseguita utilizzando la barra degli strumenti *Mesh Generator*. Sono disponibili quattro diversi algoritmi di generazione mesh:

- *Advancing Front*;
- *Triangle*;
- *Gridbuilder*;
- *Transport Mapping (Quadrilateral Mode only)*.

La generazione della mesh si basa su un numero approssimativo di elementi da generare, per l'intera mesh o per ciascuno dei poligoni. È possibile effettuare un *mesh refinement* utilizzando alcuni degli algoritmi di generazione in delle linee selezionate o in punti specifici.

Nel caso di analisi di flussi, risulta più adeguata una mesh a elementi triangolari, una tipologia di mesh molto veloce che consente di avere geometrie complesse di poligoni, linee e punti nella *Supermesh* (Figura 63). Successivamente la maglia degli elementi discretizzati è stata infittita nelle vicinanze delle sonde geotermiche poiché sono gli elementi che vengono attraversati dal fluido termovettore e quindi di nostro interesse per osservare le variazioni di temperature (Figura 64).

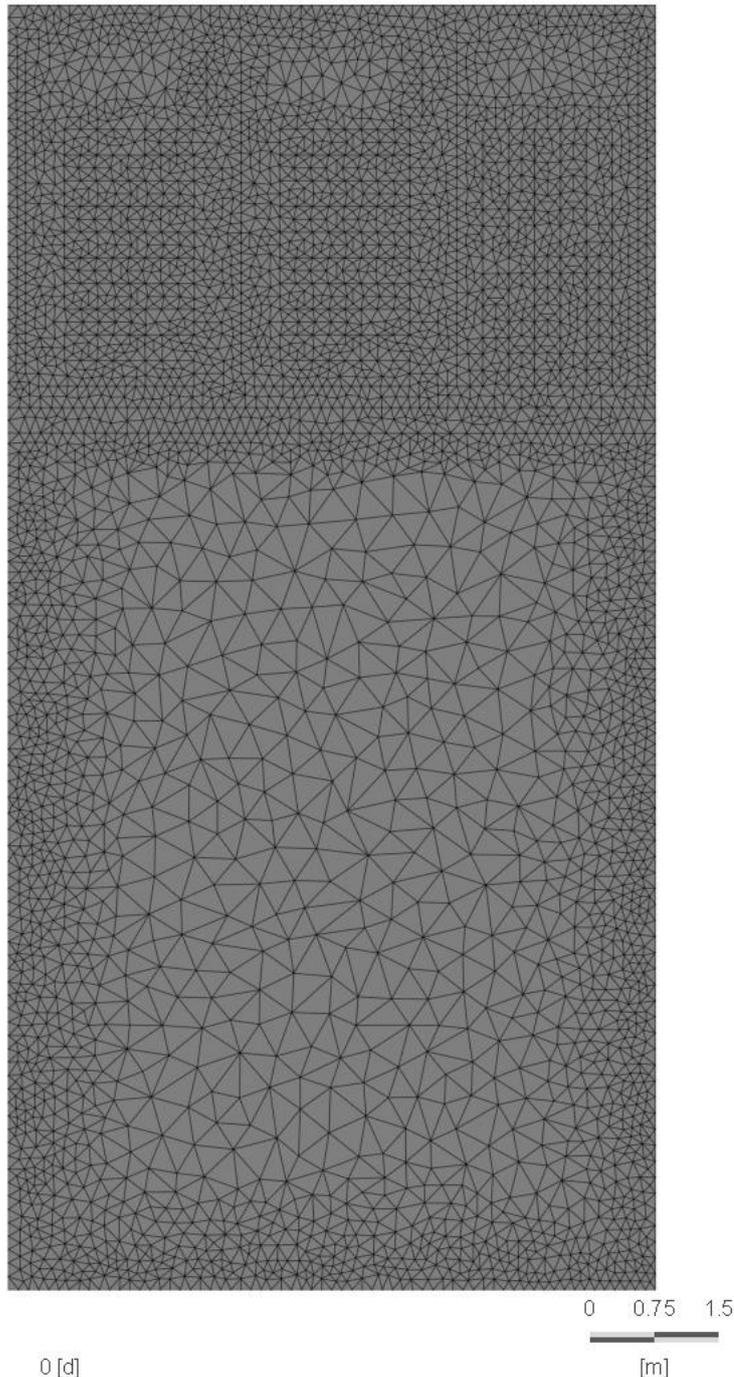


Figura 63 – Generazione della mesh

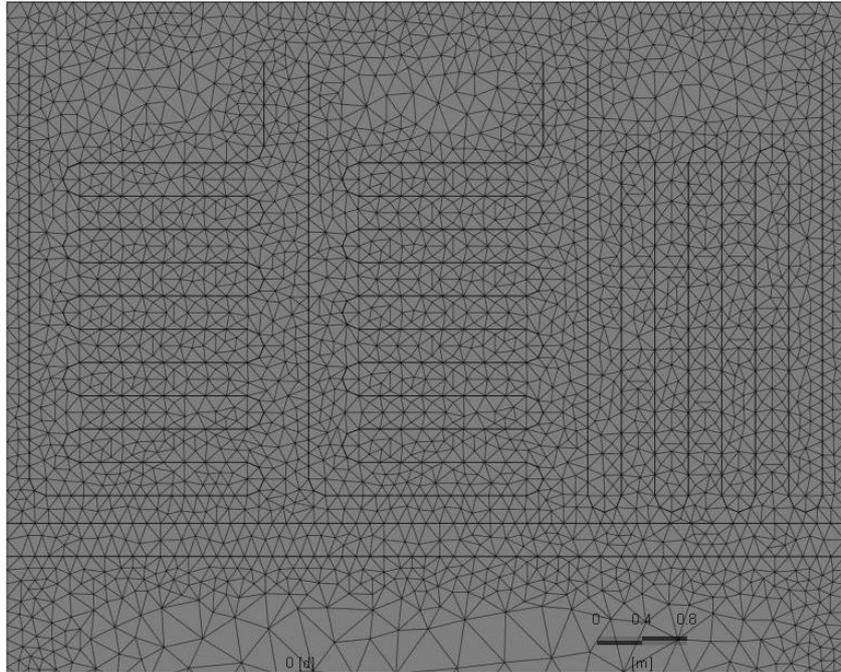


Figura 64 - Affinamento della mesh in corrispondenza delle sonde geotermiche

Una volta che è stata completata la creazione della *mesh*, attraverso il comando *Problem Settings* sono definite le impostazioni relative al tempo di simulazione, impostato a partire dal tempo  $t=0$  [d] fino a  $t=365$  [d] (Figura 65), alla direzione della gravità secondo l'asse  $y$  negativo e al trasporto di calore (*heat*) (Figura 66).

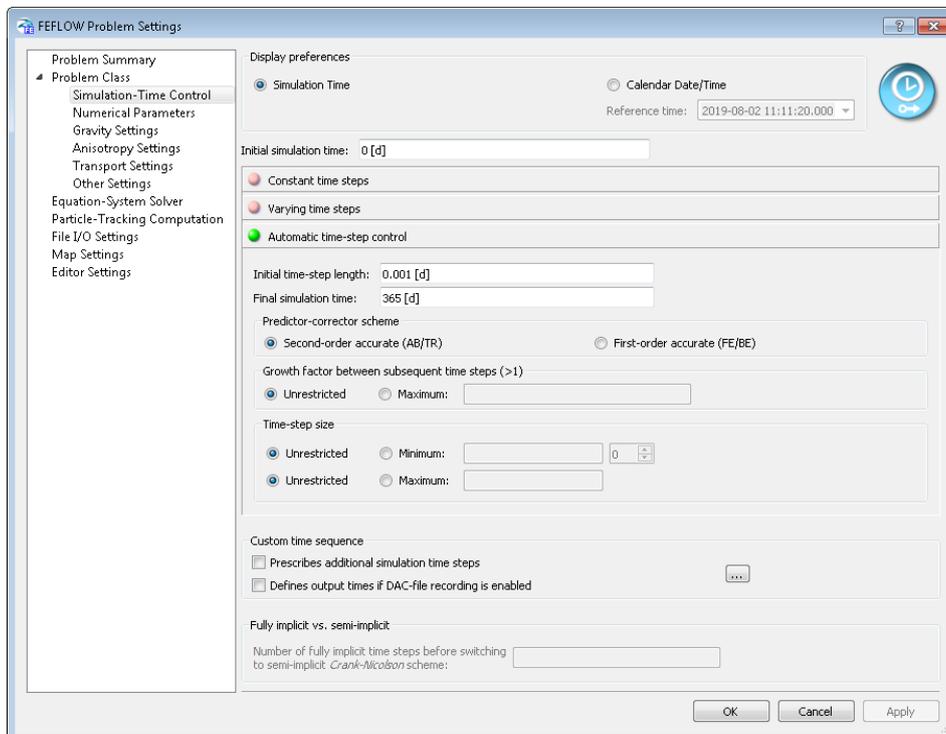


Figura 65 – Simulation-Time Control

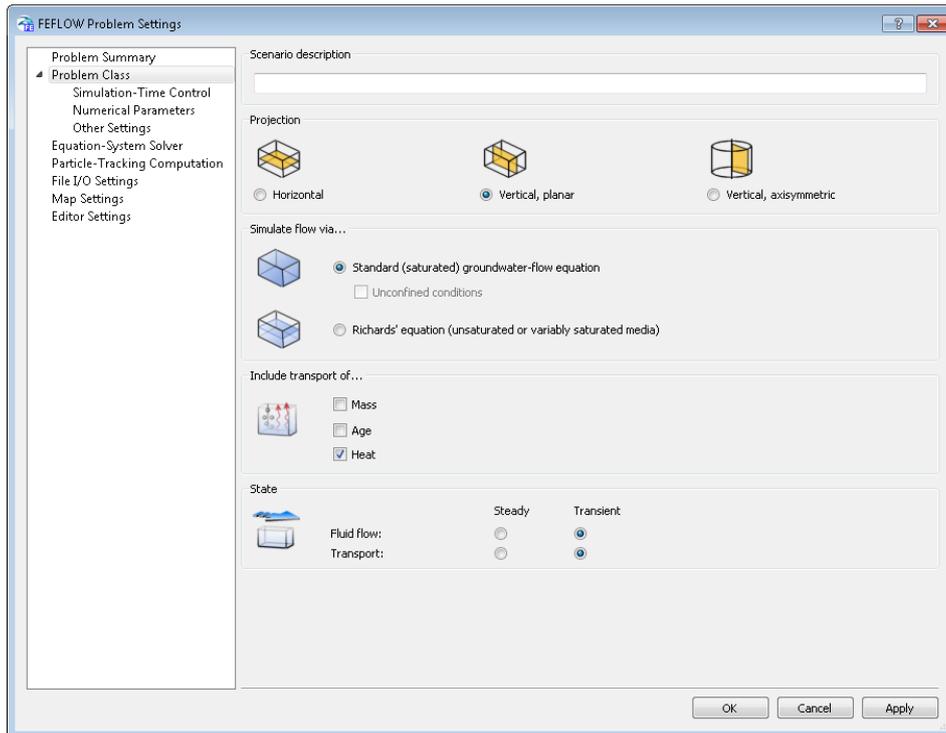


Figura 66 – Problem Class

Per passare da un tipo di modello 2D a 3D viene utilizzata la barra degli strumenti *3D Layer Configurator* : il numero di *layers* e *slices* definisce l'impostazione di base del modello FEFLOW. La quantità di *slices* - le interfacce tra i *layers* e il modello superiore e inferiore - è sempre pari al numero di *layers* più uno.

Per lo sviluppo del modello nella terza dimensione, dunque, la discretizzazione è stata effettuata in modo tale da ottimizzare il modello: i *layers* sono più fitti in prossimità dei sistemi di scambio termico e meno fitti in prossimità dei bordi del modello. Ciò è osservabile in Figura 67, dove si vede come il numero di *layers* sia pari a 16, e quello degli *slices* pari a 17, ed in dettaglio in Figura 68.

# Modellazione numerica

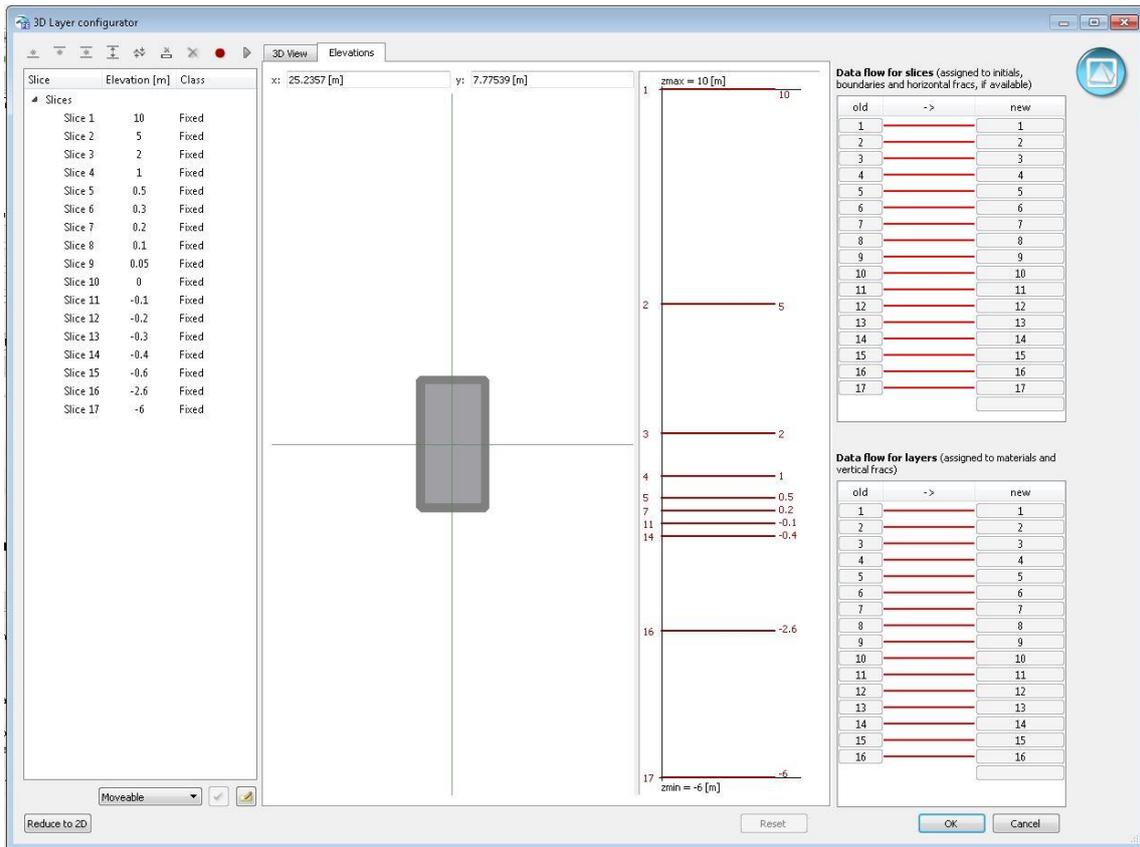


Figura 67 – 3D Layer Configurator

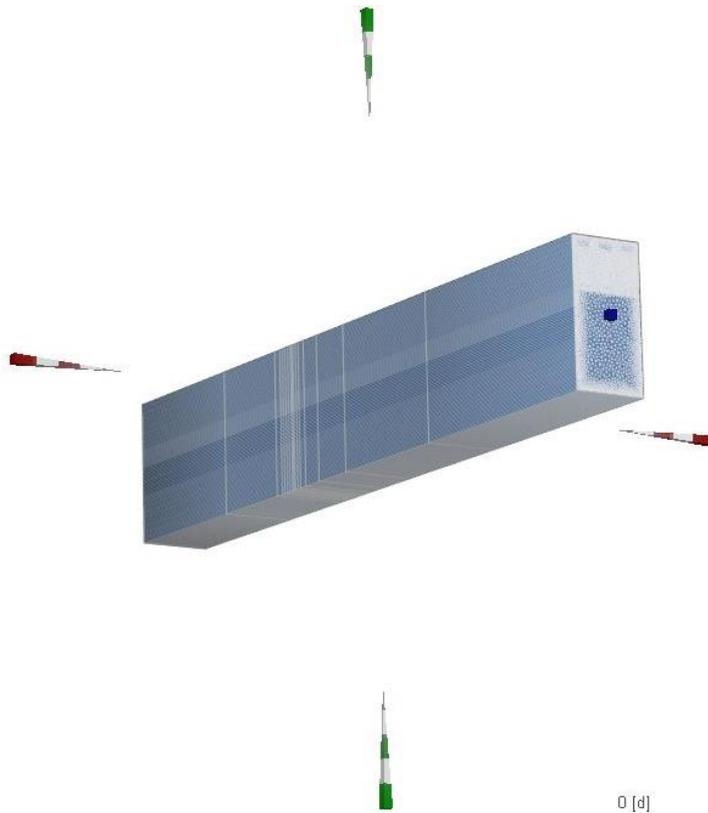


Figura 68 – Modello 3D

Le tubazioni dei tre sistemi sono state modellate attraverso l'elemento presente all'interno del software *discrete features*. Diverse leggi del flusso del fluido possono essere definite all'interno di tali elementi, ad esempio le leggi di Darcy, Hagen-Poiseuille o Manning-Strickler. Le caratteristiche geometriche e fisiche dei *discrete elements* offrono una grande flessibilità nella modellazione di situazioni complesse: essi sono infatti degli elementi monodimensionali ad elevata conducibilità (Figura 69).

Nel nostro caso, trattandosi di tubazioni di piccolo diametro la formulazione più adatta è quella di Hagen-Poiseuille che però trascura le proprietà termiche del materiale che costituisce il tubo; tuttavia l'errore che si produce è relativamente piccolo per problemi con dimensioni come quello studiato, e quindi trascurabile.

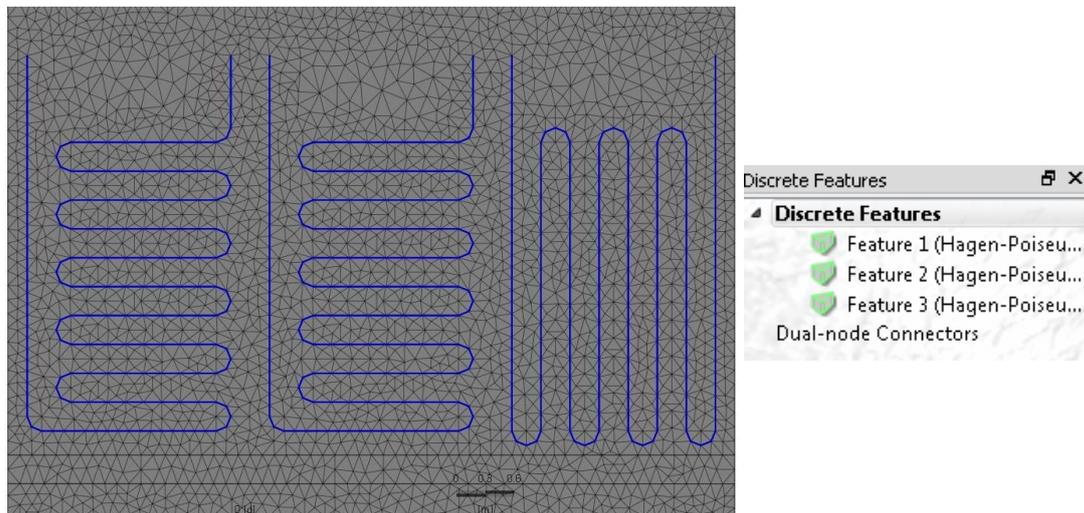


Figura 69 – Discrete features

#### 4.2.1 Parametri dei materiali

Per dimensionare correttamente un impianto geotermico è necessario conoscere le caratteristiche del sottosuolo e dei materiali che lo costituiscono, in particolare le sue proprietà termiche, geolitologiche e tessiturali dei materiali che lo compongono.

Le proprietà che maggiormente influenzano il comportamento termico del sottosuolo sono il contenuto d'acqua, le caratteristiche fisiche e le proprietà termiche della matrice solida.

Si riporta di seguito la descrizione dei parametri principali che sono stati utilizzati per descrivere al meglio il modello da un punto di vista termoidraulico:

- Porosità  $n$ : volume dei vuoti ( $V_v$ ) diviso volume totale ( $V$ )

$$n = \frac{V_v}{V}$$

indica con un valore adimensionale la frazione di vuoti presenti nel terreno che stiamo prendendo in considerazione;

- Conduttività termica  $K$ : attitudine di un materiale a trasmettere calore; essa aumenta al crescere del contenuto d'acqua.

$$K = k \frac{\rho g}{\mu}$$

con  $\rho$  e  $\mu$  rispettivamente densità e viscosità del fluido,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $k$  la permeabilità del mezzo poroso.

- Capacità termica  $C_v$ : quantità di calore che bisogna cedere o togliere ad un volume unitario di una sostanza per innalzarne (o diminuirne) la temperatura di 1 K; anch'essa aumenta fortemente al crescere del contenuto d'acqua.

$$C_v = \frac{Q}{\Delta T}$$

- Diffusività termica  $\alpha$ : misura di quanto velocemente un materiale riesce a diffondere il calore al suo interno; essa è data dal rapporto tra conducibilità e capacità termica.
- Coefficiente di immagazzinamento  $S$ : quantità d'acqua per unità di volume di una formazione satura che viene immagazzinata o espulsa dall'immagazzinamento a causa della comprimibilità dello scheletro minerale.

Tali parametri risultano dipendenti dalle proprietà fisiche e litologiche dei materiali: all'aumentare della densità dei materiali si riduce il volume complessivo occupato dalle cavità vuote, il contatto tra i grani migliora e la conduttività termica del mezzo poroso aumenta.

La conduttività termica di un terreno a grana grossa è minore di quella di un terreno a grana fine a parità di contenuto d'acqua e la conduttività dei suoli rocciosi è superiore a quella dei terreni sabbiosi ed argillosi.

Un parametro che condiziona fortemente le proprietà termiche dei materiali è il contenuto d'acqua; in fase di progettazione di un impianto geotermico (ed in fase di perforazione dei pozzi per l'installazione delle sonde geotermiche) è fondamentale la conoscenza delle caratteristiche idrogeologiche del sito: la presenza di acqua, infatti, determina un miglioramento delle proprietà termiche poiché influisce sulla densità dei materiali e garantisce la continuità del mezzo per la trasmissione del calore.

L'acqua inoltre possiede elevati valori di capacità e conduttività termica: la conduttività termica dell'acqua è venti volte superiore a quella dell'aria di cui prende il posto per cui la riduzione del volume dei vuoti o il riempimento degli stessi con acqua ha un effetto benefico sulla conducibilità termica.

La relazione tra conduttività termica e contenuto d'acqua non è lineare: per elevati valori di contenuto d'acqua la variazione dell'umidità non influisce molto sulla conducibilità termica mentre per bassi valori le variazioni sono più significative (Figura 70).

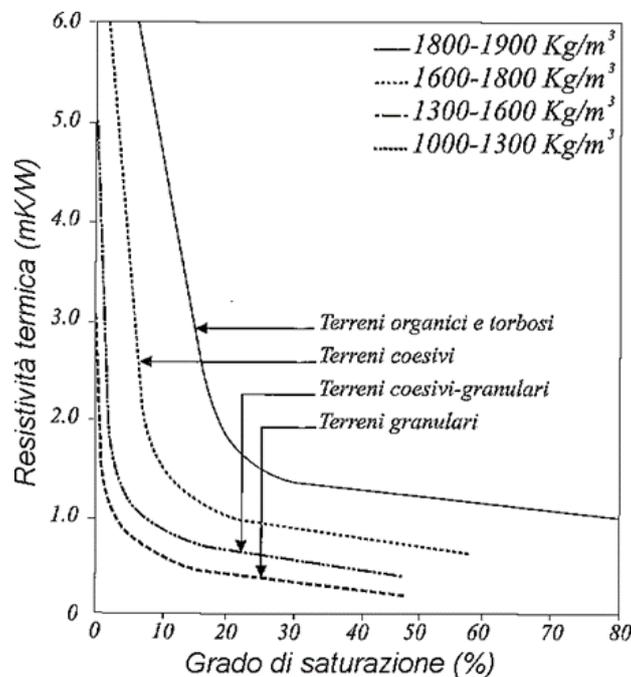


Figura 70 – Resistività termica del suolo in funzione dell'umidità (modificato da Delmastro, 2009)

In Tabella 8 si osserva come la conducibilità termica nei materiali geologici varia tra 1 e 4 W/mK a seconda del materiale e del contenuto d'acqua; e come la capacità termica varia tra 1 e 3 MJ/m<sup>3</sup>K a seconda del materiale e del contenuto d'acqua.

Tipologia di Roccia	Densità $\rho$ (10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> )	Conducibilità Termica media $\lambda$		Capacità termica volumica $\rho \cdot C_p$ [MJ/(m <sup>3</sup> K)]
		[W/(m·K)]		
Valori tipici caratteristici				
<b>Rocce eruttive</b>				
Basalto	2.6-3.2	1.3-2.3	(1.7)	2.3-2.6
Diorite	2.9-3.0	2.0-2.9	(2.6)	2.9
Gabbro	2.8-3.1	1.7-2.5	(1.9)	2.6
Granito	2.4-3.0	2.1-4.1	(3.4)	2.1-3.0
Peridotite	3.0	3.8-5.3	(4.0)	2.7
Riolite	ca. 2.6	3.1-3.4	(3.3)	2.1
<b>Rocce metamorfiche</b>				
Gneiss	2.4-2.7	1.9-4.0	(2.9)	1.8-2.4
Marmo	2.5-2.8	2.5-2.8	(2.1)	2.0
Metaquarzite	ca. 2.7	ca. 5.8	(5.8)	2.1
Micasciste	ca. 2.6	1.5-3.1	(2.0)	2.2
Sciste argillosa	2.7	1.5-2.6	(2.1)	2.2-2.5
<b>Rocce sedimentarie</b>				
Pietra calcarea	2.6-2.7	2.5-4.0	(2.8)	2.1-2.4
Marna	2.5-2.6	1.5-3.5	(2.1)	2.2-2.3
Quarzo	ca. 2.7	3.6-6.6	(6.0)	2.1-2.2
Sale	2.1-2.2	5.3-6.4	(5.4)	1.2
Arena	2.2-2.7	1.3-5.1	(2.3)	1.6-2.8
Carbone compatto	n.a.	0.3-0.6	(0.3)	1.3-1.8
Pietra argillosa/limosa	2.5-2.6	1.1-3.5	(2.2)	2.1-2.4
<b>Rocce friabili</b>				
Ghiaia secca	2.7-2.8	0.4-0.5	(0.4)	1.4-1.6
Ghiaia satura di acqua	ca. 2.7	ca. 1.8	(1.8)	ca. 2.4
Morena	n.a.	1.0-2.5	(2.0)	1.5-2.5
Sabbia secca	2.6-2.7	0.3-0.8	(0.4)	1.3-1.6
Sabbia satura di acqua	2.6-2.7	1.7-5.0	(2.4)	2.2-2.9
Argilla, limo secco	n.a.	0.4-1.0	(0.5)	1.5-1.6
Argilla, limo saturo di acqua	n.a.	0.9-2.3	(1.7)	1.6-3.4
Torba	n.a.	0.2-0.7	(0.4)	0.5-3.8
<b>Altre sostanze</b>				
Bentonite	n.a.	0.5-0.8	(0.6)	ca. 3.9
Cemento	ca. 2.0	0.9-2.0	(1.6)	ca. 1.8
Ghiaccio (-10°C)	0.919	2.32		1.87
Plastica (PE)	n.a.	0.39		n.a.
Aria (0-20°C, secca)	0.0012	0.02		0.0012
Acciaio	7.8	60		3.12
Acqua (+10°C)	0.999	0.59		4.15

Tabella 8 - Conducibilità e capacità termica volumica di diversi terreni (VDI 4640, 2000)

I dati relativi alle proprietà termiche dei materiali possono essere acquisiti da informazioni bibliografiche o mediante una misura diretta in sito o in laboratorio. Per piccoli impianti i parametri vengono stimati dalla stratigrafia presunta mentre

per gli impianti di potenzialità termica maggiore le proprietà termiche vengono misurate in loco.

Il principale problema delle misure in laboratorio sta nella difficoltà di prelevare campioni che siano rappresentativi dell'insieme geologico locale (Delmastro, 2009). La tecnica più comunemente usata per lo studio in situ delle proprietà termiche dello scambiatore è il GRT (Geothermal Response Test).

Nelle seguenti tabelle (Tabella 9, 10, 11, 12) sono riportate le proprietà termiche adoperate nel modello, associate rispettivamente al terreno dell'Energy Center, all'aria, al calcestruzzo e alle sonde geotermiche. In particolare, i parametri idraulici, idro-dispersivi e termici dell'acquifero sono il risultato di prove di pompaggio, con monitoraggio della temperatura, condotte per tre mesi consecutivi (Barla et al. 2013).

Proprietà	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica $K_{xx}$	$4.15 \cdot 10^{-3}$	[m/s]
Conducibilità idraulica $K_{yy}$	$2.075 \cdot 10^{-4}$	[m/s]
Conducibilità idraulica $K_{zz}$	$4.15 \cdot 10^{-3}$	[m/s]
Coefficiente di immagazzinamento	$10^{-4}$	[m <sup>-1</sup> ]
Porosità	0.25	[-]
Capacità termica del fluido	4.2	[MJ]/m <sup>3</sup> /K]
Capacità termica del solido	2.0	[MJ]/m <sup>3</sup> /K]
Conducibilità termica del fluido	0.65	[W/m/K]
Conducibilità termica del solido	2.8	[W/m/K]
Dispersione termica longitudinale	3.1	[m]
Dispersione termica trasversale	0.3	[m]

Tabella 9 - Parametri del terreno

Proprietà	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica $K_{xx}$	$10^{-2}$	[m/s]
Conducibilità idraulica $K_{yy}$	$10^{-2}$	[m/s]
Conducibilità idraulica $K_{zz}$	$10^{-2}$	[m/s]
Coefficiente di immagazzinamento	$10^{-4}$	[m <sup>-1</sup> ]
Porosità	1	[-]
Capacità termica del fluido	$10^{-3}$	[MJ]/m <sup>3</sup> /K]
Conducibilità termica del fluido	0.53	[W/m/K]
Dispersione termica longitudinale	5	[m]
Dispersione termica trasversale	0.5	[m]

Tabella 10 - Parametri dell'aria

Proprietà	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica $K_{xx}$	$10^{-16}$	[m/s]
Conducibilità idraulica $K_{yy}$	$10^{-16}$	[m/s]
Conducibilità idraulica $K_{zz}$	$10^{-16}$	[m/s]
Coefficiente di immagazzinamento	$10^{-4}$	[m <sup>-1</sup> ]
Porosità	0	[-]
Capacità termica del solido	1.05	[MJ/m <sup>3</sup> /K]
Conducibilità termica del solido	1.12	[W/m/K]

Tabella 11 – Parametri del calcestruzzo

Proprietà	Valore	U.M.
Coefficiente di immagazzinamento	$10^{-4}$	[m <sup>-1</sup> ]
Area trasversale	3.14	[cm <sup>2</sup> ]
Raggio idraulico	0.5	[cm]
Capacità termica del fluido	4.2	[MJ/m <sup>3</sup> /K]
Conducibilità termica del fluido	0.65	[W/m/K]

Tabella 12 – Parametri delle sonde geotermiche

In Figura 71 è riportato il modello 3D in cui è possibile distinguere l'intercapedine d'aria, il muro e il terreno: in particolare si fa riferimento alla conducibilità idraulica verticale  $K_{yy}$ , parametro per cui si evidenzia maggiormente la differenza tra i materiali.

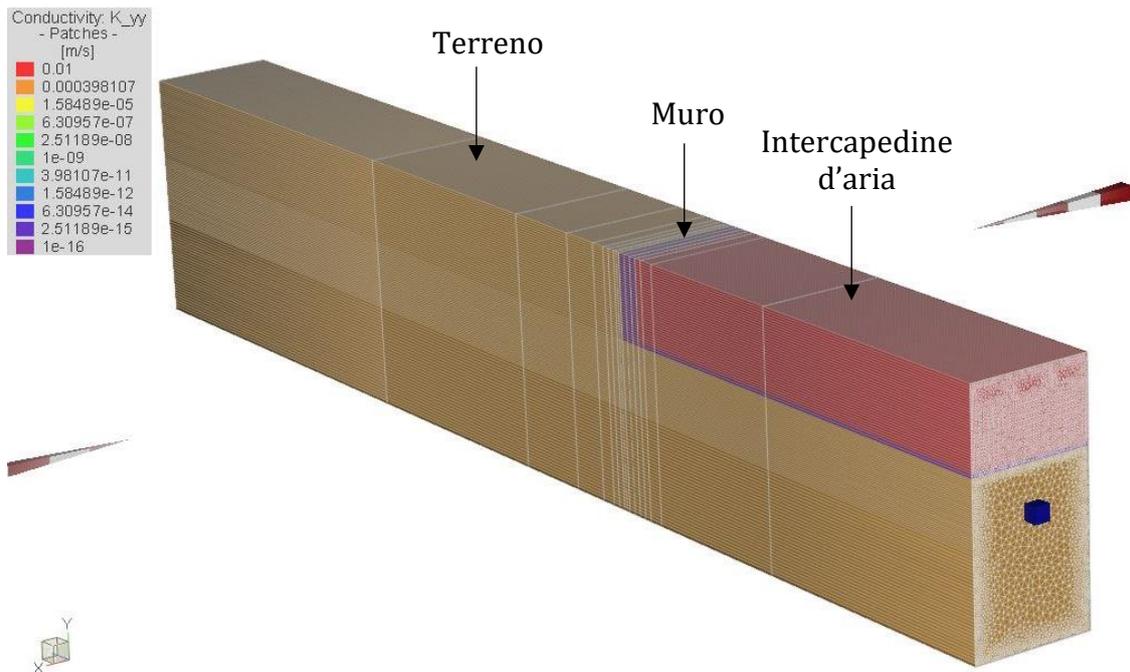


Figura 71 – Modello 3D – Conducibilità idraulica:  $K_{yy}$

È riportato anche in Figura 72 un particolare del confine aria/muro/terreno.

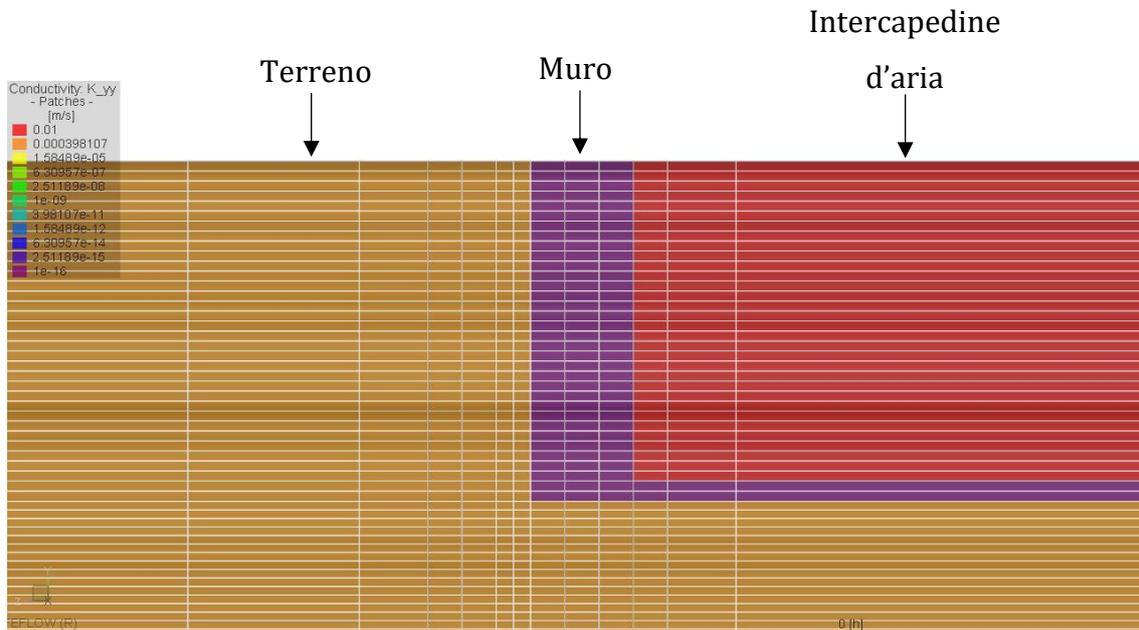


Figura 72 – Particolare del confine aria/muro/terreno

#### 4.2.2 Simulazione *a*: Prova 1

Per effettuare una simulazione della prova di raffrescamento che coinvolge i circuiti 2 e 3 in serie, è stato necessario fornire al modello delle condizioni iniziali e condizioni al contorno specifiche.

La superficie del terreno situato nei pressi dell'Energy Center subisce variazioni di temperatura giornaliere a seconda della stagione considerata; tuttavia, al di sotto dei 10-15 m di profondità si ha invece temperatura pressoché costante durante l'intero anno (14°C circa). Perciò, nel modello a 15 m di profondità è stata impostata una *temperature BC* di 14°C, mentre, per quanto riguarda la superficie superiore del dominio, corrispondente al livello del piano campagna, essa risente della variazione stagionale e non è dunque possibile impostare una *temperature BC* costante.

Per questo motivo si procede con la definizione della *time-series*, agente sulla superficie superiore. La finestra di dialogo *time-series* viene utilizzata per definire le variazioni temporali per le proprietà del modello. Le serie temporali sono definite indipendentemente da un parametro specifico e possono essere assegnate a un

parametro in una fase di lavoro successiva. Le serie temporali sono costituite da un ID univoco come identificatore, un nome, un tipo di curva, una modalità temporale e un insieme di coppie di valori (tempo vs. valore).

L'impostazione del tipo di curva determina la legge di interpolazione tra le coppie di dati. Per impostazione predefinita, viene applicata un'interpolazione lineare, in alternativa, è possibile utilizzare l'interpolazione *Akima1* o *Akima2* o *constant steps*. *Akima1* si basa su un'interpolazione spline poligonale di terzo ordine dei valori della funzione mentre *Akima2* applica ulteriori punti centrali per uniformare la funzione. Il metodo *constant steps* applica una funzione a gradini senza richiedere all'utente di definire una pendenza della rampa specifica inserendo fasi temporali aggiuntive.

Nel nostro caso, si considera l'andamento della temperatura a Torino nei giorni in cui è stata effettuata la prima prova di raffrescamento (dal 17/09/19 al 23/09/19): i dati sono ricavati tramite il portale dell'ARPA Piemonte, e sono i valori medi di temperatura orari rilevati dalla stazione termoisigro-pluvioanemometrica con radiometro situata in Via della Consolata, 10, sede che risulta più vicina alla collocazione dell'Energy Center. In Figura 73 sono riportati i dati in forma grafica ricavati dalla banca dati meteorologica.

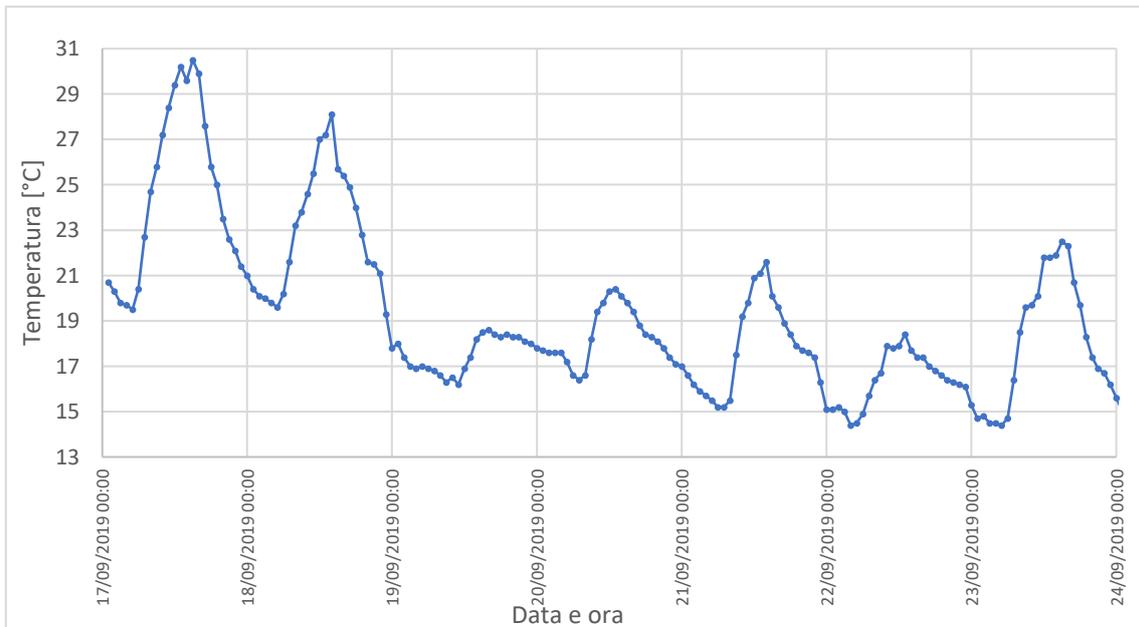


Figura 73 - Grafico per la stazione TORINO VIA DELLA CONSOLATA – ARPA Piemonte

In particolare, la prova di raffreddamento nel modello è stata simulata durante il giorno 17/09/2019, quindi, nel grafico in Figura 74 è riportato in dettaglio l'andamento orario delle temperature, che verranno poi applicate al modello tramite la creazione di una *time-series*.

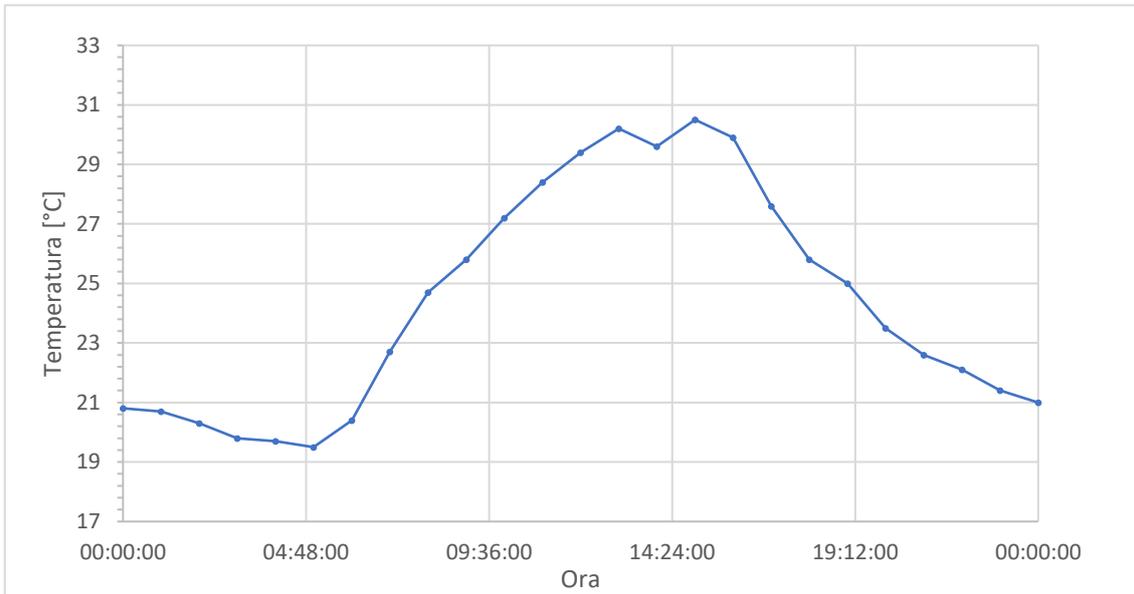


Figura 74 - Grafico per la stazione TORINO VIA DELLA CONSOLATA – ARPA Piemonte

Dopo aver ottenuto i dati si crea la *time series* tramite il software FEFLOW, verrà assunta come funzione ciclica con un'interpolazione di tipo *linear*, che approssima meglio l'andamento del diagramma in Figura 74 e verrà applicata sui nodi superiori del modello, simulando la temperatura dell'aria (Figura 75).

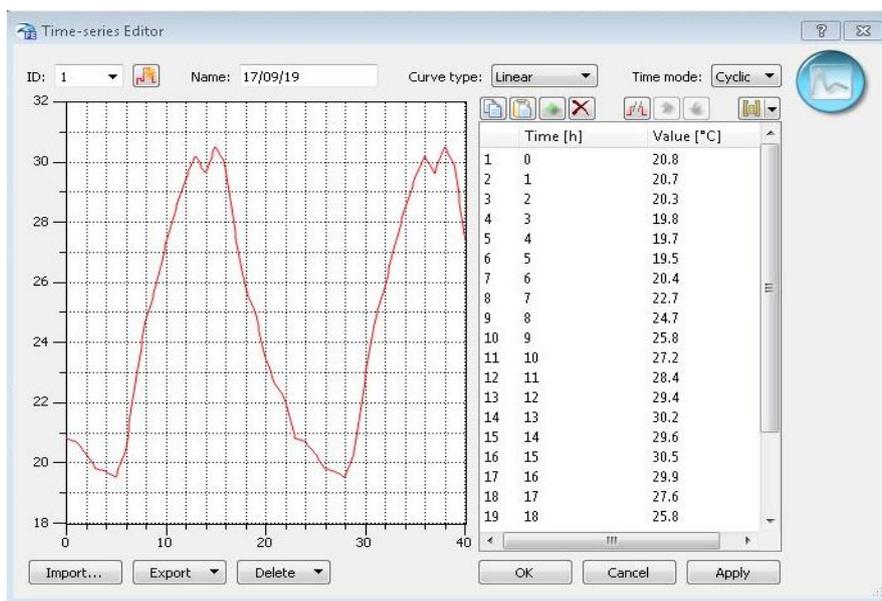


Figura 75 – Time series

Un'ulteriore condizione al contorno è stata applicata ai nodi situati alla base dell'intercapedine d'aria, ovvero dove è situata la pompa di calore geotermica, la quale fornisce i dati di temperatura dell'aria BT1, presenti in forma grafica in Figura 76, riferiti al giorno 17/09/19.

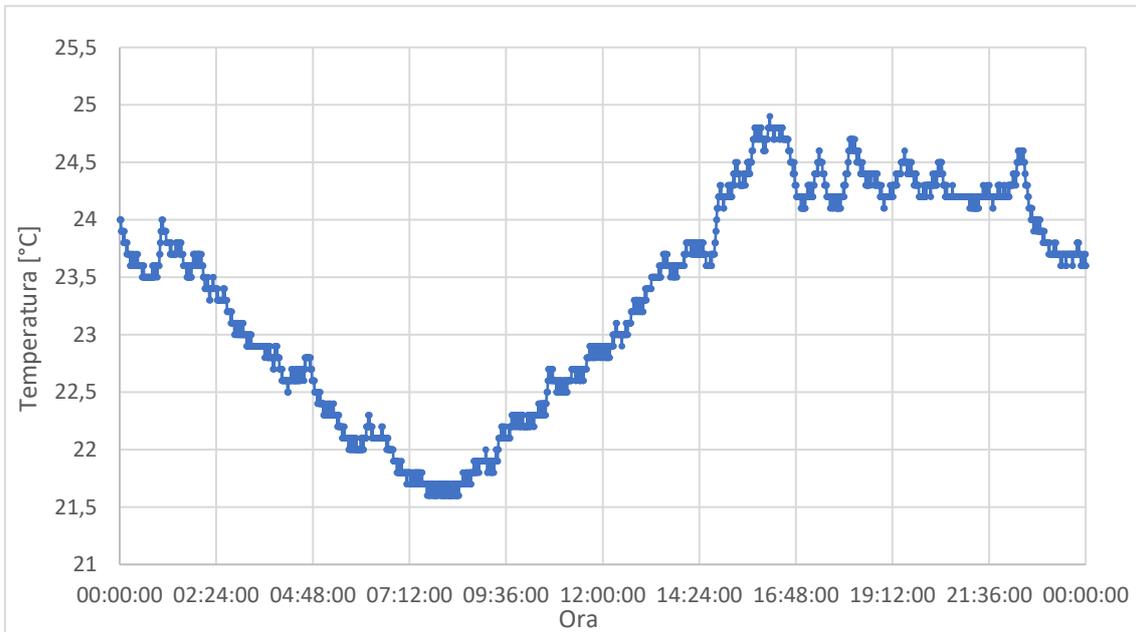


Figura 76 – Grafico BT1 - ora

Allo stesso modo della *Temperature BC* precedente, si crea la *time series* come funzione ciclica con un'interpolazione di tipo *constant steps* e verrà applicata sui nodi alla base dell'intercapedine d'aria, simulando la temperatura dell'aria (Figura 77).

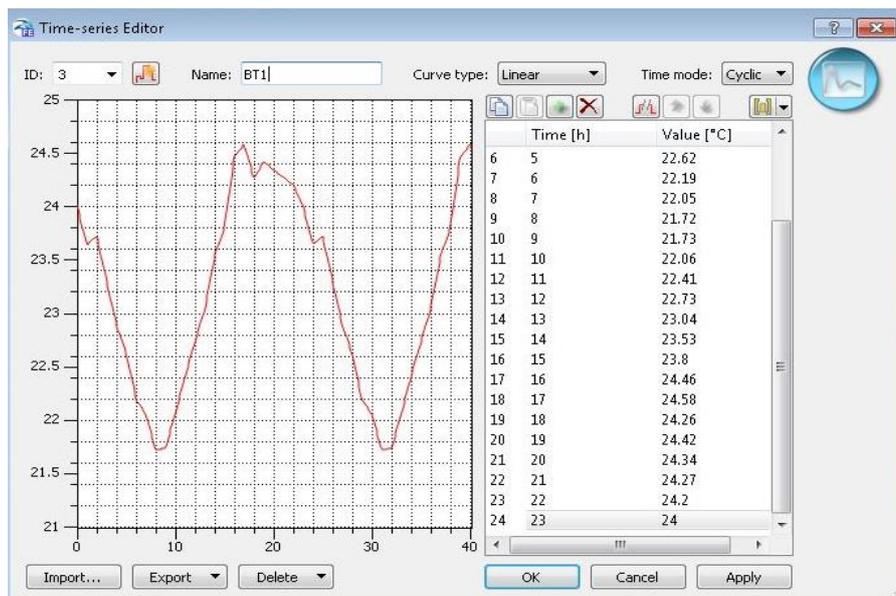


Figura 77 – Time series

Si impongono, quindi, le condizioni al contorno di temperatura sul modello: selezionando i nodi della superficie inferiore, a 15 m di profondità, si imposta una temperatura pari a 14°C; ai nodi della superficie superiore, invece, si applica la variazione oraria impostata tramite *time-series*, e la stessa procedura vale per i nodi alla base dell'intercapedine d'aria (Figura 78).

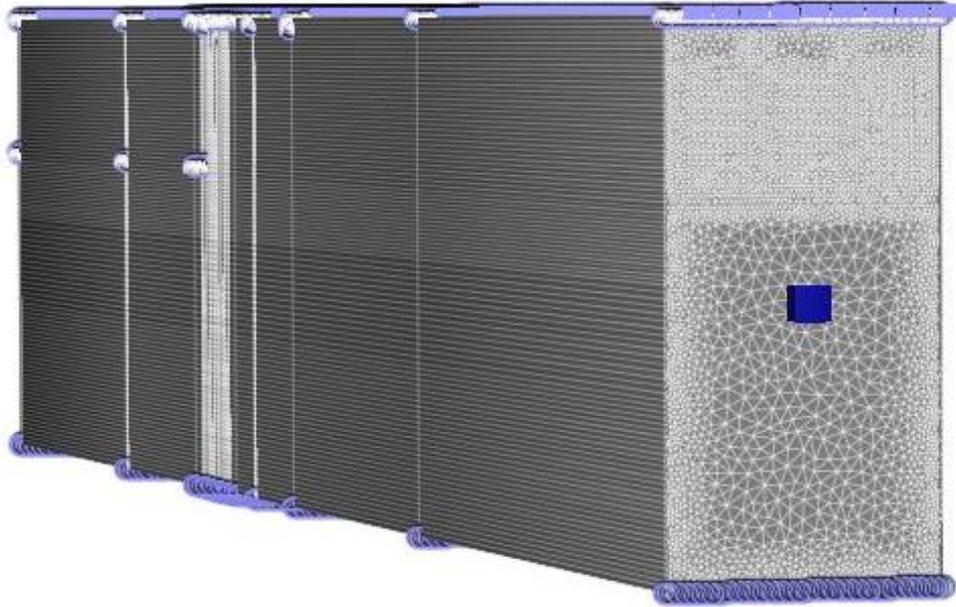


Figura 78 – Temperature BC

Si passa, poi, alle condizioni al contorno da assegnare alle sonde geotermiche nello Slice 9. Tramite la funzione *Fluid-flux BC* (Figura 79) si imposta la velocità del fluido all'interno dei circuiti 2 e 3: in ingresso nel circuito 3 la velocità assegnata è pari a  $-0.4 \text{ m/s}$  e in uscita dal circuito 2 è pari a  $0.4 \text{ m/s}$  (il segno negativo indica il fluido entrante, quello positivo il fluido uscente). In particolare, per poter effettuare il collegamento in serie tra il circuito 2 e 3 è stato effettuato un collegamento tramite *discrete features*, ovvero con elementi monodimensionali ad elevata conducibilità con le stesse caratteristiche geometriche e fisiche dei circuiti: ciò ha permesso la continuità del flusso da un circuito all'altro.

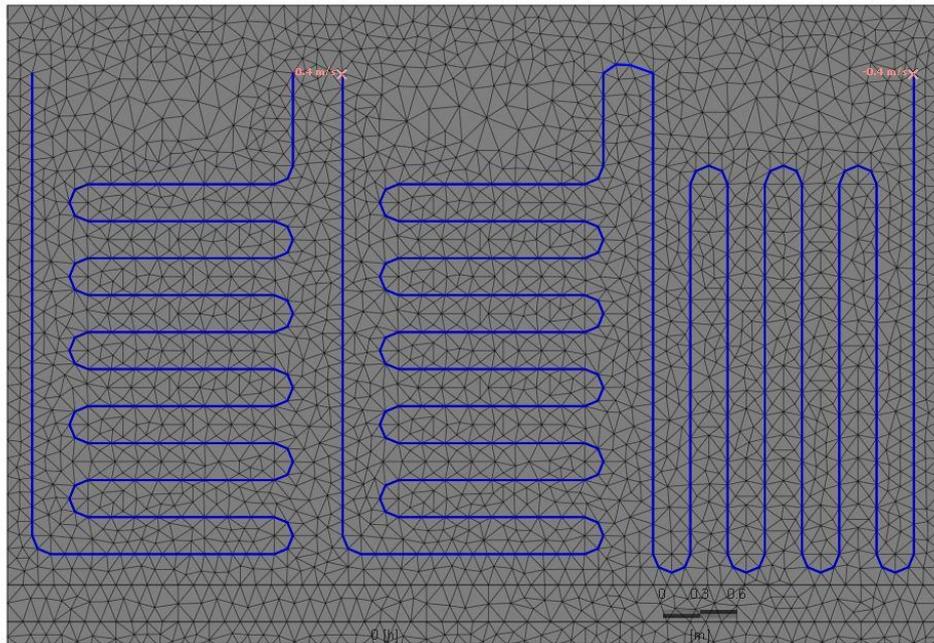


Figura 79 – Fluid-flux BC

Un'altra condizione al contorno che viene imposta al modello è quella relativa alla temperatura del fluido in ingresso nelle sonde geotermiche: tramite la funzione *Temperature BC* viene assegnata sul nodo di ingresso del fluido (Figura 80). Essendo la nostra prova di raffreddamento, si è impostata una temperatura di 30°.

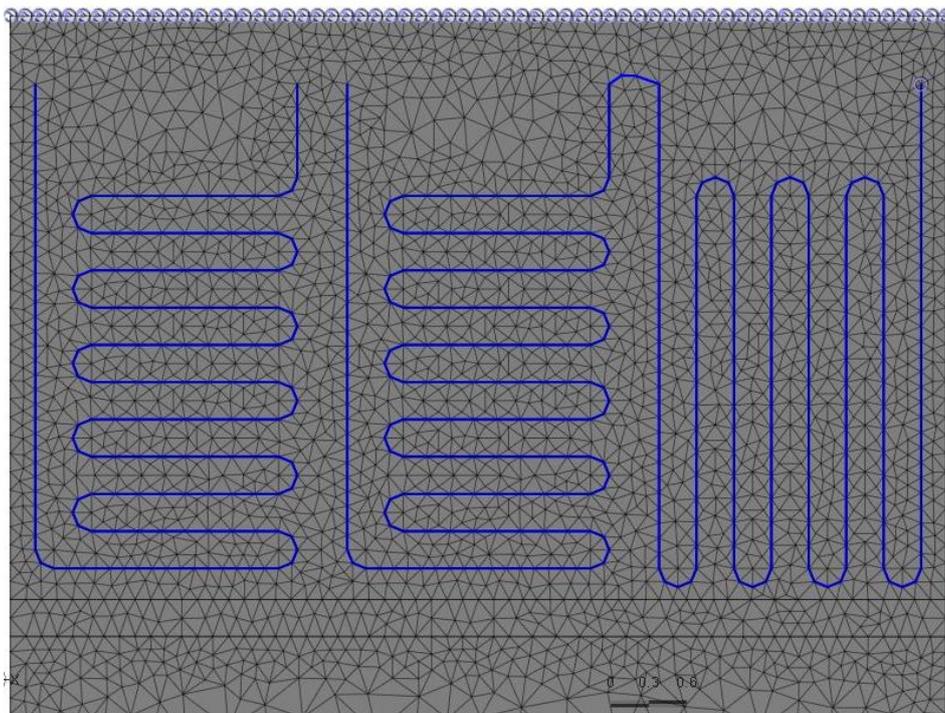


Figura 80 – Temperature BC

In Figura 81 vengono riportati i risultati dell'analisi effettuata per la situazione estiva. In particolare, è stato utilizzato un *observation point*: una funzione per cui si seleziona un punto del modello e durante la simulazione ne fornisce, in forma grafica, il carico idraulico, la concentrazione e la temperatura in funzione del tempo di simulazione. Nel nostro caso è stato posizionato un *observation point* in corrispondenza del punto di uscita del fluido dal circuito di sonde geotermiche. Per poter effettuare un'analisi significativa dei dati, il terreno è stato attivato termicamente attraverso una simulazione di circa 1,5 anni, tempo necessario per il raggiungimento della temperatura ciclicamente stabile.

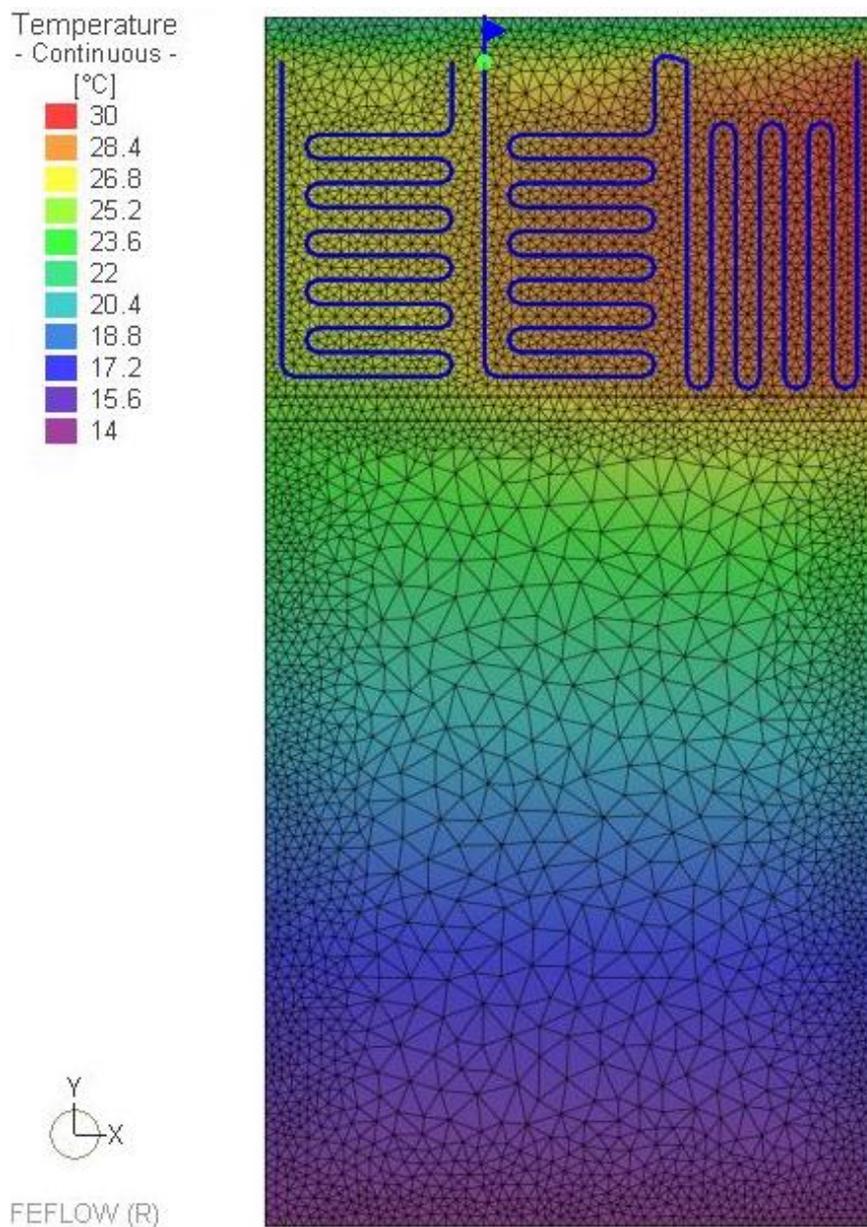


Figura 81 – Andamento delle temperature – Slice 9

In Figura 82 vengono riportati gli stessi risultati di temperatura, ma sul modello 3D, che ci permette di osservare meglio la variazione di temperatura e, quindi, lo scambio termico che avviene tra il sistema a sonde geotermiche e il terreno a contatto col muro.

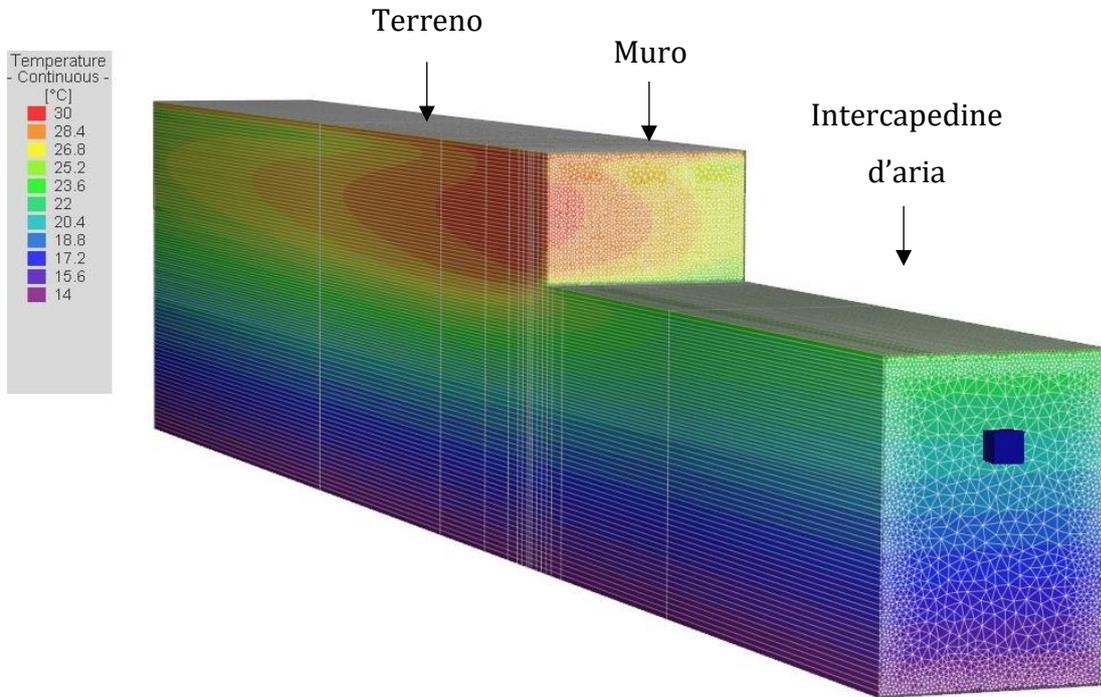


Figura 82 – Andamento delle temperature – Modello 3D

In particolare, si osserva come, la porzione di terreno a contatto con i circuiti 2 e 3 sia prossima alla temperatura di ingresso delle sonde, ovvero 30°C, in quanto, la prova è stata mantenuta attiva fino a quando tutto il terreno risultava attivato termicamente (circa 1,5 anni). Per questo motivo i risultati in Figura 82 sono interessanti dal punto di vista dello scambio termico avvenuto e ci permettono di osservare il gradiente termico del terreno. Infatti, date le *boundary conditions*, il terreno del modello risulta avere una temperatura prossima ai 14 °C a 15 m di profondità, e, a livello del piano campagna la variazione giornaliera ricavata dall'ARPA Piemonte.

Nel grafico in Figura 83 è riportato l'andamento della temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle sonde geotermiche durante la simulazione effettuata. Si può notare come la temperatura abbia un incremento importante nei primi giorni di funzionamento del sistema, con una variazione dell'ordine del grado centigrado; infine, vediamo come, una volta che il flusso di calore si è stabilizzato, ovvero quando il terreno risulta attivato termicamente, si arriva ad una temperatura pressoché costante nel tempo pari a circa 27,4 °C. In particolare, dalla condizione di pseudo parallelismo fra la retta che rappresenta la temperatura del fluido entrante (30 °C) e la parte finale della curva che rappresenta la temperatura del fluido uscente (27,4 °C) si può ricavare un dato molto importante: il  $\Delta T$  che risulta essere il risultato principale dell'analisi numerica. Infatti, grazie a questo valore, come sarà spiegato in seguito, è possibile calcolare la potenza ricavabile dal sistema in kW.

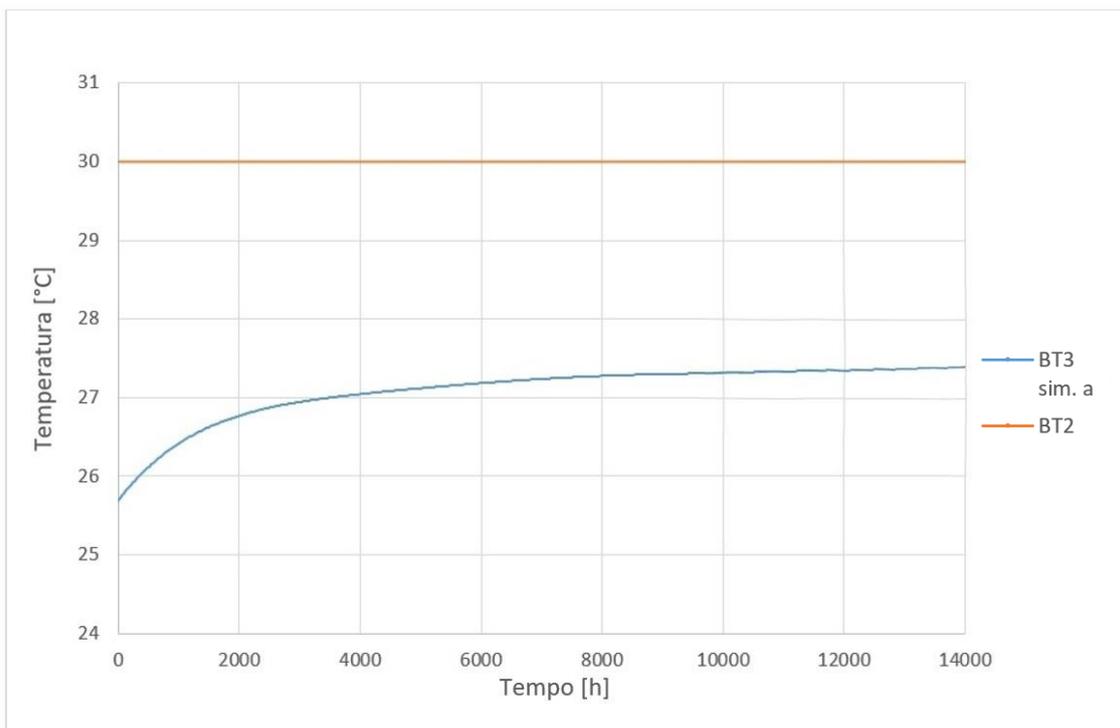


Figura 83 – Grafico BT2, BT3 simulazione a

#### 4.2.2.1 Quantificazione della potenza estraibile

La quantificazione della potenza estraibile è effettuata, tenendo conto della differenza di temperatura tra il fluido in ingresso nelle sonde ( $T_{in}$ ) e il fluido in uscita ( $T_{out}$ ). È possibile, quindi, determinare la potenza estraibile  $Q$  [kW] con la seguente formula:

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

dove:

- $\dot{m} = \rho_w \cdot v \cdot A$  [kg/s] è la velocità di flusso massica;
- $c$  [kJ/kgK] è il calore specifico dell'acqua;
- $\Delta T$  [°C] è la variazione di temperatura tra fluido entrante e uscente dalle sonde geotermiche.

In Tabella 13 sono riportati i dati necessari per effettuare il calcolo della potenza  $Q$  [kW].

$\rho_w$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	0,997
$v$ [m/s]	0,4
$A$ [m <sup>2</sup> ]	$3,14 \cdot 10^{-4}$
$\dot{m}$ [kg/s]	0,125
$c$ [kJ/kgK]	4,186
$\Delta T$ [°C]	2,6

Tabella 13 – Dati per il calcolo della potenza estraibile

La potenza estraibile  $Q_a$  [kW] vale:

$$Q_a = 1,36 \text{ kW}$$

Essendo la lunghezza complessiva del circuito 2+3 pari a 57 m, è possibile riportare il valore della potenza massima in  $W$  per m lineare come segue:

$$Q'_a = 23,86 \text{ W/m}$$

Analogamente alla prova 1, conoscendo le dimensioni dei pannelli modulari e, quindi, l'area di contatto  $A$ :

$$A = 23 \text{ m}^2$$

Il valore di potenza media estraibile  $Q''_a$  espressa in  $W$  per  $m^2$  di area di contatto con la terra vale:

$$Q''_a = 59,13 \text{ W/m}^2$$

Si è ottenuto, quindi, un valore in linea con l'intervallo di potenza estraibile previsto per le pareti energetiche.

I risultati di questa simulazione  $a$  sono riassunti in Tabella 14:

	<b>Simulazione <math>a</math></b>
$Q_a$ [kW]	1,36
$Q'_a$ [W/m]	23,86
$Q''_a$ [W/m <sup>2</sup> ]	59,13

Tabella 14 - Risultati simulazione  $a$

### 4.2.3 Simulazione b: Prova 1

In questa seconda simulazione sono state apportate determinate modifiche al modello, col fine di ottenere dei risultati più affini e confrontabili a quelli derivanti dalla prova reale di raffrescamento. Inizialmente è stato modificato il collegamento tra i due circuiti in serie, inserendolo all'interno del muro in calcestruzzo. Il collegamento è stato realizzato tramite *discrete features*, come nella simulazione precedente. In aggiunta, agli elementi triangolari circondanti il collegamento sono state attribuite le proprietà di un materiale isolante, riassunte in Tabella 15.

Material Properties	Value	Unit
Conductivity K <sub>xx</sub>	10 <sup>-16</sup>	[m/s]
Conductivity K <sub>yy</sub>	10 <sup>-16</sup>	[m/s]
Porosity	1	[-]
Volumetric heat capacity of fluid	10 <sup>-3</sup>	[MJ/m <sup>3</sup> /K]
Thermal conductivity of fluid	0.0255	[W/m/K]
Longitudinal dispersivity	3	[m]
Transverse dispersivity	0.31	[m]

Tabella 15 – Parametri dell'isolante

In seguito, è stata impostata un *initial condition* di temperatura al terreno del dominio, in modo da procedere, a differenza della prima simulazione, senza la necessità di dover attivare termicamente il terreno. In particolare, è stata ricavata la temperatura dei sensori Winet distanti 250 cm dal muro: C3T4 (piano A), C8T4 (piano B), C13T4 (piano C), C18T4 (piano D), come si può vedere in Tabella 16.

Sensore	Temperatura [°C]
C3T4	24,85
C8T4	26,76
C13T4	24,79
C18T4	22,87

Tabella 16 – Temperatura rilevata dai sensori Winet

Una volta ottenuti i dati si ricava la funzione logaritmica interpolante, che verrà applicata ai nodi di ogni *slice* per ottenere la condizione iniziale di temperatura del terreno (Figura 84).

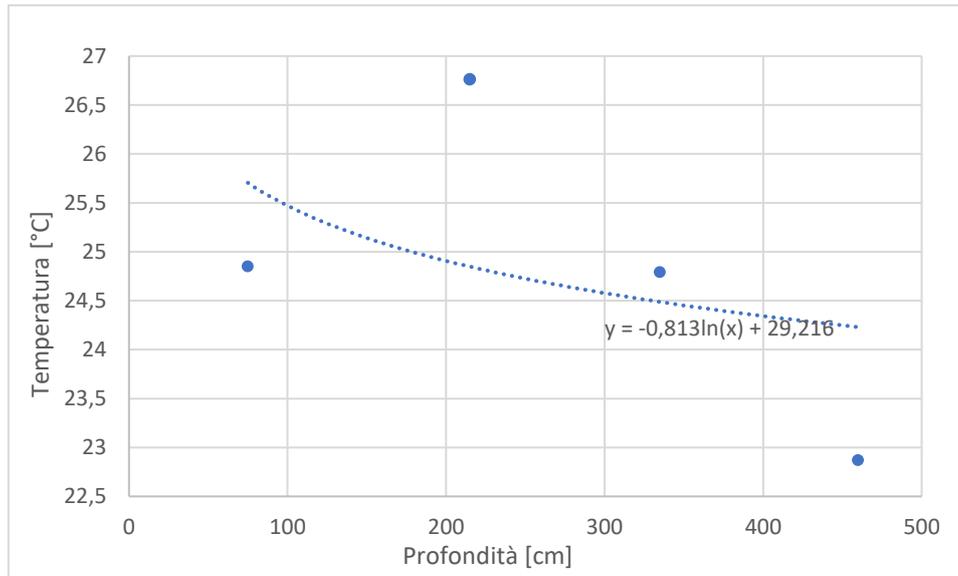


Figura 84 – Interpolazione temperatura - profondità

La funzione interpolante ottenuta è la seguente:

$$T = -0,813 \cdot \ln(y) + 29,216$$

Inoltre, nella prima simulazione, al fluido in ingresso/uscita dal circuito sono state assegnate le seguenti *boundary conditions*:

- *Temperature BC* : 30 °C in ingresso nel circuito 3;
- *Fluid flux BC*: -0,4 m/s in ingresso nel circuito 3 e +0,4 m/s in uscita dal circuito 2.

In questa seconda simulazione, invece, sono state assegnate *boundary conditions* con valori più dettagliati e affini alla prova di raffreddamento del caso reale di studio.

In particolare:

- *Temperature BC* : *time-series* BT2-ora del giorno 17/09/2019 in ingresso nel circuito 3 (Figura 85);

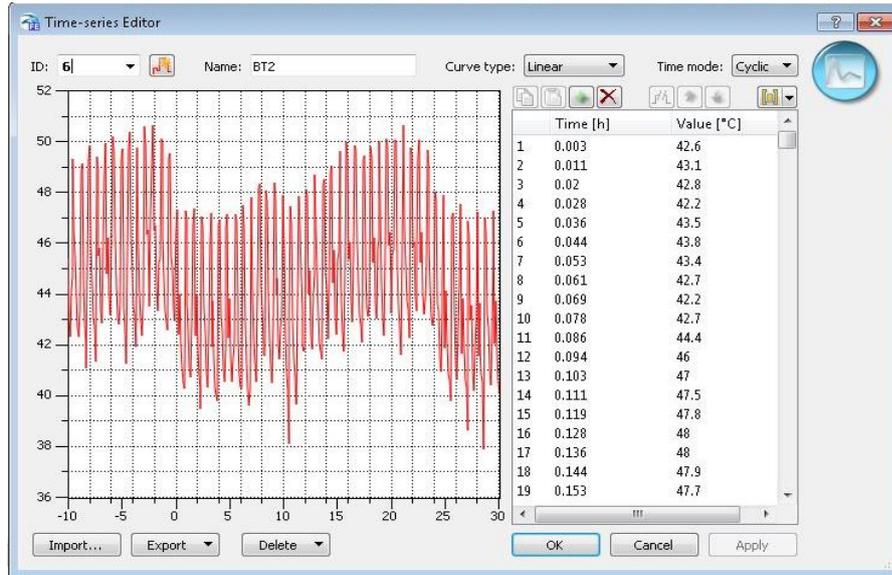


Figura 85 - Time-series BT2-ora

- *Fluid flux BC*: time-series velocità-ora in ingresso nel circuito 3 e analogamente in uscita dal circuito 2 (Figura 86). Per ottenere i valori di velocità  $v$  [m/s] a partire dalla portata  $P$  [l/h] nota, si determina inizialmente la sezione del tubo  $S$  [m<sup>2</sup>] come segue ( $\phi = 20$  mm):

$$S = \pi \left( \frac{\phi}{2} \right)^2 = 0,000314 \text{ m}^2$$

La velocità  $v$  [m/s] si ottiene, quindi, dalla seguente formula:

$$v = \frac{P}{S} \text{ [m/s]}$$

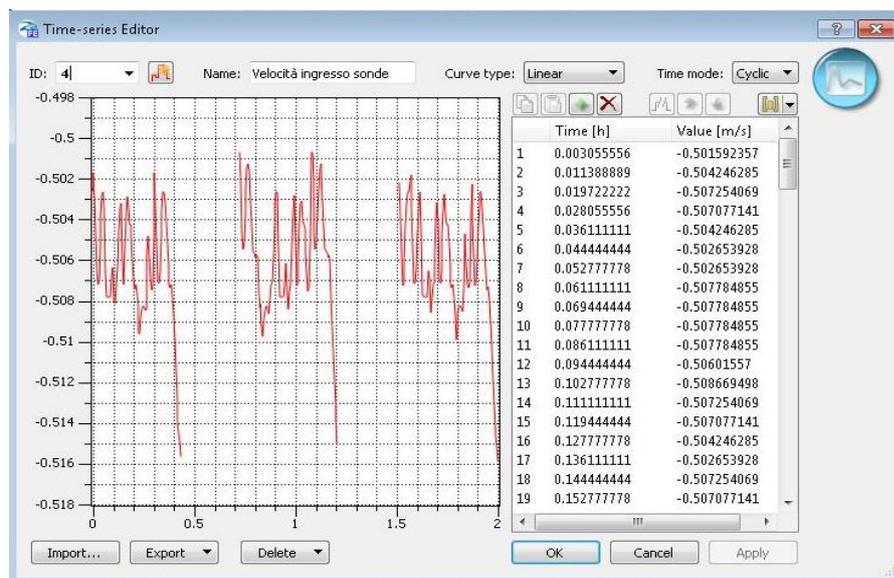


Figura 86 - Time-series velocità-ora

In Figura 87 viene riportato in dettaglio il circuito 2+3 durante la simulazione effettuata.

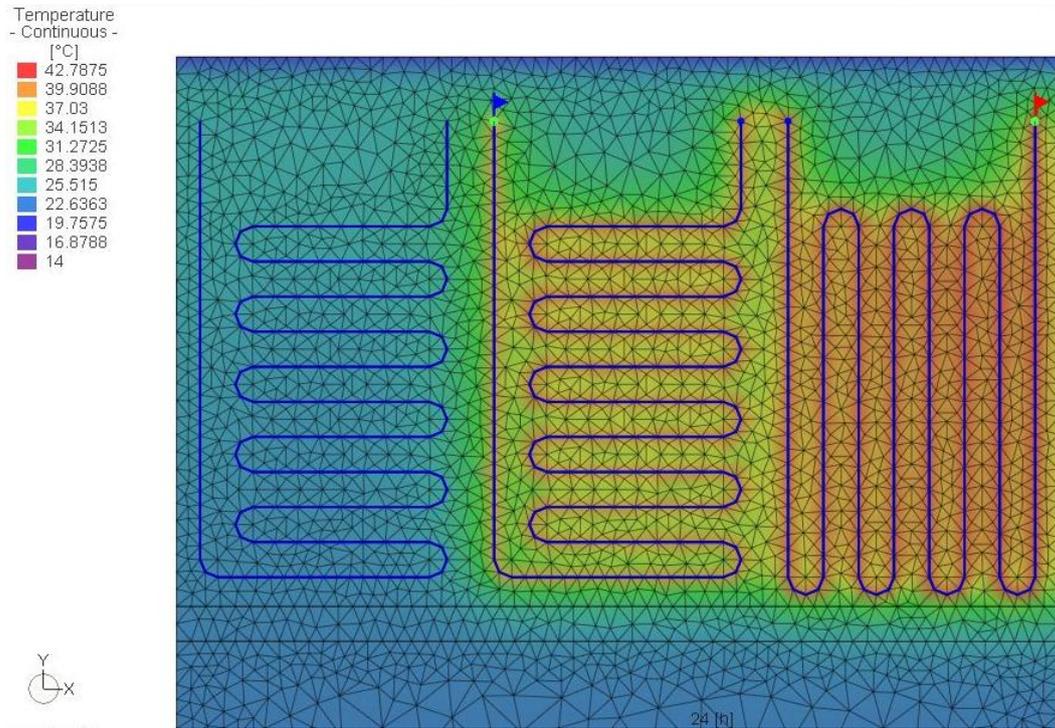


Figura 87 - Andamento delle temperature - Slice 9

In Figura 88 vengono riportati gli stessi risultati di temperatura, ma sul modello 3D, che ci permette di osservare meglio la variazione di temperatura e, quindi, lo scambio termico che avviene tra il sistema a sonde geotermiche e il terreno a contatto col muro.

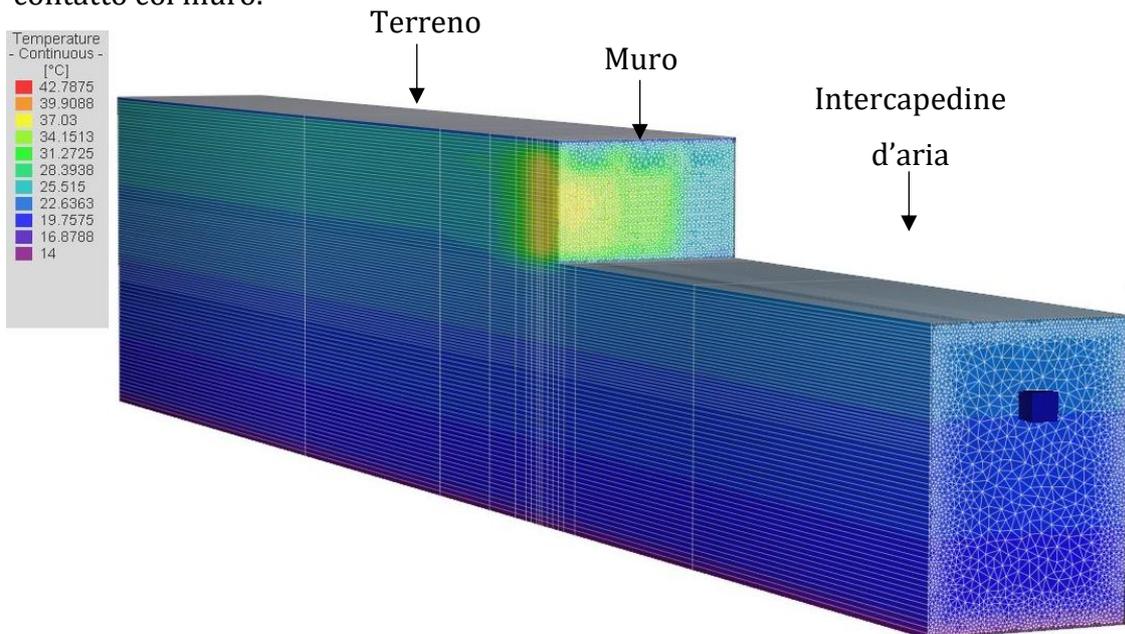


Figura 88 - Andamento delle temperature - Modello 3D

A differenza della simulazione *a*, è evidente come, aver associato ai nodi di ogni slice la funzione interpolante della temperatura in funzione della profondità, ha portato a dei risultati più affini a quelli della prova 1. È facilmente individuabile, inoltre, la porzione di terreno in cui avviene lo scambio termico; tuttavia, risulta interessante anche la variazione di temperatura presente nel muro e di conseguenza nell'intercapedine d'aria: anche il muro in calcestruzzo armato, infatti, subisce un aumento di temperatura, essendo a contatto con i circuiti a sonde geotermiche.

Nel grafico in Figura 89 sono riportate le temperature BT2 (di mandata all'impianto di sonde geotermiche) e BT3 (di ritorno del fluido riscaldante), ovvero i valori ottenuti dalla simulazione mediante FEFLOW.

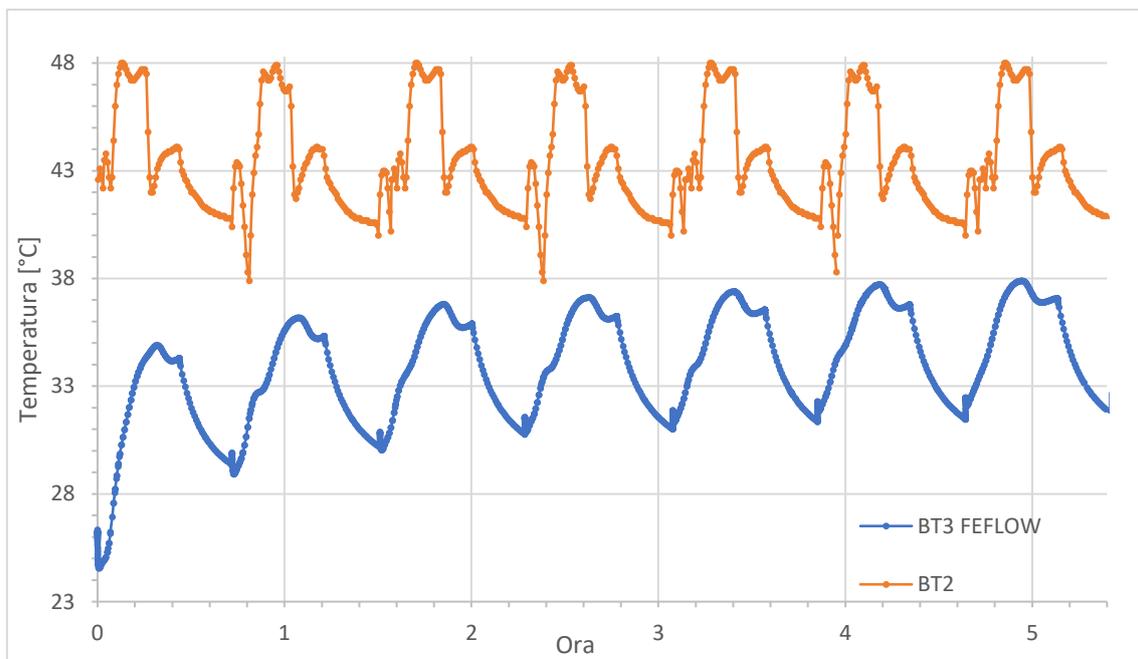


Figura 89 – Grafico BT2, BT3 simulazione *b*

Ciò che si evince dal grafico in Figura 89 è come, dopo il primo tratto crescente che corrisponde all'avviamento della modalità di raffreddamento, entrambe le curve tendano ad avere un andamento periodico. In particolare, è possibile analizzare un ciclo nel dettaglio (Figura 90) della durata di 47 min, a cui corrisponde un  $\Delta T_{max}$  pari a 10,88 °C.

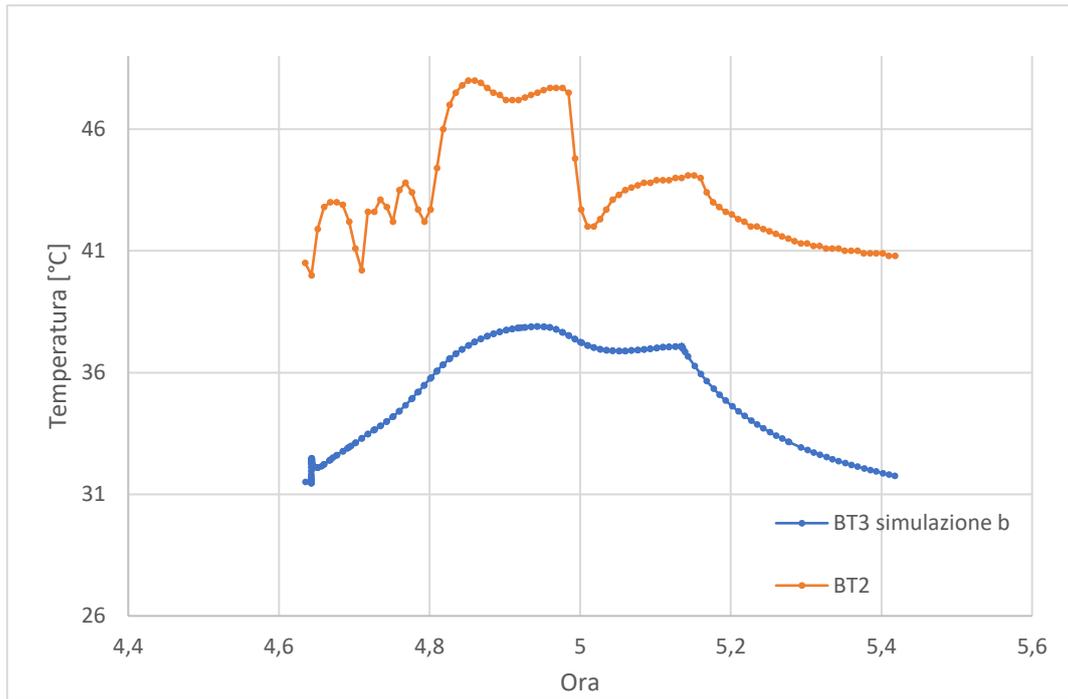


Figura 90 - Grafico ciclo BT2, BT3 simulazione b

#### 4.2.3.1 Quantificazione della potenza estraibile

La quantificazione della potenza estraibile è effettuata, come per la simulazione 1, tenendo conto della differenza di temperatura tra il fluido in ingresso nelle sonde (BT2) e il fluido in uscita (BT3). È possibile, quindi, determinare la potenza estraibile  $Q$  [kW] con la seguente formula:

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

dove:

- $\dot{m} = \rho_w \cdot v \cdot A$  [kg/s] è la velocità di flusso massica;
- $c$  [kJ/kgK] è il calore specifico dell'acqua;
- $\Delta T$  [°C] è la variazione di temperatura tra fluido entrante e uscente dalle sonde geotermiche.

In Tabella 17 sono riportati i dati necessari per effettuare il calcolo della potenza  $Q$  [kW].

$\rho_w$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	0,997
$v$ [m/s]	0,506
$A$ [m <sup>2</sup> ]	$3,14 \cdot 10^{-4}$
$\dot{m}$ [kg/s]	0,158
$c$ [kJ/kgK]	4,186
$\Delta T_{max}$ [°C]	10,88

Tabella 17 – Dati per il calcolo della potenza estraibile

La potenza estraibile massima  $Q_{max,b}$  [kW] vale:

$$Q_{max,b} = 7,20 \text{ kW}$$

Conoscendo la potenza estraibile durante l'intero ciclo e, tenendo conto che, durante la fase di scarica la portata è nulla, e di conseguenza anche la potenza, è possibile determinare un valore di potenza medio associato al singolo ciclo.

$$Q_{media,b} = 1,42 \text{ kW}$$

Essendo la lunghezza complessiva del circuito 2+3 pari a 57 m, è possibile riportare il valore della potenza media in W per m lineare come segue:

$$Q'_{media,b} = 24,07 \text{ W/m}$$

Analogamente a quanto ricavato dalla simulazione *a*, Il valore di potenza media estraibile  $Q''_{media,b}$  espressa in W per m<sup>2</sup> di area di contatto con la terra vale:

$$Q''_{media,b} = 61,74 \text{ W/m}^2$$

Infine, considerando la durata complessiva del ciclo in Figura 90 (47 min), è possibile determinare il quantitativo di energia  $E_b$  [kJ].

$$E_b = Q_{media} \cdot t_{ciclo} = 4004,4 \text{ kJ}$$

Il valore di energia ottenuto si può riferire, come nel caso della potenza estraibile, all'area di contatto col terreno:

$$E''_b = 174,10 \text{ kJ/m}^2$$

I risultati di questa simulazione *b* sono riassunti in Tabella 18:

	<b>Simulazione <i>b</i></b>
$Q_{max,b}$ [kW]	7,20
$Q_{media,b}$ [kW]	1,42
$Q'_{media,b}$ [W/m]	24,07
$Q''_{media,b}$ [W/m <sup>2</sup> ]	61,74

*Tabella 18 - Risultati simulazione b*

## CAPITOLO 5

### Conclusioni

In conclusione, i risultati ottenuti in questo lavoro di tesi dimostrano, ancora una volta, la sostenibilità ambientale e l'efficacia degli impianti geotermici, con l'auspicio di incoraggiare e promuovere l'impiego e l'ulteriore sviluppo di tale tecnologia.

In particolare, nel Capitolo 2 si affronta il tema della geotermia: disciplina delle scienze della Terra che studia l'insieme dei fenomeni naturali coinvolti nella produzione e nel trasferimento di calore proveniente dall'interno della Terra. Si elencano, quindi, le tipologie di energia geotermica esistenti in base al livello di entalpia e le modalità di sfruttamento ed utilizzo di tale risorsa, con particolare attenzione ai sistemi geotermici a bassa entalpia, che comprendono: sonde geotermiche verticali, sonde geotermiche orizzontali e geostrutture energetiche. È in quest'ultimo caso che si colloca la nostra parete energetica contro terra situata presso l'Energy Center (Torino). Il Capitolo 3 si occupa, quindi, della sua messa in opera, partendo dallo scavo realizzato, sino al posizionamento delle sonde geotermiche e della relativa sensoristica Winet (sensore di temperatura immergibile, barretta estensimetrica resistiva, cella di pressione, sentek drill & drop probe, misuratore di potenziale idrico). In seguito all'avvenuta installazione dell'impianto geotermico, esso è stato attivato attraverso due prove sperimentali di raffrescamento: la prova 1 ha visto l'utilizzo dei circuiti 2 e 3 in serie e la prova 2, invece, il solo circuito 3. Per entrambe le prove sono state ricavate le variazioni di temperatura  $\Delta T$  tra il fluido in ingresso e quello in uscita dalle sonde geotermiche,

e, quindi, la potenza estraibile espressa in W per m<sup>2</sup> di area di contatto col terreno. Nel Capitolo 4, invece, è stato proposto un modello numerico del suddetto sistema a sonde geotermiche, attraverso il software agli elementi finiti FEFLOW 6.2. In particolare, sono state condotte due simulazioni della prova 1 di raffreddamento: la simulazione a, effettuata attivando termicamente il terreno per 1,5 anni, in modo da raggiungere una situazione termica stabile, e la simulazione b, nella quale i dati di ingresso rispecchiano maggiormente il caso reale in termini di temperatura del terreno e di temperatura di ingresso dell'acqua nelle sonde geotermiche. Analogamente a quanto fatto per le prove sperimentali 1 e 2, dalle simulazioni effettuate a e b si sono ricavati i valori di potenza espressi in W per m<sup>2</sup> di area di contatto col terreno. In Tabella 19 sono riassunti i risultati ottenuti dalle prove sperimentali e dalle simulazioni mediante FEFLOW, al fine di poter effettuare un'ulteriore analisi e un confronto finale.

	<b>Prova 1</b>	<b>Prova 2</b>	<b>Simulazione a</b>	<b>Simulazione b</b>
Q <sub>max</sub> [kW]	6,67	4,33	1,36	7,20
Q <sub>media</sub> [kW]	0,69	0,32	1,36	1,42
Q' <sub>media</sub> [W/m]	12,11	10,99	23,86	24,07
Q'' <sub>media</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	29,99	28,14	59,13	61,74

Tabella 19 – Risultati di potenza estraibile

Come visto nel Paragrafo 2.7, a seconda della geostruttura energetica è possibile estrarre una certa quantità di energia (Barla et al., 2017): in particolare, nel caso di pareti (completamente incassate nel terreno) si dovrebbero ottenere valori compresi tra i 10 e i 50 W per m<sup>2</sup> di area di contatto con la terra. Si può dire che, sia per la prova 1 che per la prova 2, i valori di Q''<sub>media</sub> [W/m<sup>2</sup>] ottenuti sono compresi nell'intervallo atteso. In particolare, dalla prova 1 di raffreddamento, si ottiene una potenza di circa 30 W/m<sup>2</sup>, dalla prova 2, invece, un valore leggermente inferiore e pari a 28,14 W/m<sup>2</sup>. Si può dire che, facendo riferimento alla prova 1, ovvero all'utilizzo di due circuiti in serie, sicuramente i risultati sono soddisfacenti e dimostrano l'efficacia di collegare in serie due circuiti; tuttavia, anche i risultati della prova 2 risultano essere in linea con i primi. Bisogna però evidenziare come, nei

giorni di questa seconda prova, avviata il 23/09/2019, le temperature dell'aria di Torino, avevano subito una diminuzione rispetto a quelle nei giorni della prima prova. Di conseguenza, essendo un impianto geotermico superficiale, anche il terreno a contatto col muro ha risentito di questa variazione termica, portando dei risultati più che soddisfacenti per una prova di raffrescamento, ma allo stesso tempo poco significativi, viste le condizioni non perfettamente idonee per poterla effettuare. Infatti, come si può osservare dai dati in Tabella 20, ricavati dal portale ARPA Piemonte, la temperatura media dell'aria in corrispondenza della stazione termoigro-pluvioanemometrica TORINO - Via della Consolata, subisce una diminuzione di 6,4 °C tra l'inizio della prova 1 (16/09/2019) e quello della prova 2 (23/09/2019).

		<b>T<sub>min</sub></b>	<b>T<sub>max</sub></b>	<b>T<sub>media</sub></b>
<b>Inizio prova 1</b>	16/09/2019	18,7	30,6	24,4
	17/09/2019	19,1	30,8	24,5
	18/09/2019	18,1	28,6	22,8
	19/09/2019	15,8	18,7	17,5
	20/09/2019	16,2	20,8	18,2
	21/09/2019	15,1	22,1	17,8
	22/09/2019	14,2	18,6	16,3
<b>Inizio prova 2</b>	23/09/2019	14,3	22,9	18,0
	24/09/2019	13,3	23,5	17,8
	25/09/2019	14,4	25,1	19,3
	26/09/2019	15,7	24,0	19,0

*Tabella 20 – Dati giornalieri di temperatura dell'aria – Torino, ARPA Piemonte*

La conclusione che si può apprezzare dall'analisi della potenza scambiabile è, come prevedibile, che la soluzione più efficace è quella caratterizzata dall'utilizzo di due circuiti in serie (prova 1) in quanto in grado di ottenere un  $\Delta T$  tra il fluido in ingresso e quello in uscita dalle sonde geotermiche maggiore.

In aggiunta a ciò, dalle simulazioni mediante il software FEFLOW si ottengono valori positivi che dimostrano, ancora una volta, la funzionalità di un impianto a sonde

geotermiche. In particolare, dalla simulazione *a* si ottiene un unico valore di potenza estraibile significativo, ovvero quello ricavato al raggiungimento della condizione di pseudo-parallelismo tra la curva di temperatura di mandata all'impianto di sonde geotermiche, costante e pari a 30°C come valore indicativo, e la curva di temperatura di ritorno del fluido riscaldante (Figura 83). Tuttavia, per i risultati ottenuti dalla simulazione *a* e quelli della prova 1 non risulta particolarmente significativo effettuare un confronto: infatti, nel modello numerico è stata impostata una velocità di ingresso del fluido nelle sonde geotermiche costante e pari a 0,4 m/s; nel caso reale di studio, invece, la pompa di calore NIBE F1155 ha eseguito una serie di cicli (Figura 53), ottenendo una portata variabile durante la durata di tutta la prova.

Dalla simulazione *b*, invece, si ottengono risultati più in linea con quelli ottenuti dalla prova 1. Infatti, come dati di input nel software FEFLOW è stata inserita la *time-series* relativa alla temperatura di mandata all'impianto di sonde geotermiche, a differenza della temperatura costante nella simulazione *a*: ciò ha permesso di ottenere dei risultati confrontabili con quelli della prova 1. Nel diagramma in Figura 91 sono stati messi a confronto i valori di temperatura di ritorno dalle sonde ricavati dalla simulazione *b* con i valori di temperatura di ritorno derivanti direttamente dalla prova 1: entrambe le curve presentano un andamento ciclico che, dopo la prima fase crescente corrispondente all'attivazione della prova, tende a mantenere gli stessi valori nel tempo.

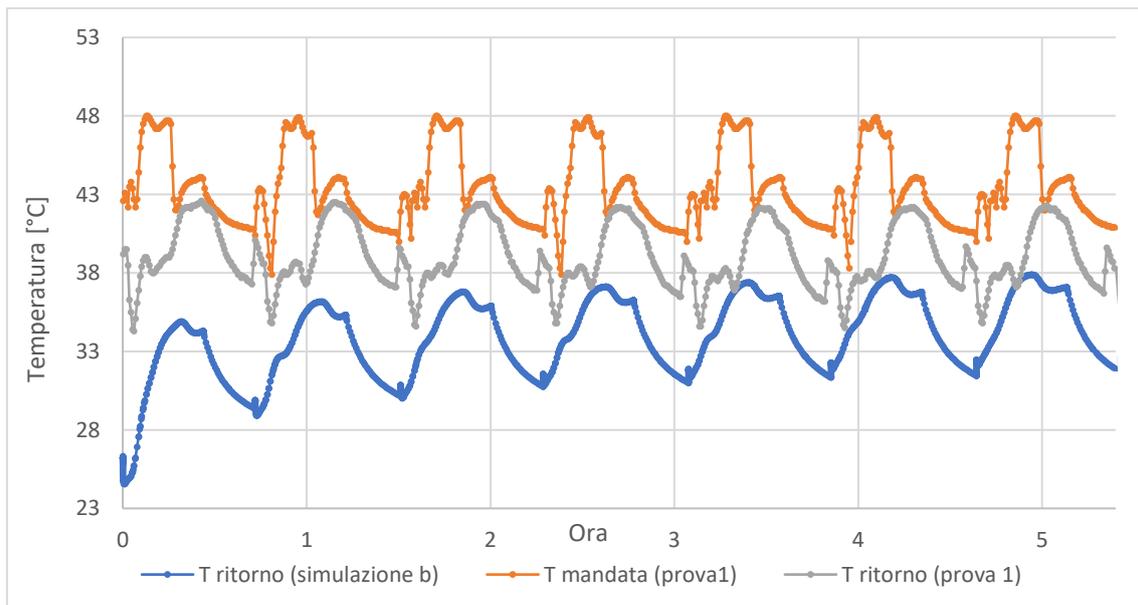


Figura 91 – Grafico T mandata, T ritorno (Prova 1- Simulazione b)

Tuttavia, è importante sottolineare come le due curve mantengano una differenza di  $\sim 4^{\circ}\text{C}$  durante il funzionamento dell'impianto geotermico, il che dimostra indubbiamente un'incertezza nel modello, dovuta ad esempio alla non perfetta coincidenza tra i parametri idraulici, idro-dispersivi e termici adoperati nel modello con quelli reali del terreno dell'Energy Center. Bisogna, infatti, tenere conto che, dopo le diverse fasi di reinterro, si potrebbero non ripristinare esattamente le condizioni iniziali del terreno prima dello scavo, bensì, la sua stratigrafia e la sua composizione potrebbero risultare differenti. In particolare, le lavorazioni del terreno possono ridurre il grado di compattamento e, di conseguenza, portare ad un incremento di porosità. A livelli maggiori di porosità corrispondono minori valori di conduttività termica, ovvero una minore capacità di trasferire il calore, sfavorendo le possibilità di utilizzo del terreno per applicazioni geotermiche. Infine, pur considerando la natura preliminare di questo studio, e quindi il livello di incertezza associato, ci si può rendere conto di come i W scambiati al  $\text{m}^2$  di area di contatto tra la parete energetica ed il terreno siano comunque soddisfacenti in termini di potenza estraibile da un impianto di raffrescamento geotermico.



## Riferimenti bibliografici

- Barla, M., Di Donna, A., & Amis t. (2017). *Energy geostructures: a collection of data from real applications*. Wuhan, China.
- Barla, M., Di Donna, A., & Baralis, M. (2018). *City-scale analysis of subsoil thermal conditions due to geothermal exploitation*. ICE publishing.
- Barla, M.; Barla, G. (2012). Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling, *Geomechanik und Tunnelbau 3* (Vol. 5), pp. 214-231.
- Bourne-Webb Peter (2013). *Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering*, Chapter 3, Observed response of energy geostructures, Wiley.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 81-122.
- Delmastro R., Noce G. (2011), *Manuale di geotermia a sonde verticali*, 5a edizione, Milano, Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2011, p 516.
- DHI-WASY (2010). *White papers Vol. V (FEFLOW)*.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *Cos'è la geotermia?* Pisa.
- Di Donna A., Cecinato F., Barla M., Loveridge F. (2016). "Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers", Proceedings of the Institution of Civil Engineering, ICE Publishing, London, UK.
- G. Buonasorte, R. Cataldi, T. Franci, W. Grassi, A. Manzella, M. Meccheri, G. Passaleva (2006). *Previsioni di crescita della geotermia in Italia fino al 2030 – per un nuovo manifesto della geotermia italiana*.
- METER ENVIRONMENT (2017). *TEROS 21 Manual Web*, NE Hopkins Court.
- Minchio F. & Basta S. (2008). *Geotermia e pompe di calore, Guida pratica agli impianti geotermici di climatizzazione*.

NIBE (2017). Manuale dell'installatore NIBE F1155 *Pompa di calore geotermica*, Sweden.

NIBE (2017). Manuale utente NIBE F1155 *Pompa di calore geotermica*, Sweden.

Sentek Pty Ltd (2014). *SENTEK DRILL & DROP Probe Manual Version 1.1*, Stepney, South Australia.

SIEMENS (2011). SITRANS F Energy calculator type SITRANS FUE950 *Operating instructions*.

W. Cui, K.A. Gawecka, D.M. Potts, D.M.G. Taborda & L. Zdravković (2016). *Numerical analysis of coupled thermo hydraulic problems in geotechnical engineering*, Imperial College London, London.

Winet s.r.l (2017). Winet Coordinator Node, Cesena, Italy.

Winet s.r.l (2017). Winet Router Node, Cesena, Italy.