POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Attivazione termica di muri contro terra

Relatori

Prof. Marco Barla

Ing. Matteo Baralis

Candidato

Nikola Ilievski

Aprile 2019

Alla mia famiglia

Sommario

CAPITOLO 1 13
Introduzione 13
1.1 Obiettivi 14
1.2 Struttura della tesi 15
CAPITOLO 2 17
Geotermia 17
2.1 Energia geotermica 17
2.2 Geotermia a bassa entalpia 19
2.2.1 Influenza dell'atmosfera sul terreno 20
2.3 Pompa di calore 21
2.3.1 Schema di funzionamento di una pompa di calore 24
2.3.2 Pompa di calore geotermica 25
2.4 Sonde geotermiche 26
2.4.1 Tubazioni 26
2.4.2 Fluidi termovettori 27
2.4.3 Impianti a circuito aperto 28
2.4.4 Impianti a circuito chiuso 28
2.4.4.1 sistema a sonde orizzontali 29
2.4.4.2 sistemi a sonde verticali 30
2.4.4.3 Minicollettori 32
2.4.4.4 Espansione diretta 32
2.5 Geostrutture energetiche 33
2.5.1 Applicazioni 35
2.5.2 Gallerie energetiche: ENERTUN 36
2.5.3 Ruolo delle condizioni del terreno sulle gallerie energetiche 38
2.5.4 Esempi di muri energetici 40
2.5.4.1 Bvlgari Hotel, londra – regno unito (amis et al., 2010) 41
2.5.4.2 Vienna metro line u2 – austria (brandl, 2006-2016) 42
2.5.5 Pannelli radianti 43
CAPITOLO 3 45
Configurazioni di attivazione termica 45
3.1 Caratterizzazione termica del sottosuolo e delle sonde 45
3.2 Muri di sostegno 47
3.3 Parcheggi sotterranei 49

3.4 Esecuzione di un'opera civile 51
3.5 Attivazione termica 52
3.5.1 Layout sonde geotermiche 54
3.5.2 Installazione dell'impianto 55
CAPITOLO 4 57
Simulazione numerica del muro attivato termicamente 57
4.1 Il software agli elementi finiti FEFLOW 57
4.1.1 Problema termo-idraulico: equazioni 58
4.1.2 Condizioni al contorno 60
4.2 Realizzazione del modello numerico 61
4.2.1 Geometria del problema 61
4.2.2 Generazione del modello 3D 65
4.3 Parametri dei materiali 69
4.4 Condizioni al contorno e condizioni iniziali 72
4.4.1 Simulazione temperatura del terreno prima dell'attivazione delle serpentine 73
4.5 Attivazione delle sonde geotermiche 80
4.5.1 Condizione Satura 81
4.5.1.1 Caso 1 – disposizione a prevalenza verticale 81
4.5.1.2 Caso 2 – disposizione a prevalenza orizzontale 84
4.5.2 Condizione Non Satura 88
4.5.2.1 Caso 1 – Disposizione a prevalenza verticale 88
4.5.2.2 Caso 2 – disposizione a prevalenza orizzontale 91
4.5.3 Condizione in Presenza di flusso di falda 95
4.5.3.1 Caso 1 – disposizione a prevalenza verticale 95
4.5.3.2 Caso 2 – disposizione a prevalenza orizzontale 99
4.6 Quantificazione della potenza estraibile nei casi considerati 102
CAPITOLO 5 109
Il campo sperimentale dell'Energy Center 109
5.1 Generazione del modello numerico 110
5.2 Parametri dei materiali 113
5.3 Condizioni al contorno e condizioni iniziali 115
5.3.1 Simulazione temperatura del terreno prima dell'attivazione delle serpentine 115
5.4 Attivazione delle sonde geotermiche 117
5.5 Quantificazione della potenza estraibile nei casi considerati 120
CAPITOLO 6 123
Conclusioni 123

Riferimenti bibliografici 127
Allegati 129

Indice delle figure

Figura 1 Quota di energia da fonti rinnovabili, 2004 e 2016(in % del consumo finale lordo di energia) Fonte: Eurostat (t202031) 13
Figura 2 Stratificazione del pianeta Terra 18
Figura 3 Schema di funzionamento di una centrale geotermoelettrica 18
Figura 4 Andamento teorico della temperatura del sottosuolo in un anno 21
Figura 5 Classificazione delle pome di calore (Fonte ASHRAE) 22
Figura 6 Schema di funzionamento della pompa di calore 24
Figura 7 Funzionamento di un sistema a sonde orizzontale 29
Figura 8 Configurazione di posa per sonde geotermiche a sviluppo orizzontale (fonte ASHRAE) 30
Figura 9 Funzionamento di un sistema a sonde orizzontale 31
Figura 10 Applicazione di un'attivazione termica 35
Figura 11 Concio energetico ENERTUN 37
Figura 12 Effetti della temperatura sulla efficienza energetica: (a) modalità invernale e (b) modalità estiva (Di Donna e Barla, 2015) 38
Figura 13 Effetti della velocità di flusso della falda sull'efficienza della geostruttura energetica: (a) modalità invernale e (b) modalità estiva (Di Donna e Barla, 2015) 39
Figura 14 Effetti della conducibilità termica sull'efficienza della geostruttura energetica: (a) modalità invernale e (b) modalità estiva (Di Donna e Barla, 2015) 39
Figura 15 Palo di fondazione (a sinistra) e diaframma (a destra) (Sun et al., 2013) 40
Figura 16 a sinistra una configurazione delle serpentine nel pannello. a destra una sezione del panello e del muro con la configurazione geotermica delle serpentine 41
Figura 17 Sezione tipica della linea U2 della metropolitana viennese. (Brandl,2006) 42
Figura 18 Costruzione di un muro di sostegno 47
Figura 19 Esempio di parcheggio sotteraneo 49
Figura 20 Particolare costruttivo di un muro contro terra 52
Figura 21 Possibili configurazioni degli impianti 54
Figura 22 Configurazioni delle serpentine 54
Figura 23 Serie di pannelli lungo le fondazioni di una struttura 55
Figura 24 Rappresentazione schematica del problema termo-idro-meccanico 57
Figura 25 Geometria del modello benchmark 61
Figura 26 Vista laterale del modello 62
Figura 27 Modello 3D 63
Figura 28 caso 1 generazione della mesh 63
Figura 29 caso 2 generazione della mesh 64
Figura 30 Particolare della generazione della mesh caso 1 e caso 2 64
Figura 31 Tempi e passi di simulazione 65
Figura 32 Impostazioni della direzione di gravità e trasporto di calore 65
Figura 33 Creazione del modello 3D 66
Figura 34 Caso 1 vista 3D 67
Figura 35 Caso 2 Vista 3D 67
Figura 36 Particolare aria/muro/terreno 68
Figura 37 Banca dati meteorologica temperature mensili 74
Figura 38 Grafico annuale per la stazione Torino giardini reali 74
Figura 39 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ=0,9 saturo 75
Figura 40 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ=2,26 saturo 76
Figura 41 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ=3,9 saturo 76

Figura 42 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ_s=0,9 W/mK e λ_f=0 W/mK non saturo 77
Figura 43 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ_s=2,26 W/mK e λ_f=0 W/mK non saturo 78
Figura 44 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ_s=3,9 W/mK e λ_f=0 W/mK non saturo 78
Figura 45 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ_s=0,9 W/mK e v=2,4m/g 79
Figura 46 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ_s=2,26 W/mK e v=2,4m/g 79
Figura 47 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ_s=3,9W/mK e v=2,4m/g 80
Figura 48 Attivazione estiva in condizione di terreno saturo caso 1 con temperatura esterna 81
Figura 49 Attivazione invernale in condizione di terreno saturo caso 1 con temperatura esterna 82
Figura 50 Attivazione estiva caso 1 in condizione di terreno saturo 82
Figura 51 Attivazione invernale caso 1 in condizione di terreno saturo 83
Figura 52 Attivazione estiva in condizione di terreno saturo caso 2 con temperatura esterna 85
Figura 53 Attivazione invernale in condizione di terreno saturo caso 2 con temperatura esterna 85
Figura 54 Attivazione estiva caso 2 in condizione di terreno saturo 86
Figura 55 Attivazione invernale caso 2 in condizione di terreno saturo 86
Figura 56 Attivazione estiva caso 1 in condizione di terreno non saturo con temperatura esterna 88
Figura 57 Attivazione estiva caso 1 in condizione di terreno non saturo con temperatura esterna 89
Figura 58 Attivazione estiva caso 1 condizione di terreno non saturo 89
Figura 59 Attivazione invernale caso 1 condizione di terreno non saturo 90
Figura 60 Attivazione estiva caso 2 in condizioni di terreno non saturo con temperatura esterna 92
Figura 61 Attivazione invernale caso 2 in condizioni di terreno non saturo con temperatura esterna .. 92
Figura 62 Attivazione estiva caso 2 in condizioni di terreno non saturo 93
Figura 63 Attivazione invernale caso 2 in condizioni di terreno non saturo 93
Figura 64 Attivazione estiva caso 1 falda in movimento con temperatura esterna 96
Figura 65 Attivazione invernale caso 1 falda in movimento con temperatura esterna 96
Figura 66 Attivazione estiva caso 1 falda in movimento 97
Figura 67 Attivazione invernale caso 1 falda in movimento 97
Figura 68 Attivazione estiva caso 2 falda in movimento con temperatura esterna 99
Figura 69 Attivazione invernale caso 2 falda in movimento con temperatura esterna 99
Figura 70 Attivazione estiva caso 2 falda in movimento 100
Figura 71 Attivazione estiva caso 2 falda in movimento 100
Figura 72 Energy center 109
Figura 73 Campo sperimentale dell'Energy Center contesto generale e sezione 110
Figura 74 Geometria del modello Energy Center caso 1 a sinistra e caso 2 a destra 111
Figura 75 energy center generazione della mesh 111
Figura 76 Particolare delle discrete features 112
Figura 77 Energy Center vista 3D 112
Figura 78 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=14°C e λ_s=2,8 W/mK 116
Figura 79 Attivazione estiva del caso di studio con temperatura esterna 117
Figura 80 Attivazione invernale del caso di studio con temperatura esterna 118
Figura 81 Attivazione estiva del caso di studio 118
Figura 82 Attivazione invernale del caso di studio 119
Figura 83 Efficienza energetica in modalità estiva delle configurazioni a prevalenza verticale 123

Figura 84 Efficienza energetica in modalità estiva delle configurazioni a prevalenza orizzontale..... 124
Figura 85 Efficienza energetica in modalità invernale delle configurazioni a prevalenza verticale ... 125
Figura 86 Efficienza energetica in modalità invernale delle configurazioni a prevalenza orizzontale 125

Indice delle tabelle

Tabella 1 Parametri del terreno 70
Tabella 2 Parametri dell'aria 70
Tabella 3 Parametri del calcestruzzo 70
Tabella 4 Parametri delle tubazioni 71
Tabella 5 Conducibilità termica terreno (modello benchmark) Configurazione 1 Saturo 71
Tabella 6 Conducibilità termica terreno (modello benchmark) Configurazione 2 Non saturo 71
Tabella 7 Benchmark Caso 1 saturo con λ_f=0,65 W/mK, ΔT al trentesimo giorno di funzionamento . 84
Tabella 8 Benchmark Caso 2 saturo con λ_f=0,65 W/mK, ΔT al trentesimo giorno di funzionamento . 87
Tabella 9 Benchmark Caso 1 non saturo con λ_f=0, ΔT al trentesimo giorno di funzionamento 91
Tabella 10 Benchmark Caso 2 non saturo con λ_f=0, ΔT al trentesimo giorno di funzionamento 94
Tabella 11 Benchmark Caso 1 falda in movimento ΔH=0,1m, ΔT al trentesimo giorno di funzionamento 98
Tabella 12 Benchmark Caso 2 falda in movimento ΔH=0,1m, ΔT al trentesimo giorno di funzionamento 101
Tabella 13 Valori per il calcolo della potenza estraibile 102
Tabella 14 Benchmark Caso 1 saturo con λ_f=0,65, potenza estraibile e ricavo 103
Tabella 15 Valori caratteristici per il calcolo dell'efficienza del modello benchmark 104
Tabella 16 Benchmark Caso 2 saturo con λ_f=0,65, potenza estraibile e ricavo 104
Tabella 17 Benchmark Caso 1 non saturo con λ_f=0, potenza estraibile e ricavo 105
Tabella 18 Benchmark Caso 2 non saturo con λ_f=0, potenza estraibile e ricavo 106
Tabella 19 Benchmark Caso 1 falda in movimento ΔH=0,1m, potenza estraibile e ricavo 107
Tabella 20 Benchmark Caso 2 falda in movimento ΔH=0,1m, potenza estraibile e ricavo 108
Tabella 21 Parametri del terreno 113
Tabella 22 Parametri dell'aria 113
Tabella 23 Parametri del calcestruzzo 114
Tabella 24 Parametri delle tubazioni 114
Tabella 25 Conducibilità termica terreno (modello reale dell'energy center) 114
Tabella 26 caso reale di studio valori di riferimento relativi al trentesimo giorno di funzionamento 119
Tabella 27 Valori per il calcolo della potenza estraibile 120
Tabella 28 Caso reale di studio potenza estraibile e ricavo 121
Tabella 29 Valori caratteristici per il calcolo dell'efficienza del modello benchmark 121

Appendice

Figura X. 1 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=12°C e λ=0,9 129
Figura X. 2 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=12°C e λ=2,26 129
Figura X. 3 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=12°C e λ=3,9 130
Figura X. 4 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=16°C e λ=0,9 130
Figura X. 5 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=16°C e λ=2,26 131
Figura X. 6 Andamento della temperatura nel terreno per 10 anni con T=16°C e λ=3,9 131

CAPITOLO 1

Introduzione

Le fonti di energia rinnovabili vengono utilizzate per poter garantire una riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Garantiscono una diversificazione dell'approvvigionamento energetico e riducono la domanda sempre più forte dai mercati dei combustibili fossili (come ad es. petrolio e gas). Queste fonti di energie giovano alla vita dell'uomo e soprattutto all'ambiente che lo circonda. Ogni giorno le energie "green" sono sempre più consolidate e il loro impatto ambientale è quasi inesistente.

Negli ultimi anni la crescita dell'energia rinnovabile nell'UE è stata notevole, sul consumo finale lordo di energia, la quota di energia da fonti rinnovabili è quasi raddoppiata nell'arco degli ultimi anni, passando da un 8,5% nel 2004 al 17,0% nel 2016 (Eurostat).

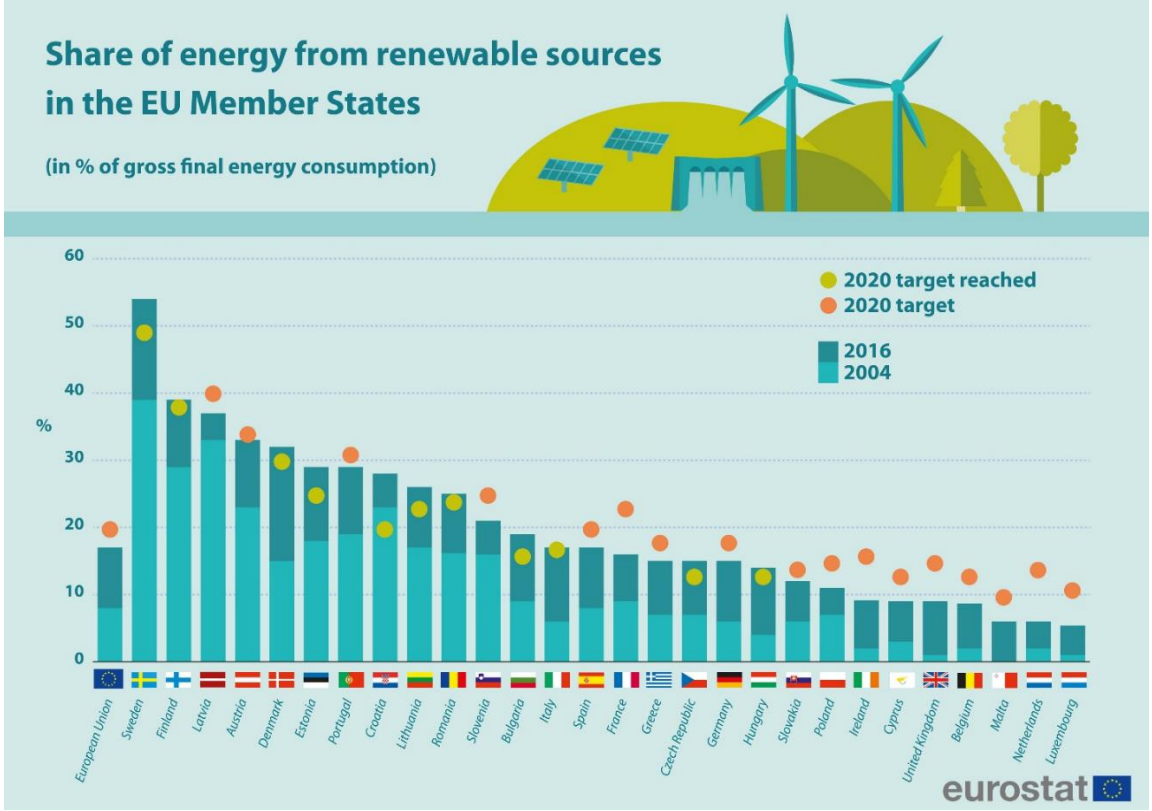


FIGURA 1 QUOTA DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI, 2004 E 2016(IN % DEL CONSUMO FINALE LORDO DI ENERGIA) FONTE: EUROSTAT (T202031)

La quota di energia da fonti rinnovabili è suddivisa in tre parti diverse: (Eurostat)

- Energia elettrica
- Settore del riscaldamento e raffreddamento
- Trasporti

Nel 2016, nell'UE-28, le energie rinnovabili rappresentavano il 19,1% del consumo totale di energia per il settore del riscaldamento e raffreddamento. Si tratta di un aumento significativo rispetto al 10,3% del 2004. Gli aumenti dei settori industriali, dei servizi e dell'uso residenziale (settore della costruzione) hanno contribuito a questo sviluppo. Si tiene conto dell'energia da calore aerotermico, geotermico e idrotermale catturata da pompe di calore, sulla base di quanto riportato dagli Stati membri. (Eurostat)

Il GSE (Gestore dei servizi energetici) mostra nei propri dati l'evoluzione del contributo geotermico al mix energetico nazionale: la geotermia rappresenta il 6% di tutte le rinnovabili elettriche italiane (era al 9% nel 2005) e l'1% di quelle termiche (rispetto al 4% del 2005). Sono le peculiarità dei territori a rendere possibile l'utilizzo di una fonte di energia rinnovabile piuttosto che un'altra. Per questo gli impianti geotermoelettrici -notano al GSE- si sviluppano esclusivamente nella Regione Toscana, dove vi sono determinate caratteristiche del calore endogeno utilizzabili per la produzione di energia elettrica. Dalla Toscana infatti arriva il 44% del consumo di energia termica da geotermia sul totale nazionale, dal Veneto il 27,2% e dalla Campania il 7,7%. L'Italia è il terzo Paese in Europa per consumi di energia da fonti rinnovabili; rispetto agli altri Paesi. In Italia si rilevano consumi elevati di energia rinnovabile da pompe di calore (utilizzo invernale), da risorsa geotermica e da fonte solare per la produzione di energia elettrica (fotovoltaico). (Eurostat,2016)

1.1 Obiettivi

I dati introduttivi riflettono la situazione e lo sviluppo del rinnovabile. In questo lavoro si studierà l'attivazione termica dei muri contro terra, offrendo così un sistema verde e rinnovabile, collegato a una pompa di calore, funzionante sia per il raffreddamento che per il riscaldamento di strutture in adiacenza ai suddetti muri. Si parlerà pertanto di geostrutture energetiche, le quali nel caso in esame saranno molto superficiali. Il lavoro si concentrerà maggiormente sullo studio delle possibili configurazioni geometriche delle serpentine e la loro efficienza. Le serpentine sono tubi di determinate caratteristiche meccaniche e termiche dentro i quali passa il fluido termovettore. Il principio sul quale si basa l'intero meccanismo è la geotermia a bassa entalpia.

Verrà analizzato come massimizzare l'apporto di energia tramite la pompa di calore attraverso il miglior posizionamento delle sonde. Verrà studiato come avviene la trasmissione di calore tra fluido termovettore e terreno. Ci si focalizzerà sulle tipologie di fluido termovettore, sugli antigelo e sulle proprietà termiche del terreno. Si studieranno vari casi di strutture contro terra e su come utilizzarli termicamente oltre che strutturalmente. Il lavoro svolto si focalizzerà sulla dipendenza tra l'efficienza del sistema in funzione della conducibilità solida del terreno. Verrà fatta variare anche la temperatura esterna in modo da poter studiare più casi possibile.

1.2 Struttura della tesi

Dopo una fase introduttiva sull'energia rinnovabile, nel secondo capitolo verranno trattati i concetti base della geotermia e principalmente si parlerà delle differenti tipologie di impianto, delle principali tipologie di scambiatori di calore utilizzati e si affronterà il discorso del funzionamento di una pompa di calore. Ci si concentrerà sulle sonde geotermiche sia dal punto di vista strutturale che termico, ponendo particolare attenzione sulla modalità di funzionamento. La pompa di calore ricopre un ruolo fondamentale per il corretto funzionamento delle serpentine, pertanto verrà aperta una breve parentesi sul suo funzionamento. A chiusura di questo capitolo saranno proposti alcuni esempi di geostrutture energetiche sia nel mondo che in Italia, spendendo qualche parola sul caso ENERTUN di Torino.

Nel terzo capitolo verrà affrontato l'argomento relativo all'interazione tra le strutture e il terreno e si parlerà di come vengono costruiti i muri di sostegno e i parcheggi sotterranei. Fondamentalmente verranno mostrati dei casi possibili dove si è in presenza di superfici murarie a contatto con la terra di dimensioni sufficienti per poter applicare l'impianto in esame.

Il quarto capitolo è quello relativo alla modellazione sul software Feflow, all'attivazione del terreno e all'attivazione delle serpentine. Verranno mostrati i diversi grafici ottenuti attraverso la variazione di diversi parametri come temperatura esterna e conducibilità fluida e solida del terreno. Ci si concentrerà sulla potenza ottenuta e sui costi di realizzazione dell'opera con annessi i ricavi provenienti dalla stessa. Verrà studiato il modello benchmark con le due configurazioni possibili e si studierà i risultati ottenuti.

Il quinto capitolo riprende lo stesso layout del quarto capitolo concentrando l'attenzione sul caso di studio reale, ovvero quello riferito all'Energy Center. In questo caso verranno studiate sempre due configurazioni possibili dell'impianto ma sapendo che l'edificio è posizionato in un luogo ben definito, le simulazioni da eseguire saranno meno rispetto a quelle del modello benchmark.

Nel sesto capitolo verranno affrontate le tematiche relative a quale è la scelta migliore da effettuare, dove è consigliabile installare la geostruttura analizzata e il layout migliore da utilizzare per ottenere la massima efficienza dal sistema studiato. Verranno messi a confronto i risultati permettendo così di scegliere e capire la configurazione migliore.

CAPITOLO 2

Geotermia

2.1 Energia geotermica

La geotermia studia la produzione e il trasferimento di calore proveniente naturalmente dall'interno della terra.

Il pianeta Terra composto dal nucleo, dal mantello e dalla crosta terreste contiene al suo interno degli elementi radioattivi come l'uranio, il torio e il potassio. Questi elementi radioattivi, a causa dei processi naturali di decadimento nucleare, generano dell'energia termica. Attraverso l'energia termica e adottando i principi della geotermia si sfrutta il calore naturale della Terra (gradiente geotermico) ottenendo così una forma di energia alternativa e rinnovabile. La geotermia industrialmente fu utilizzata per la prima volta a Larderello, in Toscana, il 4 luglio 1904 quando venne utilizzata per produrre l'elettricità. L'energia geotermica può essere utilizzata sia come fonte di energia elettrica che come fonte di calore attraverso il processo di cogenerazione. Ad oggi l'energia geotermica costituisce meno del'1% della produzione mondiale di energia, nonostante sia stato dimostrato, secondo uno studio del MIT, che solo con il geotermico si potrebbe soddisfare il fabbisogno energetico planetario per i prossimi 4000 anni, abbandonando cosi completamente ogni altra fonte di energia non rinnovabile.

Il pianeta Terra (Figura 2) aumenta la sua temperatura verso l'interno. Il nucleo esterno, liquido, ha una temperatura di 3000°C mentre il nucleo interno, viscoso, è caratterizzato da una temperatura pari a 5400°C. La temperatura aumenta mediamente di circa 30 °C per km nella crosta terreste mentre per il mantello questa crescita è pressoché uguale. Nel nucleo il gradiente geotermico è di 80 °C ogni 100 km. Per poter usare ed estrarre il calore imprigionato nella Terra si devono individuare le zone con un'anomalia termica positiva. Questa anomalia termica fornisce una concentrazione di calore terrestre che prende il nome di serbatoio o giacimento geotermico. I fluidi a bassa temperatura vengono principalmente utilizzati per il riscaldamento di case, mentre i fluidi ad alte temperature vengono impiegati per ottenere energia elettrica.

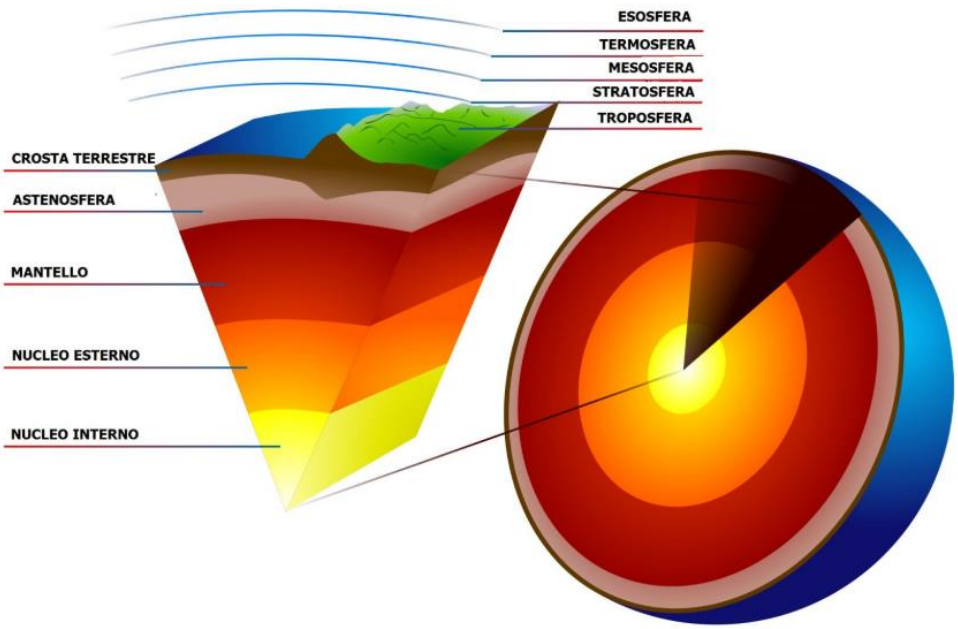


FIGURA 2 STRATIFICAZIONE DEL PIANETA TERRA

Il 4 luglio 1904, a Larderello, fu sperimentato il primo generatore geotermico che fece funzionare quattro lampadine ad opera di Piero Ginori Conti. Nel 1911, sempre a Larderello, fu costruito il primo impianto geotermico e solo nel 1958, dunque 47 anni dopo, ne fu costruito uno secondo nella Nuova Zelanda, nazione che nel 2012 ha prodotto una quantità di energia elettrica geotermica pari a 594 MWh.

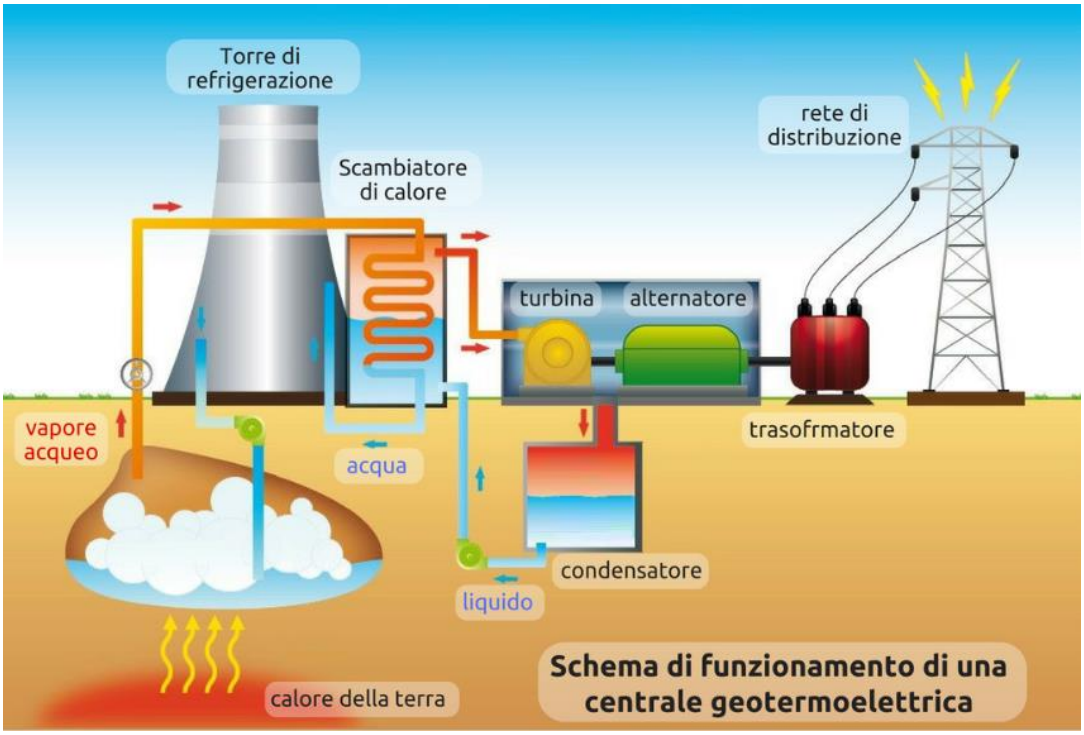


FIGURA 3 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DI UNA CENTRALE GEOTERMOELETTRICA

Nel 1852 fu inventata la prima pompa di calore da Lord Kelvin e nel 1912 Heinrich Zoelly brevettò la sua applicazione per l'estrazione del calore dalla terra.

Al giorno d'oggi il rendimento delle centrali elettriche geotermiche di media/bassa entalpia è pari al 10-23%. Questo è determinato dall'incapacità dei fluidi geotermici a raggiungere le alte temperature del vapore delle caldaie. I generatori di elettricità che si basano sullo sfruttamento di una fonte di calore, a causa delle leggi sulla termodinamica, hanno una limitazione sull'efficienza dei motori termici ad estrarre energia utile.

Le sorgenti geotermiche possono essere di tre diverse tipologie:

- Sorgenti idrotermiche
- Sorgenti geopressurizzate
- Sorgenti petrotermiche

Le centrali geotermiche sfruttano il calore geotermico attraverso il flusso di vapore proveniente dal sottosuolo. Il vapore proveniente dal sottosuolo può essere canalizzato tramite una perforazione geologica oppure in maniera libera. Questo flusso di vapore che fuoriesce produce una forza e questa forza muove una turbina. Tramite un alternatore si trasforma in elettricità l'energia meccanica generata dalla turbina. Nel caso di sistema geotermico a vapore dominante (accumuli di vapore formati dall'alta temperatura) si ha che l'energia geotermica può essere utilizzata per produrre energia elettrica. Mentre nel caso di sistema ad acqua dominante (il fluido non raggiunge una temperatura sufficientemente elevata), l'acqua può essere usata per la produzione di calore, ad esempio in impianti di teleriscaldamento.

2.2 Geotermia a bassa entalpia

La geotermia a bassa entalpia sfrutta il principio della temperatura costante che il terreno presenta lungo tutto il corso dell'anno. Il sottosuolo, rappresentato iconicamente da un serbatoio di calore, immagazzina il calore a seconda della stagione annuale di riferimento. Nei mesi estivi, pertanto, il calore viene trasferito nel terreno contrariamente a quanto accade nelle stagioni invernali, dove il calore viene trasferito dal terreno in superficie. Il meccanismo con cui si fa leva è la pompa di calore.

Il principio attraverso il quale è messa in funzione la pompa di calore è la differenza di temperatura che esiste in natura tra il terreno e l'esterno. Questa differenza varia in funzione alla localizzazione del sito in cui viene realizzata l'opera e delle condizioni climatiche, in alcuni punti ad 1 metro di profondità si possono già avere 10-15°C. Il rendimento della pompa di calore migliora all'aumentare del gradiente termico ovvero della differenza di temperatura tra terreno ed esterno. Esistono diverse metodologie utilizzate per produrre l'energia necessaria ad alimentare la pompa di calore, una modalità è un altro sistema "green". Questa potrebbe essere prodotta da un impianto fotovoltaico rendendo così l'impatto ambientale ancor più compatibile ed energicamente autosufficiente. Il funzionamento diretto della pompa di calore garantisce un riscaldamento degli edifici nel periodo invernale, mentre invertendo la pompa di calore si

possono raffrescare gli edifici d'estate. Nel caso estivo si assorbe il calore dalla superficie e lo si trasferisce al sottosuolo. Il vantaggio della pompa di calore nell'utilizzo sia invernale che estivo impedisce un raffreddamento della zolla di terreno interessata dal posizionamento delle sonde. L'energia termica, che viene ricavata dal sistema geotermico a bassa entalpia, è impiegata maggiormente per l'acqua calda sanitaria e per il riscaldamento degli edifici.

Le pompe di calore geotermiche sono il sistema di climatizzazione più efficiente, più conveniente economicamente e meno inquinante, secondo i dati dell'agenzia di protezione ambientale statunitense (EPA). Un impatto ambientale di entità più o meno grave è un eventuale fuoriuscita del refrigerante della pompa di calore. I fluidi attualmente utilizzati (HFC), al posto dei vecchi CFC aboliti a causa del loro effetto di alterazione dell'ozono, hanno un elevato potere di effetto serra (GWP). Le pompe di calore impiegano però limitati quantitativi di refrigerante e l'impatto ambientale è marginale. Vi è un'altra tipologia di impatto ambientale derivante dalle attivazioni termiche, si parla in questo caso del fluido termovettore delle sonde geotermiche, anche in questo caso a causa delle modeste quantità utilizzate e dei fluidi a bassa tossicità, l'impatto ambientale è quasi trascurabile.

I bassi costi di mantenimento dell'impianto, messi a confronto con gli alti costi dell'attivazione, identificano le geostrutture energetiche come un investimento a medio-lungo termine di carattere redditizio. Il reso dei costi di investimento viene stimato su un periodo di ritorno di 10 anni, periodo variabile a seconda di: dimensioni dell'installazione, costi di installazione, costi dell'energia elettrica e dei combustibili fossili, incentivi, finanziamenti agevolati e sgravi fiscali.

2.2.1 Influenza dell'atmosfera sul terreno

La temperatura del terreno può essere descritta secondo la seguente formulazione:

$$T = T_1 + Ae^{-\beta x}\sin(\omega t - \beta x)$$

Dove:

- periodo $2\pi/\omega$ → è lo sfasamento giorno/notte o estate/inverno per il terreno
- T_1 → valore medio della temperatura
- A → semi ampiezza dell'oscillazione di temperatura nel periodo
- x → è la profondita
- β → smorzamento $\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} = \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}}$
    - α è la diffusività termica del terreno $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$

La diffusività termica del terreno è legata direttamente ai parametri di capacità massica, massa volumica e conducibilità termica.

Lo smorzamento dell'onda è tanto maggiore quanto più:

- È alta la capacità termica massica;
- È alta la frequenza di oscillazione delle temperature in atmosfera;
- È bassa la conducibilità termica;
- È bassa la diffusività.

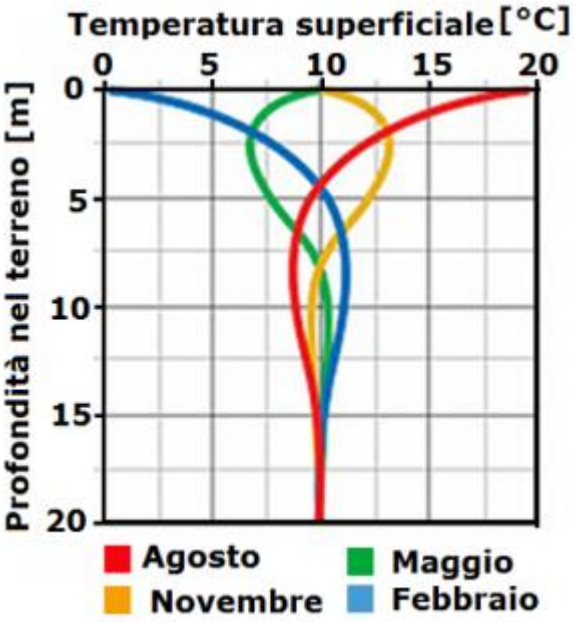


FIGURA 4 ANDAMENTO TEORICO DELLA TEMPERATURA DEL SOTTOSUOLO IN UN ANNO

La Figura 4 rappresenta il profilo termico di un terreno ideale in funzione della profondità. La trasmissione del calore in questo caso ideale avviene solo per via conduttiva e il terreno è sottoposto alla sola escursione annua di 10°C attorno al valore medio considerato di 10°C. Si osserva che a una profondità di circa 15 metri, l'effetto dell'atmosfera è quasi nullo.

2.3 Pompa di calore

I gruppi frigoriferi e le pompe di calore lavorano sugli stessi principi fisici e quindi sono molto simili nella componentistica e nell'aspetto. Poiché cambia l'effetto utile prodotto ci sono alcune piccole varianti come ad esempio il sistema di controllo: 1) per un gruppo frigo, si controlla la produzione di freddo, dunque il controllo è effettuato sul funzionamento lato evaporatore; 2) per la pompa di calore si effettua il controllo sul lato condensatore. Le temperature di lavoro e i refrigeranti utilizzati variano a seconda delle applicazioni. Per le pompe di calore è comune l'utilizzo di R134a, R407c o R410A, mentre per le macchine frigorifere si utilizza: l'ammoniaca, anidride carbonica, R507 o R404A. Il quantitativo tra olio e refrigerante va ponderato nella maniera opportuna altrimenti si arriva a una perdita del potere lubrificante e dunque si danneggia il compressore stesso o si sporcano le batterie di scambio. La compressione attraverso il compressore avviene in due maniere, sostanzialmente la distinzione avviene in

base al tipo di compressore che viene utilizzato: o a motore elettrico o termico o compressione legata alla fornitura di energia termica.

Tipicamente nella geotermia le macchine maggiormente utilizzate sono le pompe di calore elettriche (reversibili o meno). Mentre i refrigeranti maggiormente applicati nella geotermia sono: R22 (ormai in disuso a causa del suo grande impatto sull'ozono), R134a, R407c e R410A, utilizzati per macchine che lavorano su ciclo a vapore.

Nel caso delle pompe di calore con scambiatori non ad aria, la classificazione proposta dall'ASHRAE si basa sulla tipologia di sorgente utilizzata (Delmastro et al, 2015):

- SWHP – Surface Water Heat Pump: queste pompe di calore usano le acque superficiali come sorgenti. La suddivisone interna avviene sull'utilizzo dell'acqua: se prelevano l'acqua dal corso d'acqua e poi la reimmettono nello stesso allora sono di tipo diretto, se l'acqua serve solo per lambire le sonde allora sono di tipo indiretto;
- GWHP – Ground Water Heat Pump: viene utilizzata l'acqua di falda che viene prelevata e poi reimmessa nella stessa falda oppure in un corso d'acqua superficiale (caso a nella figura);
- GCHP – Ground Coupled Heat Pump: in questo caso viene sfruttato il calore del terreno attraverso le sonde geotermiche (caso di nostro interesse)

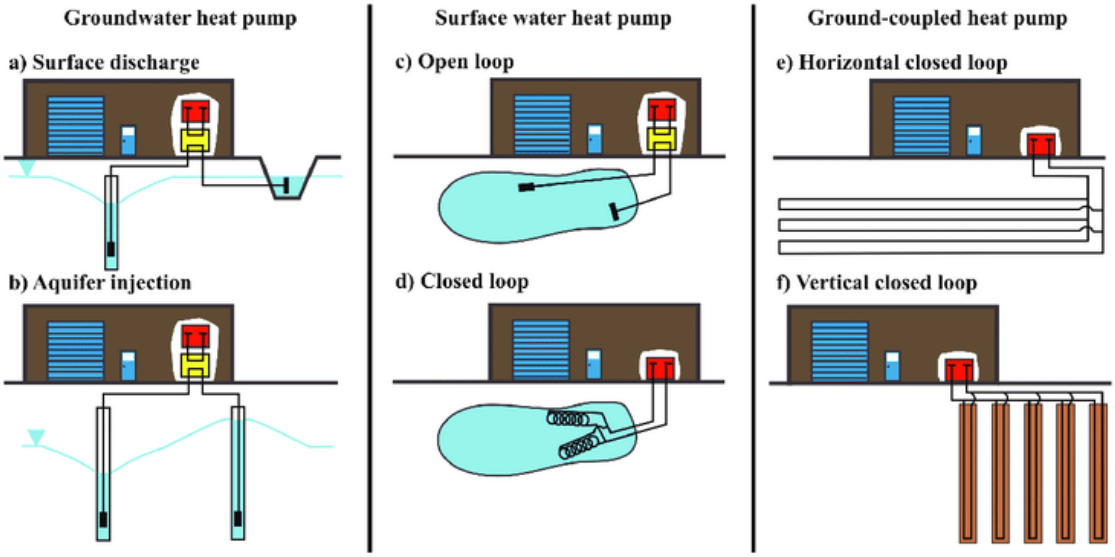


FIGURA 5 CLASSIFICAZIONE DELLE POME DI CALORE (FONTE ASHRAE)

Per un confronto delle diverse tipologie di pompe di calore, sono definite, a seconda della fonte sfruttata, le temperature standard di funzionamento e il rispettivo COP che deve essere garantito.

Nel campo delle pompe di calore geotermiche la standardizzazione non è completata, pertanto vi sono varie tipologie di schemi differenti che prendono spunto dalle configurazioni classiche valorizzando però specifici aspetti dell'utilizzo:

- Pompa di calore/chiller base → Macchina non reversibile, produce energia termica/frigorifera a temperatura costante. Il principio sul quale lavora è il mantenimento di una determinata temperatura di un ambiente.
- Pompa di calore base a doppio compressore → Utilizzata quando il rapporto tra fabbisogno di picco e fabbisogno minimo è molto elevato
- Pompa di calore con inversione di ciclo → Si addotta questa pompa di calore per rispondere all'esigenza della climatizzazione di produrre acqua fredda per il condizionamento durante l'estate e acqua calda per il riscaldamento durante l'inverno. Questa funziona sia come pompa di calore che come chiller. La reversibilità di questa macchina è effettuata dalla presenza della valvola a quattro vie. Questa valvola a quattro vie ha il compito di invertire evaporatore e condensatore. Se si effettua l'inversione del ciclo cambia anche il verso di attraversamento del refrigerante nel condensatore e nell'evaporatore.

In determinate applicazioni può essere utilizzabile in contemporanea sia la quota di energia frigorifera ricavabile dall'evaporatore, sia la quota di energia termica ricavabile dal condensatore. In questi casi l'efficienza del sistema può essere molto elevata: l'effetto utile, a parità di energia primaria fornita, è duplice. Salvo casi di centrali termiche con più sorgenti termiche, non c'è il perfetto bilanciamento tra le esigenze energetiche in caldo e in freddo, per cui rimane necessario anche lo scambio con l'ambiente esterno per ottenere l'equilibrio nelle varie condizioni di esercizio. Si inserisce sulla macchina un terzo scambiatore di calore, chiamato recuperatore, che entra in funzione esclusivamente alla necessità. Abitualmente il recuperatore lavora in alternativa al condensatore. Il sistema a recupero totale soffre di un limite di difficile modellizzazione, che in certe situazioni non ne rende conveniente l'utilizzo anche se apparentemente ci sarebbero i presupposti teorici. In alternativa esiste anche il recupero parziale o desurriscaldamento. In questo caso la prima fase di condensazione, denominata desurriscaldamento, porta il vapore surriscaldato allo stato di vapore saturo secco: questo avviene all'interno di uno scambiatore, chiamato desurriscaldatore, generalmente destinato alla produzione di acqua calda sanitaria. La macchina nel suo complesso risulta più semplice e di conseguenza meno costosa di una macchina di pari potenza a recupero totale, in particolare perché il desurriscaldatore è notevolmente più piccolo del recuperatore e in secondo luogo per la maggiore semplicità dei circuiti del refrigerante. (Delmastro e al., 2015)

2.3.1 Schema di funzionamento di una pompa di calore

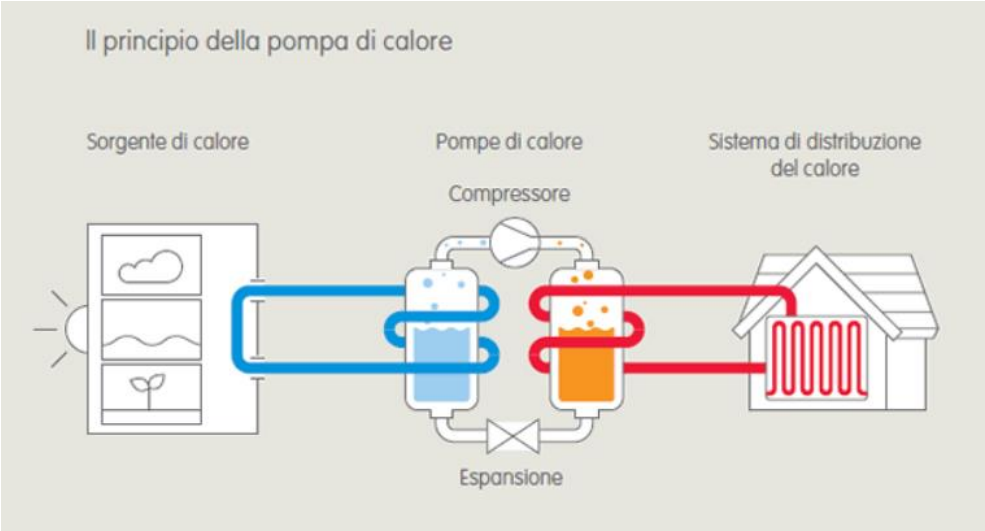


FIGURA 6 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELLA POMPA DI CALORE

Il principio su cui si basa il funzionamento di una pompa di calore è quello relativo alla variazione di temperatura. Assorbendo calore dall'esterno si scaldano gli interni. Per il corretto funzionamento viene fatta leva solo sull'energia elettrica tralasciando cosi l'utilizzo di combustioni di gas o altri materiali.

Il calore viene generato da una differenza di pressione, attraverso l'utilizzo dell'azione di un compressore che fa funzionare la pompa di calore. I passaggi attraverso i quali avviene questo meccanismo sono i seguenti: il fluido refrigerante viene aspirato dall'evaporatore e evapora grazie alla bassa pressione accumulando il calore. L'energia termica a questo punto viene compressa e inviata al condensatore. Nel condensatore, per effetto della condensazione, l'alta pressione fa rilasciare tutto il calore. Il gas fluido del liquido refrigeratore torna così di nuovo allo stato liquido, pronto per iniziare un nuovo ciclo passando attraverso la valvola di laminazione dove ritorna alla condizione di vapore. Il fluido refrigerante cambia di stato all'interno dei due scambiatori, infatti esso nell'evaporatore passa da liquido a gassoso e nell' condensatore da gassoso a liquido. Nei periodi estivi, il processo appena descritto viene invertito per ottenere il rinfrescamento.

La suddivisione sulla quale si differenziano le pompe di calore è quella relativa alla sorgente di calore. La sorgente di calore può essere l'aria, il suolo o l'acqua.

Per quantificare le prestazioni di una pompa di calore si parla di "resa" espressa dal Coefficiente di Prestazione "COP". È più coretto parlare di "resa" poiché se si parlasse di "rendimento" si utilizzerebbe una terminologia incorretta dal momento che il rendimento non può essere mai maggiore di 1. Il "COP" è espresso come rapporto tra l'energia resa e l'energia consumata e di solito viene indicato come coefficiente di effetto utile. Per energia resa si considerata il calore fornito alla sorgente di interesse, mentre l'energia consumata che di solito è elettrica è quella richiesta dal compressore. Se il "coefficiente of performance" COP è pari a 3 allora si è nel caso in cui per ogni kWh di energia elettrica consumata la pompa di calore movimenta calore pari a

3 kWh da o verso la sorgente di interesse. Il COP di riscaldamento e quello di raffreddamento vengono definiti rispettivamente nella seguente maniera.

$$COP_{riscaldamento} = \frac{\Delta Q_{caldo}}{\Delta A} \leq \frac{T_{calda}}{T_{calda} - T_{fredda}} = \frac{1}{\eta_{ciclo\ di\ Carnot}}$$

$$COP_{raffreddamento} = EER = \frac{\Delta Q_{freddo}}{\Delta A} \leq \frac{T_{fredda}}{T_{calda} - T_{fredda}}$$

Dove:

- Q_{freddo} → quantità di calore estratta da un serbatoio freddo alla temperatura T_{fredda}
- Q_{caldo}→quantità di calore distribuita a un serbatoio caldo alla temperatura T_{calda}
- EER → Energy Efficiency Ratio

L'efficienza della pompa di calore è migliore durante la fase del riscaldamento, questo avviene poiché la macchina dissipa sempre una parte di energia in calore. Questo calore viene usato per il riscaldamento. Il caso ideale di macchina di Carnot a senso inverso è quello in cui si fornisce lavoro e si ottiene calore. Il caso reale, quello che si verifica in presenza di un clima mite, di una pompa di calore presenta un COP che varia da 3 a 4.

2.3.2 Pompa di calore geotermica

Le pompe di calore geotermiche, secondo l'agenzia di protezione ambientale statunitense (EPA), sono il sistema di climatizzazione più conveniente economicamente, meno inquinante, il più efficiente e non producono emissioni sul posto. L'impatto ambientale potenzialmente potrebbe essere rappresentato dalla fuoriuscita del fluido termovettore delle sonde geotermiche. Dal momento che però le quantità utilizzate sono modeste e i fluidi sono a bassa tossicità, l'impatto è trascurabile. L'impatto ambientale è leggermente maggiore negli impianti a circuito aperto, dove, potrebbe essere provocato un depauperamento degli acquiferi oltre che la contaminazione tra acquiferi differenti e talvolta anche subsidenza.

Il COP di una pompa di calore geotermica può variare tra un valore da 3 a 6. Questo implica che per ogni kWh elettrico consumato vengono prodotti 3-6 kWh termici. Il COP della pompa di calore è influenzato maggiormente dalle temperature dei due termostati, infatti minore è la loro differenza e più alto è il COP. Confrontando la pompa di calore geotermica con una caldaia a condensazione si ottiene un risparmio energetico tra il 25% e il 62.5%.

La pompa di calore geotermica presenta un investimento a medio-lungo termine. Rispetto agli impianti tradizionali a combustibili fossili si ha un risparmio del costo di mantenimento dell'impianto che varia tra il 20 e il 60%. I tempi di ritorno dell'investimento dipendono da vari fattori come ad esempio la dimensione e i costi di installazione, il costo dell'energia elettrica e dei combustibili fossili, incentivi, finanziamenti agevolati e sgravi fiscali.

2.4 Sonde geotermiche

Il trasferimento del calore dal terreno (o viceversa) viene effettuato attraverso le sonde geotermiche, sonde costituite da tubi ad U di materiali con alta trasmittanza termica. Il liquido che passa dentro i tubi, generalmente un fluido termovettore, scambia il calore con il terreno e lo porta in superficie o nel sottosuolo. Tramite perforazione del minimo diametro possibile, avviene l'inserimento della sonda nel terreno con una successiva cementazione della sonda contro terra. La vita utile dei materiali da cui è costituita la sonda è superiore ai 100 anni ed è studiata in maniera tale da non aver bisogno di manutenzione durante il suo ciclo di vita. Un eventuale intervento in un secondo momento non è possibile in nessuna maniera poiché è sigillata in superficie.

Le sonde geotermiche si suddividono in tre gruppi:

- Orizzontali
- Verticali
- Compatte

La sonda è costituita da tre elementi fondamentali:

- Materiale di riempimento;
- Piede;
- Tubazioni;

e tre ausiliari alla posa:

- Tubo di iniezione;
- Distanziali;
- Zavorra.

2.4.1 Tubazioni

Generalmente le tubazioni utilizzate per le sonde sono in polietilene ad alta densità, come richiesto dalla norma DIN 8074 e 8075, la loro più comune denominazione utilizzata nell'ambito commerciale è HDPE o Pead. Il polietilene è composto solo da carbonio e idrogeno attraverso la polimerizzazione dal petrolio. Si deduce che è flessibile, maneggevole e resistente alla corrosione, inoltre detiene delle ottime caratteristiche di stabilità a lungo termine, meccaniche e presenta una ridotta scabrezza interna. La ridotta scabrezza interna garantisce una bassa resistenza idraulica. Un'altra sua particolarità è il basso peso specifico, permettendo così di essere trasportato e installato facilmente.

Una delle caratteristiche principali che deve avere una sonda geotermica è una bassa resistenza allo scambio di energia termica. Siccome la conducibilità termica del polietilene si attesta su valori intorno a 0,38-0,40 W/(mK) un'alternativa è quella di utilizzare pareti il più possibile sottili riducendo così al minimo l'isolamento termico. Dall'altro lato però dovendo garantire

una certa resistenza meccanica le pareti devono essere abbastanza spesse per contrastare l'azione della cementite e del terreno. La necessita di garantire una certa resistenza meccanica e un buon scambio termico porta ad orientarsi sulle tubazioni PN16, che sono quelle maggiormente utilizzate. Va osservato che le tubazioni con cui sono costruite le sonde devono essere esenti da saldature verticali. È proibito eseguire saldature e giunture in cantiere.

Particolare attenzione va posta sulla "U" al fondo della sonda geotermica, quella che fa da raccordo tra le tubazioni di mandata e di ritorno. Questo punto particolare prende il nome di piede di sonda e la saldatura del piede di sonda può essere di diversi tipi:

- Con manicotto elettrosaldato;
- Piede elettrosaldabile;
- Testa con incastro;
- Testa planare.

2.4.2 Fluidi termovettori

Il fluido termovettore scorre all'interno della sonda geotermica e trasferisce il calore dalla pompa di calore al terreno o viceversa. Questo fluido, in funzione delle temperature esterne, può essere solo acqua o una miscela di acqua e antigelo. Gli antigelo più comunamente utilizzati sono il glicole propilenico e il glicole etilenico. Per raggiungere il punto di congelamento desiderato si mescola l'antigelo con l'acqua. Dal punto di vista ambientale questi fluidi potrebbero presentare dei contro, un'eventuale rottura di una sonda contenente la soluzione antigelo, provoca un impatto chimico con ripercussioni sulle falde. La rottura che può portare alla perdita del fluido contenuto nelle sonde può essere dovuta a:

- Esecuzione di scavi, posteriori alla realizzazione dell'impianto, per motivi secondari che per errore o per ignoranza investono le condotte orizzontali/verticali tranciandole;
- Cedimento di qualche saldatura delle sonde;
- Rottura della testa di una sonda, poiché non ben interrata, a causa di qualche mezzo pesante;
- Rottura di una sonda in profondità.

Quando si verifica la fuoriuscita di soluzione antigelo per uno dei motivi sopraelencati la pressione comincia a scendere più o meno velocemente in relazione all'entità della perdita sino a che non viene isolato il punto di rottura o si svuota la porzione di circuito interessata. Il circuito sonde, essendo chiuso, perde una quantità di fluido che dipende essenzialmente dalla posizione della rottura e soprattutto dalla sua profondità; se ad esempio la rottura avviene dove la sonda geotermica si collega alla rete orizzontale, le sonde verticali rimarranno completamente cariche di fluido e risulterà svuotata solo una parte delle tubazioni orizzontali. Se invece a rompersi è il piede di una sonda, oltre a svuotarsi il circuito orizzontale, si svuoterà la sonda interessata, ma le altre rimarranno piene. (Delmastro e al., 2015).

Il glicole etilenico è tossico per ingestione mentre la ridottissima tossicità del glicole propilenico, nonostante sia meno performante dal punto di vista tecnico e più costo del glicole etilenico, è da preferire.

- Glicole etilenico → lo produsse per la prima volta il chimico francese Wurtz nel 1859. La sua diffusione cominciò durante la prima guerra mondiale quando trovo il suo utilizzo nei motori degli aerei. Precisamente veniva utilizzato come liquido di raffreddamento da utilizzare al posto dell'acqua in pressione. La formula grezza del glicole etilenico è $C_2H_4(OH)_2$ e la massa molare è circa pari a 62,1 g/mol.
- Glicole propilenico → è un liquido senza odore, leggermente dolce e trasparente. È simile al sapone al tatto ed è miscibile con l'acqua in qualsiasi proporzione. La formula bruta del glicole propilenico è $C_3H_8O_2$. Siccome è una molecola sovrapponibile alla sua immagine speculare (molecola chirale) può esistere in due isotopi ugualmente stabili e rappresentati in parti uguali nei prodotti industriali (Delmastro e al., 2015). La sua massa molare è circa pari a 76,09 g/mol. Esso è meno tossico del glicole etilenico e anche se meno performante a livello tecnico ed economico del glicole etilenico è da preferire

2.4.3 Impianti a circuito aperto

Questi sono costituiti da un impianto di scarico e di prelievo, o attraverso un circuito secondario e uno scambiatore oppure in maniera diretta sono collegati alla pompa di calore. L'impianto di prelievo utilizza bacini superficiali (fiumi, laghi o mari) oppure acquedotti/pozzi. Il consumo complessivo dell'impianto è influenzato dal consumo energetico delle pompe idrauliche che servono per movimentare l'acqua. Se l'acqua in ingresso provoca incrostazioni o intasamenti dei circuiti allora viene interposto il circuito secondario in modo da ridurre gli interventi sulla pompa di calore. L'impianto di scarico può terminare nello stesso bacino di prelievo, in un pozzo o in una fogna. Si osserva che è quasi indispensabile l'utilizzo di uno scambiatore di calore e di un circuito secondario per i sistemi basati su acque superficiali. Se viene utilizzato un pozzo per il prelievo bisogna considerare l'impatto energetico del pompaggio sia nei bilanci economici che in quelli ambientali, aumentando la profondità del livello piezometrico della falda aumentano anche i costi per eseguire il pompaggio. L'impianto a circuito aperto presenta alcuni svantaggi:

- Maggiori costi di manutenzione;
- Elevata profondità di falda (dunque alto costo di pompaggio);
- Difficoltà e incertezza nell'avviare l'iter autorizzativo per l'esecuzione dei pozzi, si pensi al fatto che vengono prelevate acque pubbliche e successivamente vengono scaricate delle acque trattate anche se solo termicamente.

2.4.4 Impianti a circuito chiuso

Esistono innumerevoli varianti tecnologiche relative allo scambio indiretto con il terreno, molte delle quali studiate ed ottimizzate per abbattere i costi di installazione in casi specifici. Si deve infatti considerare che lo scambio con il terreno costituisce tra il 40 e il 75% del costo complessivo d'impianto, per cui il suo dimensionamento accurato è importante anche per

ridurre i costi di installazione e quindi favorire lo sviluppo della tecnologia (Delmastro et al., 2015).

2.4.4.1 SISTEMA A SONDE ORIZZONTALI

Il principio di funzionamento si basa sull'utilizzo dell'energia geotermica superficiale con maggiore estensione di terreno.

Per la realizzazione vengono utilizzati dei tubi in PE disposti con configurazioni diverse (per esempio la disposizione potrebbe essere fatta a tutto campo oppure a trincea). L'impianto viene realizzato in direzione orizzontale (pertanto occuperà una superficie molto maggiore rispetto al sistema a sonde verticali) i diversi circuiti che vengono realizzati convengono in due collettori da cui partono i collegamenti in PE disposti in direzione orizzontale. I due collettori differiscono l'uno dall'altro poiché uno è di mandata mentre l'altro è di ritorno.

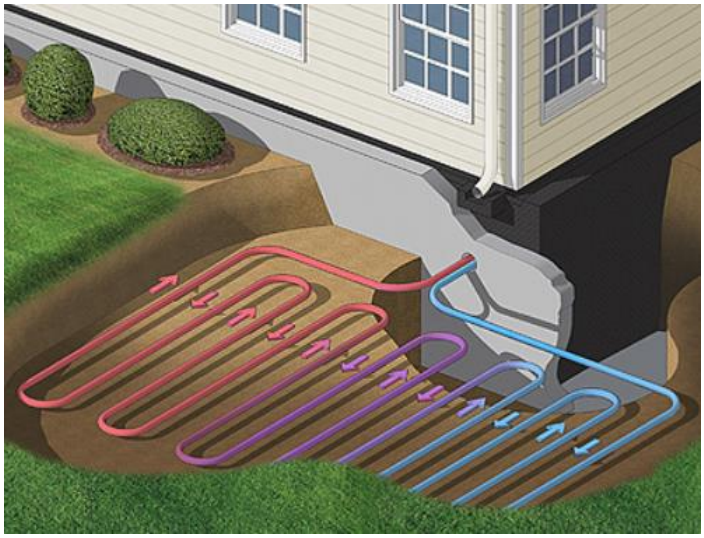


FIGURA 7 FUNZIONAMENTO DI UN SISTEMA A SONDE ORIZZONTALE

L'area necessaria per realizzare un sistema di posa per sonde geotermiche a sviluppo orizzontale è generalmente almeno doppia rispetto alla superficie da riscaldare nell'edificio. Generalmente la profondità di posa per questa tipologia di impianti si attesta sui 1,5 m dal piano campagna. Considerando questa profondità, il rapporto da considerare per poter realizzare un impianto efficiente si attesta sui 25 m^2, impianto capace di cedere 1Kw.

Operando a una profondità di 1,5 m, il vantaggio da un lato è che si evitano fenomeni relativi al congelamento del terreno e i costi realizzativi sono minori, mentre lo svantaggio è l'influenza delle temperature esterne su un effettivo utilizzo del meccanismo. Il terreno, soggetto alla realizzazione di questa tipologia di impianti, diventa "quasi" inutilizzabile. Esso infatti, non può essere più soggetto a strutture edificabili, eventuali pavimentazioni o piantumare alberi ad alto fusto e sempreverdi. Contrariamente non sono presenti controindicazioni se l'area in esame viene utilizzata per la destinazione a giardino o frutteto.

Adottando il sistema a sonde orizzontale si evitano le perforazioni profonde che sono costose e sono soggette ad imprevisti. Per evitare delle confusioni durante la manutenzione dell'opera, in

fase di realizzazione si consiglia di adottare tubazioni con linea di marcatura assente o differente dall'azzurro (acqua potabile) e dal giallo (gas). Va utilizzato il nastro monitore al di sopra delle tubazioni realizzate in maniera tale da evitare futuri danneggiamenti.

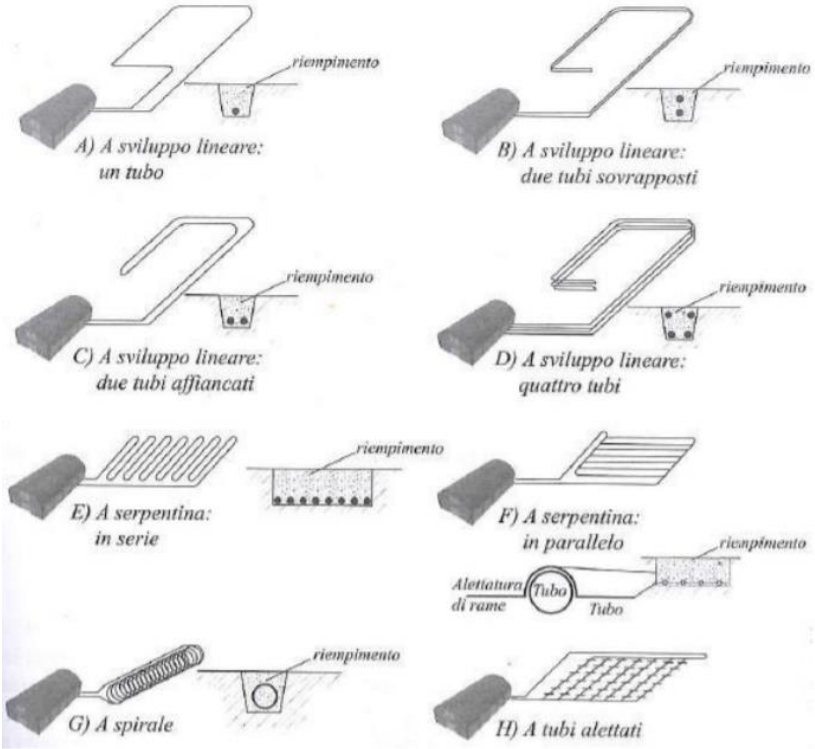


FIGURA 8 CONFIGURAZIONE DI POSA PER SONDE GEOTERMICHE A SVILUPPO ORIZZONTALE (FONTE ASHRAE)

2.4.4.2 SISTEMI A SONDE VERTICALI

Lo scambiatore di calore a circuito chiuso per eccellenza tra pompa di calore e terreno sono le geosonde a sistemazione verticale. L'impianto si compone di tubazioni in polietilene ad alta densità, attraversati da un fluido termovettore, come ad esempio acqua glicolata. Il sistema chiuso scambia calore con il terreno attraverso la circolazione del fluido termovettore.

Viene eseguita una perforazione per la posa delle sonde. Questa perforazione varia dai 100 ai 150 metri ed il diametro è di circa 15 cm. Il funzionamento dell'impianto è influenzato da diversi fattori come il carattere geologico o idrogeologico e/o la disponibilità di superficie esterna all'edificio adeguata allo scopo. Le sonde geotermiche sono composte da 2 o 4 tubi con conformazione a U che scendono e risalgono in un unico circuito.

FIGURA 9 FUNZIONAMENTO DI UN SISTEMA A SONDE ORIZZONTALE

Una volta posata la sonda, tra la stessa e il terreno, viene iniettato un prodotto specifico premiscelato di cementi bentonitici. Questo prodotto specifico permette di saturare gli spazi e creare una miglior conducibilità e di conseguenza migliora lo scambio di calore tra terreno e fluido. Oltretutto procedendo in questa maniera, si impedisce la comunicazione tra eventuali falde acquifere attraversate dalla perforazione. Vengono realizzati dei collegamenti orizzontali a circa 1 m dal piano campagna, collegamenti che fanno da tramite tra le sonde verticali e il collettore geotermico in cui convergono. Il collettore geotermico a sua volta è collegato idraulicamente alla pompa di calore con singoli circuiti di mandata e ritorno.

Il numero delle sonde che vengono realizzate, è calcolato sulla potenza della pompa di calore necessaria all'edificio da climatizzare. Lo scambiatore geotermico è vincolato in funzione della struttura che dovrà servire. Per ottenere 1 kw di energia geotermica dal fluido glicolato che scorre nelle sonde, sono necessari dai 10 ai 15 m di sonde verticali. Dimensioni strutturali dipendenti dalle caratteristiche geologiche del terreno. Il sistema delle sonde verticali ha una maggiore efficienza nella captazione del calore poiché, a una profondità di circa 10-15 metri la temperatura è stabile durante tutto l'anno e questa ruota intorno ai 14°C. Si raggiunge così una miglior efficienza della pompa di calore sia nella funzione estiva di raffrescamento che in quella invernale di riscaldamento. Va tenuta una distanza minima intercorrente di circa 8 metri per evitare interferenze termiche. A monte della realizzazione dell'impianto va effettuato il Ground Response Test (GRT) per verificare la conducibilità termica del terreno e la resistenza termica delle sonde. L'utilizzo di macchinari specifici durante la fase di perforazione e di posa, implica un alto costo realizzativo dell'impianto, costo che viene ricompensato dagli enormi vantaggi nel lungo periodo di funzionamento e dei quasi inesistenti oneri di gestione.

Oltre alla classica sonda geotermica in polietilene a singola o doppia "U" esistono le sonde concentriche. Nelle sonde concentriche la mandata è un tubo interno al tubo di ritorno. In questa maniera si riduce l'ingombro di perforazione, inoltre si ha un miglior accoppiamento tra sonda e terreno. Gli svantaggi della sonda concentrica sono di tipo esecutivo, infatti essendo un tubo rigido, le saldature vanno fatte durante la posa. Esiste anche qualche caso di sonde a tripla "U"

che però si porta dietro lo svantaggio di dover perforare con diametri maggiori rispetto ai classici casi. Sempre in commercio si trova anche la variante di singola "U" ad infissione, che viene posata nel terreno mediante attrezzatura tipo penetrometro per indagini geologiche.

2.4.4.3 MINICOLLETTORI

In questo caso si cerca di sfruttare elementi modulari, di facile assemblaggio e che non richiedano la necessità di eseguire perforazioni, sfruttando al contempo al meglio possibile il volume di terreno circostante. I minicollettori sono degli elementi modulari in polietilene. Questi elementi modulari possono avere dimensioni e forme di vario genere ma sono caratterizzati dalla facilità di movimentazione e installazione. Interagiscono con il volume di terreno fino ad una profondità di 3-4 metri e possono essere collegati tra di loro in parallelo o in serie. Il più classico dei minicollettori è denominato a basket. In questo caso il tubo in polietilene ha un diametro di 25 mm o 32 mm e viene applicato attorno ad una struttura di irrigidimento, assumendo cosi la forma di una molla del diametro di circa 60 cm e altezza 3 metri. Della sabbia silicea viene inserita per riempire l'interno. La resa termica dei basket, che sono collegati a un collettore posto in centrale termica, si aggira sui 500 W per ogni collettore se il terreno è umido. Come nel caso di impianti orizzontali, anche nel caso dei minicollettori si deve evitare la pavimentazione riuscendo così a garantire la ricarica del terreno. Un terreno umido garantisce uno scambio di calore di gran lunga superiore rispetto a un terreno asciutto, condizione che non permette uno scambio sufficiente per essere realizzato.

2.4.4.4 ESPANSIONE DIRETTA

Questa tecnologia utilizza evaporatore e condensatore costituiti da serpentine nel terreno e all'interno dell'abitazione. Il fluido frigorifero (R410A) circola direttamente in tutto l'impianto evitando l'uso di ulteriori fluidi termovettori. Evaporatore e condensatore risultano esterni alla macchina, che a questo punto non è più una pompa di calore ma è costituita solo da compressore, valvola termostatica, organi ausiliari e di controllo. L'efficienza del sistema è, almeno a livello teorico, migliore rispetto agli altri sistemi geotermici: si riducono al minimo i delta di temperatura tra gli ambienti e il fluido frigorifero a tutto vantaggio delle performance. Pur non avendo informazione diretta sui costi di impianto, ragionevolmente ci si possono attendere valori paragonabili: se da una parte costano di più le tubazioni nel terreno e nell'edificio (che devono essere adatte a fluido frigorifero e sono peranto costruite in rame protetto da polietilene), i costi per il macchinario sono inferiori a quelli di una analoga pompa di calore. (Delmastro e al., 2015)

2.5 Geostrutture energetiche

Per geostrutture energetiche si intende quell'insieme di opere geotecnico-strutturali capaci di coniugare in un unico elemento la duplice finalità di stabilità strutturale e di scambio di calore con il terreno circostante (Barla et al., 2016). Un sistema di geostrutture energetiche è composto da tre circuiti: il primo riguarda lo scambio termico tra la massa del suolo e la geostruttura, il secondo quello tra la geostruttura e la pompa di calore e il terzo quello tra la pompa di calore e il riscaldamento/raffreddamento, impianto situato all'interno dell'edificio. Sono necessarie modifiche relativamente piccole a trasformare una geostruttura convenzionale in una geostruttura energetica. Principalmente un sistema di tubi in polietiliene con un fluido termovettore che circola attraverso di essi e scambia calore con il terreno è agganciato alla gabbia di rinforzo all'interno delle strutture. Due o più anelli a forma di U o a forma di W possono essere installati con l'obiettivo di ottimizzare l'efficienza energetica. Il fluido è solitamente acqua e glicole per evitare il congelamento. La pompa di calore rappresenta la connessione tra il secondo e il terzo circuito, fa circolare il fluido termovettore in entrambi e adatta la temperatura proveniente dal secondo circuito a un livello accettabile per il terzo circuito (fabbisogno dell'edificio). Solitamente le pompe di calore geotermiche hanno una potenza di 1kW e un coefficiente di prestazione, COP, che varia nell'intervallo da 3,5 a 4 come definito in precedenza. Il COP è fortemente influenzato dalla differenza tra la temperatura sotterranea e la temperatura di utilizzo: maggiore è la temperatura del suolo e minore è il calore che la pompa deve fornire e quindi maggiore è l'efficienza. Per avere una buona efficienza la temperatura utilizzabile nel terzo circuito (edificio) non deve superare i 35-45°C e la temperatura di estrazione nei tubi non deve cadere sotto 0-5°C (Brandl,2006). Le proprietà termiche dei terreni inoltre potrebbero variare considerevolmente in condizioni di congelamento del suolo e questo deve essere evitato (SIA,2005). Come accennato in precedenza, nelle regioni climatiche in cui il raffreddamento richiesto durante l'estate è significativo, le geostrutture energetiche possono essere utilizzate per iniettare calore nel terreno, che può essere riutilizzato (in funzione delle capacità del terreno) durante l'inverno. Questo può essere ottenuto con il raffreddamento libero, il raffreddamento attivo o una combinazione di entrambi. Nel primo caso il fluido termovettore circola semplicemente nei tubi e dato che il terreno è più freddo dell'edificio il calore viene trasferito da quest'ultimo a terra. Nel secondo caso, viene utilizzato un frigorifero o una pompa di calore inversa. In alcuni casi quando il flusso d'acqua sotterraneo è assente o limitato (meno di 1m/giorno), il raffreddamento è ben raccomandato per mantenere l'equilibrio termico del terreno (SIA,2005)

Il funzionamento di una geostruttura energetica si basa sui concetti di termodinamica. È governato dagli 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 archiviazione il calore va dalla pompa di calore al fluido circolate e viene quindi trasmesso al terreno. In materiali porosi, come suolo e cemento, il calore viene trasmesso principalmente per conduzione, convezione e calore latente

di evaporazione. Quest'ultimo riguarda il calore trasferito attraverso il vapore a causa di cambiamenti di fase, quindi il suo contributo non è significativo per le applicazioni di geostrutture energetiche. Il contributo di radiazione è inferiore all'1% nelle sabbie e diventa ancora più piccola nelle argille (Rees et al., 2000). Secondo la legge di Fourier il flusso di energia termica [W/m^2] generato per conduzione $q_{cond,i}$ è pari a

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

Dove λ^{th} è la conducibilità termica del mezzo, T è la temperatura e ∇ è il gradiente. Questo corrisponde al calore trasferito tra le molecole senza alcun movimento visibile tra materiali. Considerando un mezzo saturo d'acqua, il flusso di potenza termica [W/m^2] generato per convenzione $q_{conv,i}$ è pari a

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

Dove C_{pw} e ρ_w sono la capacità termica specifica e la densità dell'acqua, rispettivamente, $v_{w,i}$ è la velocità relativa dell'acqua rispetto allo scheletro solido e T_0 è la temperatura di riferimento. Questo corrisponde 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

Dati approssimativi riguardanti la quantità di energia che può essere estratta dall'energia termoattiva dalle fondazioni sono stati forniti da Brandl (2006)

- Pali di fondazione con diametro D=0.3-0.5 m: 40-60 W per metro lineare;
- Pali di fondazione con diametro D≥0.6 m: 35 W per m^2 di area di contatto con la terra;
- Diaframmi, pareti (completamente incassati nel terreno): 30 W per m^2 di area di contatto con la terra;
- Lastre di base: 10-30 W per m^2 di superficie di contatto.

Più dati e 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. La capacità specifica di accumulo di calore C_{sp} [J/K] è definita dal calore Q [J] che può essere estratto dalla riduzione della temperatura media del terreno di un grado Celsius, come:

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

Questo dipende dalla capacità termica volumetrica e dal volume di terreno coinvolto come:

$$C_{sp} = \rho \hat{c} L_A A$$

Dove A è la superficie orizzontale del volume coinvolto.

2.5.1 Applicazioni

Dall'inizio del 1980 l'energia geotermica è stata sempre più ottenuta dagli elementi di fondazioni (Brandl, 2006); all'inizio da platee di fondazioni, poi dai pali (1984), dai diaframmi (1996) e dalle gallerie. Sempre più geostrutture energetiche vengono costruite in Europa e particolarmente in Svizzera (Pahud,2013), Austria (Adam e Markiewicz, 2009), Germania (Kipry e al., 2009) e Inghilterra, ma anche in Australia (De Moel et al., 2010), Giappone (Hamada et al., 2007), Cina, Scozia (Lennon et al.,2009), Paesi Bassi (Riederer et al., 2007), Stati Uniti (Henderson et al.,1998). Di solito sono impiegati per diverse applicazioni, da edifici industriali, a case unifamiliari, scuole, stazioni e aeroporti. Un certo numero di geostrutture energetiche sono state o sono ancora attualmente monitorate, questo consente cosi la raccolta di dati sul comportamento termo-meccanico. Tra questi, alcuni sono test sperimentali, mentre altri sono strutture operative reali. È possibile trovare un riepilogo completo dei dati disponibili in Bourne-Webb (2013).

FIGURA 10 APPLICAZIONE DI UN'ATTIVAZIONE TERMICA

Generalmente, tutti i pali di cemento armato, guidati o forati, possono essere dotate di scambiatori di calore attraverso dei tubi. Fino a poco i pali guidati rappresentavano la maggioranza ma la percentuale dei pali forati incremento rapidamente dopo il 2000, per evitare danni ai tubi assorbitori durante la procedura di guida (Brandl, 2006). Alternative sempre più utilizzate ai pali guidati sono anche i mucchi di ghisa duttili riempiti con cemento, pali guidati di tubi in acciaio con scambiatori di calore integrati riempiti con calcestruzzo e colonne vibrate di cemento installate dopo la tecnica di vibroflotazione e quindi dotate di tubi di assorbimento. L'efficienza di questi elementi sottili tuttavia è inferiore a quella dei grandi pali guidati o forati, nonostante la loro maggiore conduttività termica.

Normalmente i pali prefabbricati hanno diametri minori, tra 30 e 60 cm, lunghezza di 10-30 metri e solo due tubi di polietilene ad U, mentre i pali gettati sul posto hanno diametri maggiori, anche fino a 2 metri e lunghezze fino a 60 metri e sono dotati di tubi da 2 a 4 U (Fromentin et

al., 1999). Dal punto di vista energetico, i pali lunghi con diametro maggiore sono preferibili perché forniscono uno scambio superficiale di calore maggiore e permettono un maggior volume di accumulo di calore (SIA, 2005). Dal punto di vista geotecnico, i pali energetici, eccetto per il fatto che sono soggetti a variazioni di temperatura durante la loro vita lavorativa, potrebbero essere progettati come pali convenzionali. Questo può indurre ulteriore stress termico e tensionale (Amatya et al., 2012). Il tutto dipende dalla temperatura a cui è soggetto il caso di studio.

Applicazioni future o di recente sperimentazione, come l'accoppiamento con pannelli solari (Kjellsson et al., 2010; Nordell e Hellstrom, 2000) o impianti di sequestro di CO_2 (Ochsner, 2008), porterebbero facilmente a un maggiore carico termico. Le variazioni termiche imposte alla struttura e al terreno circostante sono quotidiane e cicliche, quando la temperatura diminuisce durante l'estrazione del calore (inverno) e aumenta durante il raffreddamento o l'iniezione di calore (estate).

Mentre le applicazioni geotermiche superficiali e profonde sono oggi pienamente approvate e sicuramente impiegate, l'accoppiamento di questa tecnologia con elementi strutturali porta a problemi aggiuntivi che devono essere affrontati. La particolarità delle geostrutture energetiche rispetto ad altri sistemi geotermici è che non sono impiegati solo a scopi energetici, ma hanno il primario ruolo della stabilità strutturale. Per questo motivo, la loro prestazione geotecnica deve essere assicurata in primo luogo durante la loro vita utile, sia in termini di carico massimo tollerabile che in spostamenti ammissibili. Ovvero, è necessario garantire che il loro ruolo secondario di fornitori di energia non influenzi in maniera negativa il ruolo primario di elemento portante per la struttura. Nonostante vi sia stata una rapida diffusione di questa tecnologia in alcuni paesi (Regno Unito e Austria) incontra oggi la riluttanza dei professionisti in molti altri luoghi (ad es. la Svizzera, Francia, USA, …) come conseguenza del fatto che manca una completa conoscenza degli effetti dello sfruttamento termico sulle prestazioni della fondazione. Le geostrutture energetiche rappresentano la soluzione più conveniente per soddisfare le moderne esigenze di riscaldamento e raffrescamento per edifici e infrastrutture in modo ecologico. Una conoscenza più approfondita del loro comportamento termo-meccanico porterebbe gli ingegneri ad essere più fiduciosi su questa tecnologia e di conseguenza più inclini ad adottarla.

2.5.2 Gallerie energetiche: ENERTUN

Il primo "concio energetico" italiano si chiama ENERTUN. Un suo prototipo è stato applicato nella nuova linea della metropolitana a Torino. Progetto finanziato dal Politecnico di Torino e dedicato alla prototipazione e validazione delle tecnologie. Riguarda lo studio dell'attivazione termica delle gallerie del prolungamento sud della linea 1 della metropolitana di Torino. La galleria principale è stata realizzata a profondità variabili tra i 15-20 m mediante quattro TBM EPB di 6.8 m di diametro e 80 m di lunghezza. Il rivestimento della galleria è costituito da 7 conci prefabbricati per ogni anello di profondità di circa 1.4 m. L'avanzamento è avvenuto completando circa 7 anelli al giorno e quindi con una velocità di avanzamento media di circa

10 m/giorno. (Barla et al, 2015). Nel sistema ENERTUN ogni anello di rivestimento presenta al proprio interno una rete di tubi. L'anello di rivestimento ha uno spessore di 30 cm e i tubi in polietilene in grado di trasportare il fluido termovettore possono essere inseriti sull'estradosso esterno, a 10 cm dal bordo, con spaziatura di 30 cm, diametro esterno di 25 mm e spessore di 2,3 mm. I tubi per queste applicazioni sono realizzati in polietilene reticolato ad alta densità (Pe-Xa) (Barla et al, 2015). Le pareti del tubo sono costituite da tre strati concentrici: uno strato più interno è costituito da polietilene ad alta densità, uno strato intermedio in materiale polimerico ed uno strato esterno impermeabile all'ossigeno e costituito da copolimeri in etil vinil alcol (EVOH). I tubi sono in grado di resistere ad alte pressioni, temperature ed alla corrosione. La connessione dei tubi tra un concio e l'altro e con la condotta di mandate e ritorno avviene, dopo la posa, tramite appositi manicotti che rimangono facilmente ispezionabili. Il fluido termovettore è costituito da glicole propilenico miscelato con acqua in grado di lavorare anche sotto i -20°C. (Barla et al, 2015). La superfice libera della falda è posta a 12 m dal piano campagna e lo spessore dell'acquifero è di circa 22-23 m con una velocità media di 1.5 m/giorno nella direzione del fiume Po.

FIGURA 11 CONCIO ENERGETICO ENERTUN

L'attivazione termica del rivestimento della galleria della metropolitana di Torino consente di sfruttare l'energia termica immagazzinata nel terreno con importanti benefici economici ed ambientali. In particolare è stato possibile concludere che: grazie alle condizioni favorevoli del flusso idraulico a Torino, il sistema ENERTUN può scambiare tra i 53 e i 74 W/m^2 di rivestimento, rispettivamente in inverno e in estate consentendo di coprire un fabbisogno termico di 2822 kW in riscaldamento e 3756 kW in raffrescamento; inoltre la variazione della temperatura della falda nell'intorno della galleria è modesta con variazioni minori di 5°C a 10 m di distanza dal contorno della galleria e completo recupero dopo il ciclo annuale; il costo aggiuntivo per attivare la galleria è stato stimato inferiore all'1% del costo totale dell'opera ed è il 41 % inferiore dell'utilizzo di sonde verticali, a parità di fabbisogno termico. Considerando la natura locale della sorgente di calore, le gallerie energetiche possono essere efficacemente adottate per il teleriscaldamento di aree urbane densamente popolate.

2.5.3 Ruolo delle condizioni del terreno sulle gallerie energetiche

Le proprietà termoidrauliche del terreno e le condizioni delle acque sotterranee del sito hanno un ruolo fondamentale sulla quantità di calore scambiato delle geostrutture. Attraverso la modellazione numerica 3D è stato effettuato uno studio parametrico per valutare l'influenza delle condizioni del terreno sull'efficienza energetica dei tunnel energetici facendo variare i seguenti parametri (Di Donna e Barla, 2015):

- Temperatura del terreno: 8-18°C;
- Conducibilità termica: 0,9-3,9 W/mK;
- Velocità del flusso di acque sotterranee: 0-2 m/g.

A seguire vengono riportati alcuni grafici riassuntivi in cui viene evidenziata l'influenza dei vari parametri.

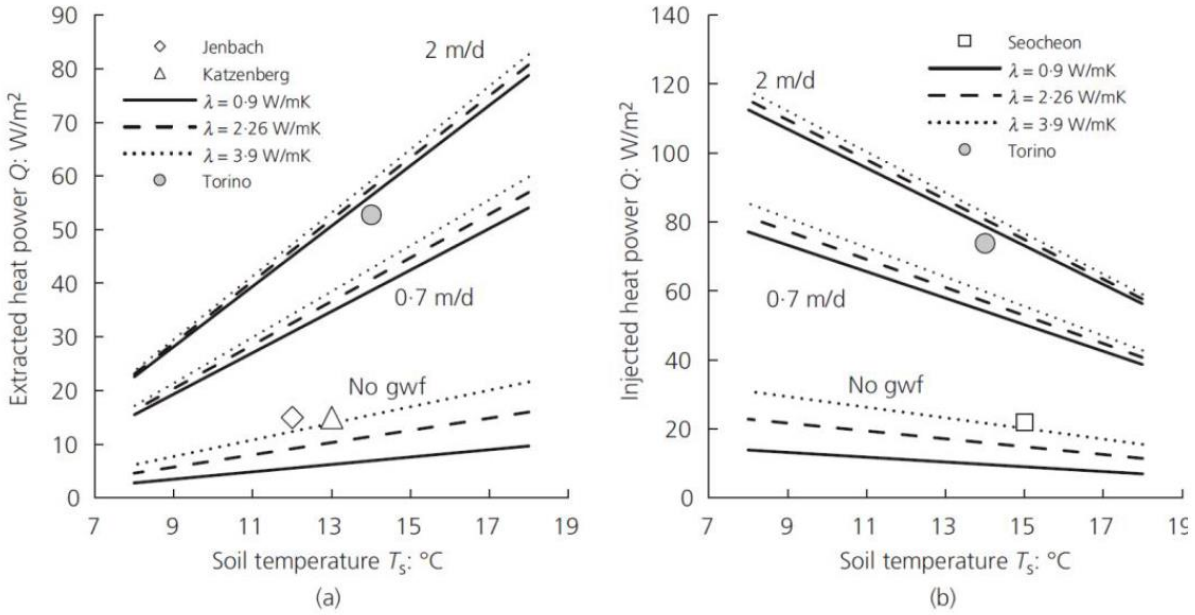


FIGURA 12 EFFETTI DELLA TEMPERATURA SULLA EFFICIENZA ENERGETICA: (A) MODALITÀ INVERNALE E (B) MODALITÀ ESTIVA (DI DONNA E BARLA, 2015)

In Figura 12 viene mostrata l'influenza della temperatura del suolo sull'efficienza energetica del sistema sia nel caso invernale che nel caso estivo. In estate la potenza termica estratta aumenta al diminuire della temperatura del suolo, mentre in inverno si osserva la tendenza opposta notando che la potenza estratta aumenta all'aumentare della temperatura del suolo. Indipendentemente dal movimento della falda e/o dalla conducibilità termica si osserva dalla Figura 12 che il calore scambiato mostra un aumento di circa il 25% rispetto al valore iniziale in funzione della temperatura del suolo nella condizione invernale. Nella condizione estiva il calore scambiato subisce una diminuzione del 5% per grado Celsius, sempre indipendentemente dalla velocità di flusso e dalla conducibilità termica.

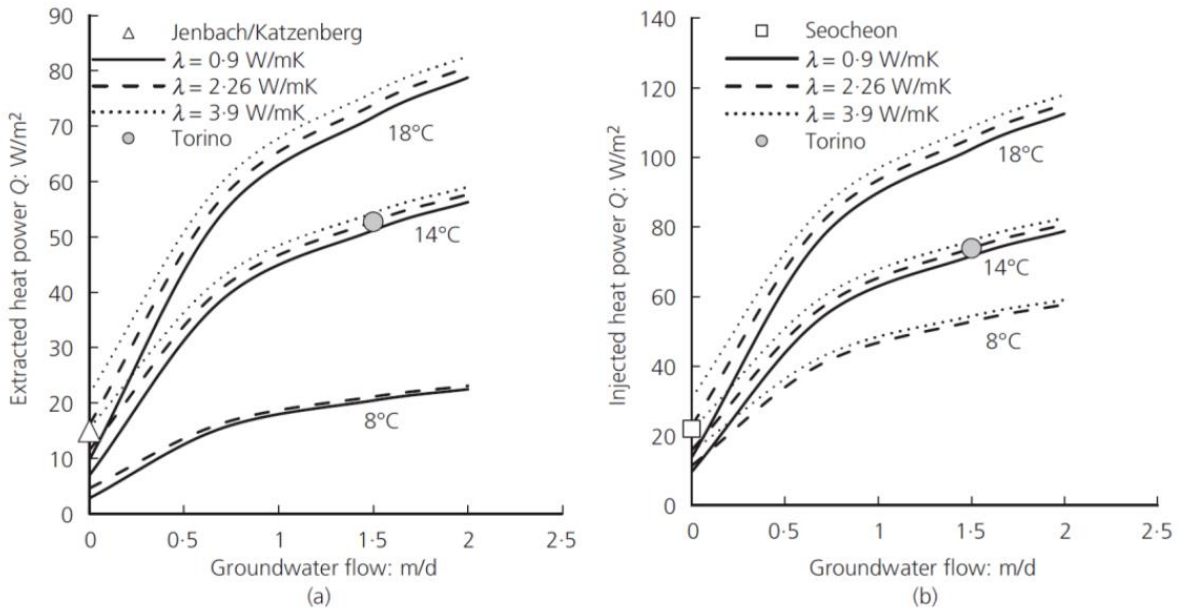


FIGURA 13 EFFETTI DELLA VELOCITÀ DI FLUSSO DELLA FALDA SULL'EFFICIENZA DELLA GEOSTRUTTURA ENERGETICA: (A) MODALITÀ INVERNALE E (B) MODALITÀ ESTIVA (DI DONNA E BARLA, 2015)

Nella Figura 13 viene mostrata la correlazione tra la velocità di flusso della falda sotterranea e lo scambio di calore estratto sia per il caso invernale (a) che per quello estivo (b). In entrambi i casi la potenza termica aumenta con l'aumentare della velocità della falda acquifera.

I risultati attesi dal punto di vista della conducibilità termica sono mostrati nella Figura 14.

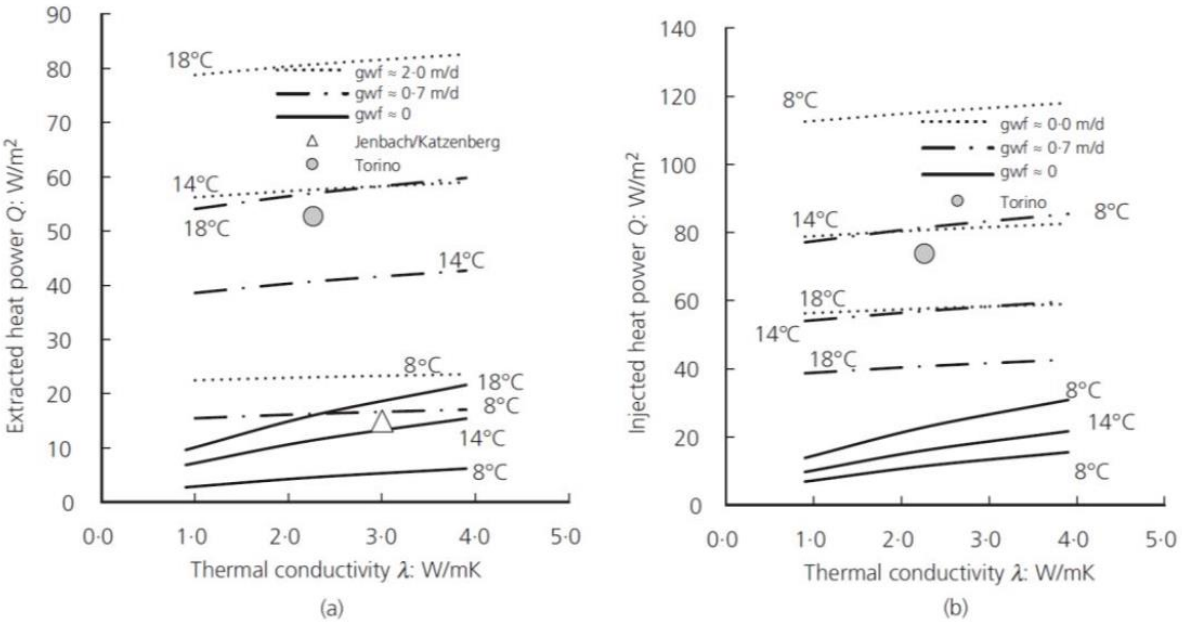


FIGURA 14 EFFETTI DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA SULL'EFFICIENZA DELLA GEOSTRUTTURA ENERGETICA: (A) MODALITÀ INVERNALE E (B) MODALITÀ ESTIVA (DI DONNA E BARLA, 2015)

Si osserva che all'aumentare della conducibilità termica aumenta il calore scambiato sia nella modalità invernale che in quella estiva. Questa correlazione tra la conducibilità termica e il calore scambiato però diventa meno evidente in presenza di un flusso dell'acqua e più questo flusso aumenta meno si osserva la correlazione. Leggendo la Figura 14 si nota che la potenza

termica aumenta del 25% rispetto al calore iniziale nei casi in cui non è presente la velocità di flusso, mentre in presenza di flusso della falda sotterranea si ha un incremento dell'1%.

L'analisi parametrica ha fornito dei risultati soddisfacenti. Nel caso di riscaldamento (modalità invernale) è stato osservato che la velocità del flusso della falda sotterranea e la temperatura del suolo influenzano maggiormente il sistema geotermico. I valori del calore estratto variano nel range tra i 10 e i 70 W/m^2. Durante il raffreddamento (modalità estiva) i parametri maggiormente significativi sono quelli del caso precedente e i valori del calore sotratto variano nel range tra i 10 e i 100 W/m^2.

2.5.4 Esempi di muri energetici

La procedura di progettazione per le geostrutture è più impegnativa rispetto ai progetti convenzionali. Oltre alle procedure note per la progettazione di una struttura, è necessario progettare e dimensionare le apparecchiature geotermiche, con particolare attenzione alla richiesta energetica e agli effetti aggiuntivi indotti dalla variazione di temperatura sulla struttura stessa in termini di sollecitazioni e spostamenti. Giocano ruolo fondamentale le geostrutture già esistenti. Esempi di strutture termo-attive, come fondazioni, tunnel, muri di contenimento e diaframmi possono essere facilmente trovati in Europa, negli Stati Uniti e in Cina (Bourne-Webb et al., 2016)

Il primo diaframma termoattivo è del 1996, in Austria (Brandl, 2006). I diaframmi sono ampiamente utilizzati negli scavi urbani per gli scantinati di edifici o per opere sotterranee realizzate con il metodo del cut & cover.

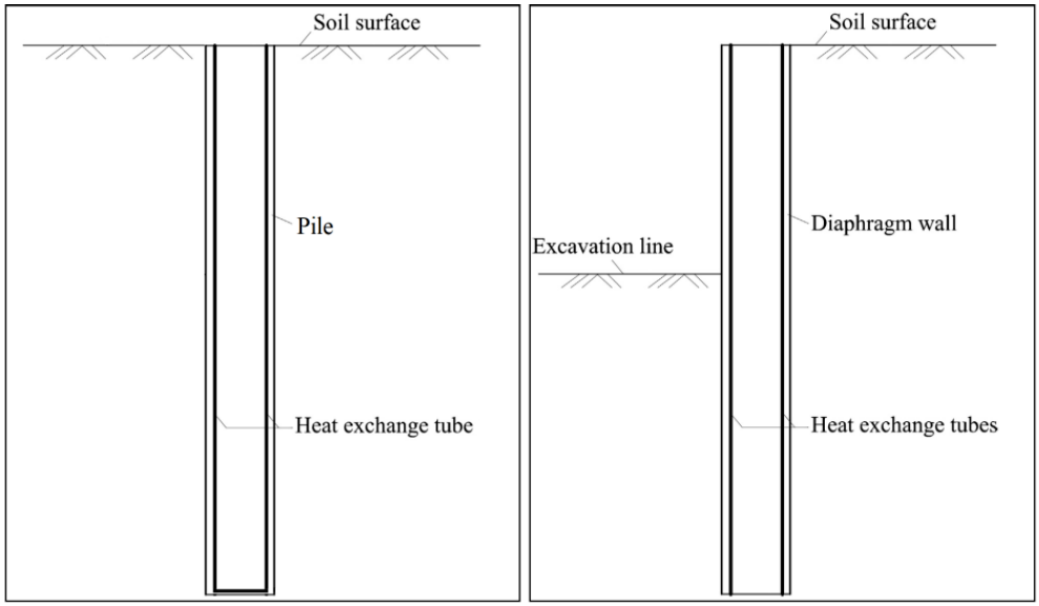


FIGURA 15 PALO DI FONDAZIONE (A SINISTRA) E DIAFRAMMA (A DESTRA) (SUN ET AL., 2013)

Come mostrato in Figura 15 la principale differenza tra i due tipi di geostrutture è che il muro del diaframma è circondato da un lato dal suolo e dall'altra parte dall'aria di scavo. Durante la

modellazione va tenuto in conto il cambio delle condizioni al contorno passando da terreno ad aria.

È possibile elencare i casi esistenti di muri di sostegno utilizzati come scambiatori di calore nel Regno Unito, in Austria, in Germania e in Cina (Bourne-Webb et al., 2016). Le normative esistenti non forniscono linee guida specifiche per le procedure di progettazione delle pareti energetiche pertanto sono di fondamentale importanza le pubblicazioni scientifiche su questi lavori.

Nei seguenti paragrafi si parlerà più in dettaglio di alcune geostrutture energetiche.

2.5.4.1 BVLGARI HOTEL, LONDRA – REGNO UNITO (AMIS ET AL., 2010)

L'albergo Bvlgari a Londra nel Regno Unito è una dalle prime geostrutture energetiche inglesi. Per la realizzazione dei piani interrati dell'albergo è stata occupata una superficie che si protrae per 25 m di profondità, l'equivalente di 6 piani sotto il livello del piano campagna. Da progetto è stata definita la costruzione di un diaframma composta da 39 pannelli di 800 mm di spessore. La particolarità di questo progetto è che le serpentine sono state introdotte nei pali di fondazione solo sul lato del palo a contatto con il terreno. A causa dell'elevata entità del carico fornito dalla sovrastruttura che si estende per oltre 10 piani è stato necessario ridimensionare il muro di fondazione, ottenendo una maggiore superficie per lo scambio del calore.

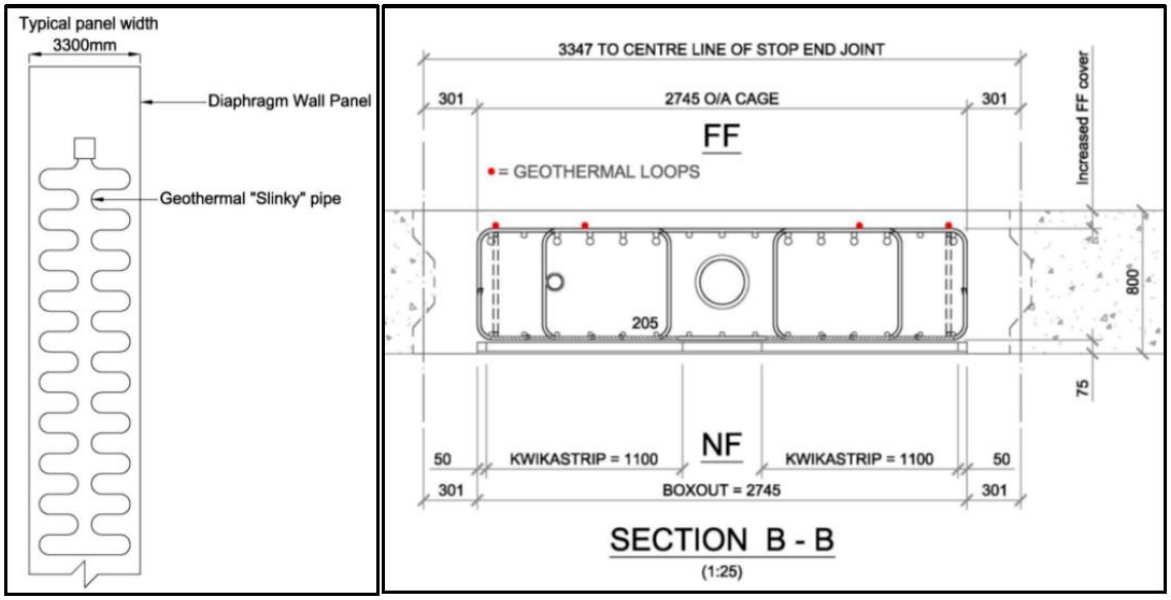


FIGURA 16 A SINISTRA UNA CONFIGURAZIONE DELLE SERPENTINE NEL PANNELLO. A DESTRA UNA SEZIONE DEL PANELLO E DEL MURO CON LA CONFIGURAZIONE GEOTERMICA DELLE SERPENTINE

2.5.4.2 VIENNA METRO LINE U2 – AUSTRIA (BRANDL, 2006-2016)

Il progetto dell'ampliamento della linea metropolitana viennese U2, in Austria, è stata la prima applicazione su grande scala della tecnologia GSHP nell'ingegneria delle metropolitane a livello mondiale. Il metodo di costruzione era il cut & cover e pertanto le stazioni erano dotate di assorbitori nelle pareti del diaframma, nelle solette di base e tra il rivestimento primario e quello secondario del supporto della galleria. Sono state effettuate analisi numeriche per determinare gli effetti termici e meccanici nella struttura e per capire la configurazione ottimale del sistema.

Ad oggi le evidenze relative alla modellazione numerica e al calcolo del progetto non sono disponibili in letteratura. A causa delle varie incertezze in fase di progettazione, è stato implementato il metodo osservazionale utilizzando ulteriori sistemi di monitoraggio e di controllo di qualità. Tutte le strutture termo-attive sono state dotate di diversi dispositivi di misurazione per regolamentare e ottimizzare il sistema geotermico.

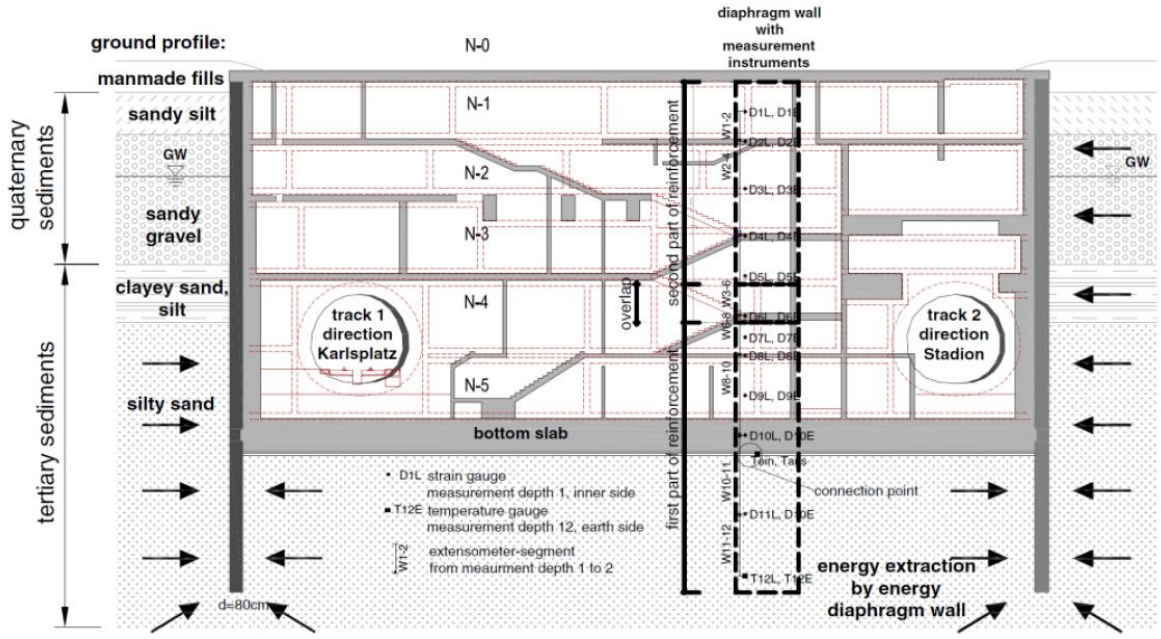


FIGURA 17 SEZIONE TIPICA DELLA LINEA U2 DELLA METROPOLITANA VIENNESE. (BRANDL,2006)

In Figura 17, nella sezione tipica della linea U2 della metropolitana viennese, sono indicate le posizioni degli strumenti di misura. Oltre alla misurazione operativa, sono stati installati alcuni misuratori di temperatura e alcuni estensimetri. Data la mancanza di dati sperimentali riferiti al comportamento termomeccanico delle pareti di energia, il tipo di monitoraggio in situ, presente nella metropolitana viennese, potrebbe essere utile in future applicazioni. Ad ogni modo non è possibile trovare i risultati di questo caso reale di studio.

2.5.5 Pannelli radianti

Vale la pena menzionare l'impianto di riscaldamento a pannelli radianti che rappresenta un esempio di riscaldamento a bassa temperatura tramite ampie superfici radianti. L'impianto è distribuito su tutta la superficie dell'abitazione. Esso consiste normalmente in un sistema di tubazioni organizzate in anelli o circuiti vincolati da uno strato d'isolante. Lo strato isolante poggia sul sottofondo grezzo e i tubi generalmente sono di materiale plastico, questi tubi vengono annegati nel massetto del pavimento. Il medio scaldante viene distribuito ai circuiti tramite un sistema di collettori, dotati di valvole che consentono l'impostazione della corretta portata ad ogni anello. Questi impianti oltre che per il riscaldamento possono essere utilizzati anche per il raffrescamento estivo. L'impianto pertanto funziona sia in condizioni estive che in quelle invernali permettendo così l'installazione di un unico sistema valido per tutta la durata annuale. Lo schema di regolazione è quello base: un gruppo frigo in aggiunta al generatore di calore o in alternativa l'impiego di una pompa di calore. Per il controllo dell'umidità relativa in ambiente è possibile collegare direttamente all'impianto una unità di deumidificazione ad aria neutra che verrà attivata direttamente dal sistema di regolazione. In funzione dell'isolamento termico, acustico e del carico che si prevede che graverà sul pavimento viene scelto il materassino isolante. I più comuni materassini sono in polistirolo espanso o schiuma poliuretanica espansa con densità da 20 kg/m3 a 35 kg/m3, e possono avere diversi spessori, tipicamente dai 10 mm in su. Altri materassini sono quelli per la bio-edilizia in sughero.

Per l'isolamento termico bisogna riferirsi alla normativa UNI EN 1264-4 dove sono specificati i valori minimi di resistenza termica $R_{\lambda min}$ [m^2 K/W] o conducibilità termica massima λ [W/mK] ammessa tra il pavimento e la superficie sottostante.

Sono stati menzionati i pannelli radianti per la loro varietà di configurazioni delle tubazioni, utili per prendere spunto per le configurazioni da applicare nel nostro studio.

CAPITOLO 3

Configurazioni di attivazione termica

3.1 Caratterizzazione termica del sottosuolo e delle sonde

Per eseguire un'analisi completa si parte considerando una porzione di terreno di dimensioni pari a un campo sonde e si valutano gli apporti energetici in condizioni indisturbate. Prendendo una porzione di terreno (un cubo) lo scambio di energia avviene attraverso i sei lati:

- Irraggiamento solare, convezione con l'atmosfera e calore estratto dalla vegetazione intervengono dall'alto;
- Lateralmente si ha apporto o estrazione di energia attraverso i diversi acquiferi;
- Flusso geotermico dal basso.

Non potendo applicare la sovrapposizione degli effetti dei diversi fattori poiché bisogna tenere in considerazione la mutua interferenza tra i diversi fattori, sono necessari modelli matematici complessi per il bilancio globale che devono essere sviluppati caso per caso.

Per effettuare il bilancio globale attraverso i modelli matematici è richiesta la conoscenza del flusso termico, delle proprietà del sottosuolo (conduttività λ, capacità termica massica c_p e massa volumica ρ) e la resistenza termica apparente delle sonde. Dal momento che è abbastanza difficile, laborioso e costoso eseguire un'indagine puntuale del terreno si procede con un'analisi statistica attraverso la suddivisione di aree omogenee caratterizzate da valori di conduttività, capacità termica e massa volumica dipendenti dal tempo e dalla temperatura. Nei modelli analitici e/o ibridi non si può fare riferimento a sottosuoli disomogenei e tanto meno non si possono utilizzare riempimenti delle sonde differenziati con la profondità. Quindi un primo passo è quello di effettuare un'analisi statistica e ricavare un metodo valido per ottenere un unico valore rappresentativo del volume interessato preso in esame. È possibile studiare metodi analitici o empirici per costruire una rappresentazione equivalente della realtà. La variazione delle proprietà nel tempo (sia essa legata alla temperatura o alla modifica dell'altezza di falda) è decisamente più problematica: in particolare si esce dal modello reale solo tenendo conto delle condizioni più svantaggiose e considerando le fluttuazioni nel tempo alla stregua di un contributo aggiuntivo a favore del fattore di sicurezza. (Delmastro e al.,2015).

In funzione della tipologia di terreno che si sta studiando variano le proprietà termiche. Un ruolo importante è ricoperto dalla presenza di acqua o di eventuali cavita. Il comportamento termico varia in funzione della posizione spaziale. La massa volumica dell'acqua è 1000 volte maggiore rispetto a quella dell'aria, mentre la conducibilità termica supera quella dell'aria di 20 volte, la capacità termica massica è 4 volte superiore. Dal momento che l'acqua nelle

porosità, sia nei terreni che nelle rocce, varia in funzione del tempo, è insufficiente la caratterizzazione litologica del sottosuolo e pertanto va integrata con un'indagine idrogeologica. Va osservato che tutte le proprietà termiche di tutte le porzioni del sottosuolo che sono funzione della variabilità del contenuto di acqua vanno analizzate nei diversi periodi, quindi in funzione del tempo. Sono presenti studi in letteratura relativi alle variazioni delle proprietà termiche in funzione del contenuto d'acqua e osservazioni sulla non linearità tra la conduttività termica e l'umidità, in particolare per elevati valori del contenuto d'acqua la variazione dell'umidità non influisce molto sulla resistività termica, mentre per bassi valori del contenuto d'acqua le variazioni sono molto più significative. (Delmastro e al., 2015).

L'instabilità per i terreni fini si presenta al di sotto del 20-30% dei valori di umidità. Questo valore di umidità varia in funzione del terreno ed è correlabile ai limiti di Attenberg.

Nei terreni coesivi si utilizza l'indice di liquidità LI per caratterizzare il comportamento termico. L'indice di liquidità in questo caso viene anche chiamato TSI (Thermal Stability Index). Se l'indice TSI è maggiore di zero allora la stabilità è probabile e la conduttività può essere assunta stabile, mentre se l'indice TSI è minore di zero allora è l'instabilità che è molto probabile. Se le argille sono sature e confinano una falda in pressione inferiore, il problema non esiste poiché l'acqua, nello stato di vapore, non ha possibilità di movimento. Se le argille sono insature allora l'acqua può migrare verso il basso.

Nei terreni a grana grossolana l'instabilità è correlata all'assenza di saturazione. L'indeterminazione del grado di saturazione si presenta solo per pochi metri sopra il livello piezometrico a causa della risalita capillare: sotto falda la saturazione è completa mentre sopra falda si può considerare ai fini pratici terreno completamente secco senza commettere ulteriori errori.

La caratterizzazione termica del sottosuolo può essere effettuata in diversi modi:

- Su base tabellare;
- Mediante metodi analitici;
- Mediante misure in laboratorio e in situ;

Per quanto riguarda la caratterizzazione della sonda, questa può essere effettuata mediante la prova in situ (GeRT) utilizzata per la determinazione sperimentale della conducibilità termica del terreno. Nei due paragrafi successivi viene aperta una parentesi su due strutture potenzialmente utilizzabili per l'impianto che verrà studiato. Le strutture sono di particolare interesse poiché presentano delle grandi superfici sulle quali applicare l'impianto che verrà descritto nel capitolo successivo.

3.2 Muri di sostegno

Un manufatto murario con la funzione principale di sostenere o contenere, fonti di terreno di qualsiasi natura e tipologia, eventualmente artificiali o acqua come piscine e dighe, è un muro di sostegno. Dal momento che i muri di sostegno presentano delle superfici di dimensioni notevoli, ne viene descritta la loro caratteristica e i loro aspetti salienti.

FIGURA 18 COSTRUZIONE DI UN MURO DI SOSTEGNO

La suddivisione dei muri di sostegno viene fatta in base al posizionamento oppure in funzione del principio statico con cui resistono:

- Muri di controripa, sostengono terre sovrastanti il manufatto;
- Muri di sottoripa o sottoscarpa, che sostengono un manufatto;

Questi possono essere costruiti in muratura di mattoni, muratura di calcestruzzo non armato, cemento armato o gabbioni.

I muri possono essere suddivisi anche secondo il principio statico:

- Muri a gravità
- Muri a contrafforti
- Muri a mensola

Solo i muri a gravità a volte possono essere realizzati con calcestruzzo non armato, mentre per gli altri due, almeno per il pannello murario, che è soggetto a sforzi di flessione deve essere inserita una quantità calcolata di armatura.

Per garantire il corretto funzionamento di un muro devono essere soddisfate le verifiche di calcolo:

- Verifica a traslazione (o slittamento)
- Verifica allo stato limite di equilibrio (o ribaltamento)
- Verifica al carico limite in fondazione (o capacità portante)
- Verifica di stabilità globale

In tutte le verifiche vanno introdotti i coefficienti di sicurezza sulle azioni e/o sulle resistenze. In Italia sono regolate dalle Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 17/1/2018) mentre in ambito europeo sono trattate nell'Eurocodice 7.

I criteri di dimensionamento che vengono seguiti sono i seguenti:

- Muri di sostegno a gravità (altezza massima 3,5 m): questi resistono alla spinta che viene applicata dal terreno solo per mezzo del peso proprio. La loro realizzazione viene eseguita in muratura di mattoni o pietrame o in alternativa si utilizza il calcestruzzo. Il criterio stabilisce che la risultante delle azioni sulla fondazione deve essere interna al nocciolo d'inerzia.
- Muri di sostegno a mensola e a contrafforti e speroni: in questo caso i muri sfruttano a favore della stabilità a ribaltamento e alla traslazione anche il terreno che grava sulla fondazione. Tipicamente queste strutture sono armate in modo tale da resistere anche a flessione e taglio. Questi muri vengono preferibilmente utilizzati per muri di grande altezza (fino a 7,5 metri di altezza) la loro particolarità è che richiedono una determinata cura nella lavorazione di carpenteria e armatura.

Una strategia che viene utilizzata per ridurre l'intensità di spinta che il terreno a monte esercita sulla struttura è quella di riempire, ove possibile, con terreni sabbiosi e/o ghiaiosi aventi un angolo di resistenza al taglio abbastanza elevato. Un'altra strategia per ridurre la spinta esercitata dall'acqua è quella di realizzare a monte, prima del riempimento, dei sistemi di drenaggio dietro l'opera di sostegno. Queste opere vengono fatte con dei fori di drenaggio e posizionando dei materiali drenanti a tergo del muro.

Le NTC-18 prevedono per le opere di sostegno analisi relative alle condizioni di esercizio (SLE) e le verifiche di sicurezza relative agli stati limite ultimi (SLU).

Gli stati limite ultimi che devono essere verificati per le opere di sostegno sono i seguenti: EQU, STR e GEO.

Le azioni che entrano in gioco durante il calcolo strutturale del muro di sostegno sono quelle dovute al peso proprio del terreno e del materiale di riempimento, al sovraccarico, all'acqua, eventuali ancoraggi, il moto ondoso, urti e collisioni, variazioni di temperatura e neve. Queste azioni usualmente vengono suddivise nei tre gruppi principali:

- Carichi permanenti;
- Carichi variabili;
- Carichi permanenti non strutturali.

Per la caratterizzazione del terreno vanno eseguite delle analisi appropriate, mentre i valori del calcestruzzo usualmente sono conosciuti perché sono quelli decisi dal progettista.

3.3 Parcheggi sotterranei

Un'altra struttura che presenta delle superfici notevoli per una possibile configurazione di attivazione termica sono i parcheggi sotterranei. In questo caso il parcheggio viene realizzato in sotterraneo e nel presente paragrafo verranno presentate le normative che regolano la realizzazione delle suddette opere. La legge italiana obbliga in caso di costruzioni a garantire almeno 1 m^2 di parcheggio ogni 10 m^3 di costruzione. Il D.P.R. 495/1992 stabilisce che le dimensioni minime per un parcheggio in una superficie libera da ingombri devono essere paria a 4,5m x 2,3m, considerando che in Italia circolano oltre 22 milioni di autoveicoli, si ricava che la superficie complessiva destinata per l'uso di parcheggio dovrebbe superare oltre 1 miliardo di metri quadrati. Va considerato che oltre ai parcheggi permanenti per i residenti sono da considerare anche i parcheggi temporanei, ovvero quelli per i non-residenti. In Italia, il D.M. 1444/68 ha stabilito, per la prima volta, le dotazioni minime di spazi da utilizzarsi a parcheggi, obbligando cosi di riservare una quota di superficie destinata a parcheggio nelle nuove costruzioni. Successivamente la legge 122/1989 (Legge Tognoli) ha dato la facoltà ai Comuni di mettere a utilizzo dei residenti aree pubbliche per ricavare spazi di stazionamento, nel sottosuolo o in quota. In funzione alla forma dell'area da utilizzare a parcheggio e alla sua dimensione vengono fatte le seguenti suddivisioni:

- A sviluppo orizzontale, parcheggi al livello del piano campagna;
- A sviluppo verticali; in elevazione o interrati come ad esempio le autorimesse a rampe o le autorimesse meccaniche.

Se da un punto di vista economico del costo dell'impianto e della manutenzione conviene la realizzazione dei parcheggi a sviluppo orizzontale dall'altra parte viene penalizzato lo sfruttamento dell'area. Contrariamente avviene per i parcheggi in sotterraneo dove si limita lo sfruttamento dell'area superficiale ma aumentano i costi realizzativi.

FIGURA 19 ESEMPIO DI PARCHEGGIO SOTTERANEO

L'autorimessa fuori terra o interrata è l'area composta da una serie di piani di parcheggio sovrapposti l'uno sull'altro. Questi possono essere orizzontali o inclinati e attraverso delle

rampe di tipo rettilineo o elicoidale vengono connessi i vari piani. Nel caso di assenza di rampe di collegamento e di presenza di automatismi meccanizzati che spostano le autovetture, si parla di autosilo. Essendo parcheggi costruiti su più piani esiste la limitazione sull'altezza massima dei veicoli che possono entrare. Va posta particolare attenzione nella fase progettuale sulla disposizione delle strutture verticali come pilastri o setti in cemento armato. Le strutture verticali vanno progettate in maniera "intelligente" in modo da garantire gli spazi minimi delle corsie e delle postazioni permettendo così lo spazio necessario per le manovre. L'organizzazione interna dell'autorimessa è determinata pertanto dall'ampiezza delle corsie e dalla lunghezza e inclinazione degli stalli. Il D.M. 1° febbraio 1986 fissa alcune caratteristiche delle rampe come la pendenza massima e la larghezza. La larghezza massima è di 3 m in presenza di senso di marcia unico e di 4.5 m in caso di senso di marcia doppio mentre il limite massimo di pendenza è fissato al 20%. La tipologia di rampa che permette di sfruttare al meglio le prescrizioni della normativa è quella a pendenza rettilinea, dal momento che a parità di dislivello ha un ingombro minore. Il parcheggio interrato, dal punto di vista ambientale e architettonico, crea un impatto ambientale di gran lunga minore alle aree d'ingresso e d'uscita dallo stesso mentre il parcheggio multipiano, fuori terra, deve essere studiato con più attenzione poiché è simile a un edificio con facciate visibili.

I parcheggi meccanizzati automaticamente, gli autosilos, permettono un risparmio di cubatura dal momento che l'area riservata al singolo posto diminuisce in quanto non servono gli spazi per aprire le portiere e inoltre le altezze libere sono quelle minime concesse dalla normativa. Nei parcheggi meccanizzati l'altezza consentita tra il pavimento e il soffitto è di 1.80 m, questo è possibile perché non c'è la presenza delle persone. Contrariamente all'aumento del volume dei parcheggi automatizzati di un 40-50% rispetto a quelli tradizionali, aumentano i costi di manutenzione riguardanti i macchinari per il corretto funzionamento. La movimentazione verticale- orizzontale può essere effettuata in due maniere diverse o con la torre trasloelevatrice o con l'elevatore verticale ed il traslatore orizzontale. L'autoveicolo viene posizionato o prelevato sull'elevatore e questo riuscendo a muoversi a vari livelli di profondità colloca e/o preleva l'autovettura dallo stallo di parcheggio.

I parcheggi medio-grandi più diffusi possono essere suddivisi in quattro cattegorie:

- Sistema verticale a trasloelevatore
- Sistema verticale a stalli multipli contrapposti
- Sistema verticale a elevatore rotante
- Sistema verticale a elevatore fisso e carrelli traslatori

Altro aspetto fondamentale sono gli impianti tecnologici che garantiscono il funzionamento del parcheggio e forniscono il giusto grado di affidabilità e di sicurezza. Assieme al progetto edile, gli aspetti tecnici impiantistici che interagiscono con il progetto strutturale sono i seguenti:

- Impianto elettrico
- Impianto di illuminazione con luci di emergenza
- Impianto antincendio (sprinkler)
- Impianto idrico e di scarico bagni
- Sistema di ventilazione naturale e meccanico

- Impianto di evacuazione dei liquidi, vasche di decantazione, vasche di separazione fanghi, oli e benzina.
- Gruppo elettrogeno per l'alimentazione in emergenza delle meccanizzazioni (per parcheggi automatizzati)
- Per parcheggi automatizzati, impianti di movimentazione auto.

Il sistema impianti deve essere realizzato in riferimento alla legge n°46 del 5 marzo 1990, dal titolo "Norme per la sicurezza degli impianti".

3.4 Esecuzione di un'opera civile

Nei paragrafi precedenti sono stati descritti i muri di sostegno e i parcheggi sotterranei, due opere che presentano delle grandi superfici a contatto con il terreno e quindi potenzialmente utilizzabili per un eventuale attivazione termica. In questo paragrafo ci si concentrerà sulle frasi progettuali per l'esecuzione dell'opera civile e particolarmente sul momento nel quale vengono attivati termicamente. Il primo passo, come accennato precedentemente, è quello delle indagini. Per una corretta esecuzione, in questo primo step bisogna individuare il metodo di analisi per la caratterizzazione del terreno. Le indagini possono essere eseguite in diverse maniere sia applicando dei metodi invasivi che dei metodi non invasi. Alcune delle tecnologie per una corretta caratterizzazione sono le prove down-hole e cross-hole oppure semplici carotaggi per classificare cosi la stratigrafia del terreno in esame. Nel capitolo precedente si è discusso sul fatto che anche se l'indagine riportasse (come è normale che sia) una stratigrafia eterogenea, bisogna cercare di ricondursi a un valore medio e a un terreno omogeneo. Una volta effettuata l'analisi stratigrafica e individuata la falda, se non vi sono particolari problematiche si procede con la costruzione della struttura.

Una volta delimitata la zona del cantiere si procede con lo scavo e la bonifica dell'area interessata. Gettato il magrone (se non vi sono particolari terreni nei quali bisogna adottare dei pali) si procede con l'armatura e il cassero. Completata anche questa operazione, una volta eseguito il getto e lasciato asciugare il calcestruzzo durante il suo tempo di maturazione (in funzione della classe di resistenza), si procede con lo scassero.

Riassumendo le fasi esecutive per un'opera di fondazione sono le seguenti:

- Indagini e valutazioni del terreno con prelievo di campioni;
- Recinzione della zona interessata;
- Attrezzature, macchine e montaggio delle baracche;
- Assistenza agli impianti aerei e interrati;
- Sbancamento generale con macchine operatrici ed autocarro;
- Esecuzione scavi;
- Movimentazione meccanica del terreno;
- Armatura delle pareti di scavo;
- Casserature in legno per plinti e travi continue in calcestruzzo armato;

- Posa del ferro lavorato e getto del calcestruzzo;
- Disarmi e pulizie;
- Impermeabilizzazione dei muri contro terra con guaina bituminosa posata a caldo e rivestimento di protezione e con fogli plastici saldati con aria calda;
- Inserimento dell'impianto in esame, posa dei pannelli prefabbricati con le serpentine predisposte per lo scambio termico.
- Rinterri eseguiti con macchine operatrici e compattazione del terreno.

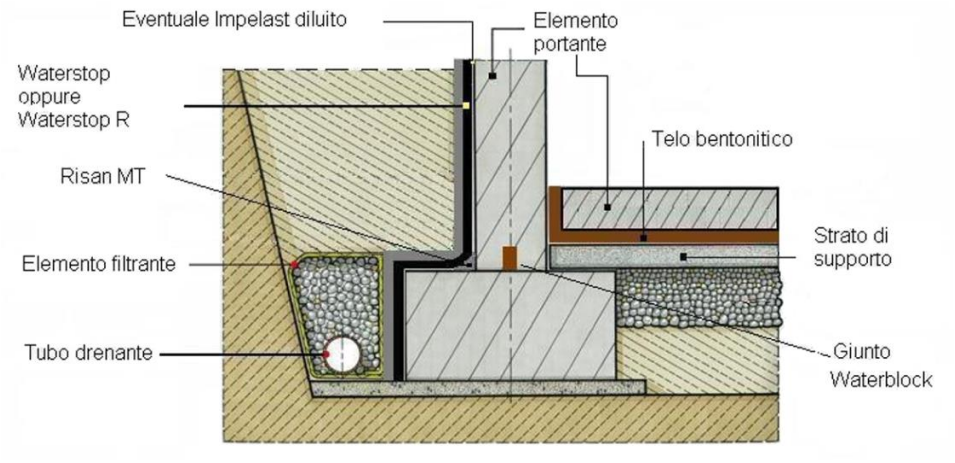


FIGURA 20 PARTICOLARE COSTRUTTIVO DI UN MURO CONTRO TERRA

L'idea di base è quella di fissare le sonde tra il geotessuto (in casi di muri contro terra) in presenza di barbacani oppure il waterstop in caso di abitazioni civili e il terreno che verrà riposizionato contro la struttura portante. Come mostrato in questo paragrafo, la posa dei pannelli prefabbricati portanti le serpentine predisposte per lo scambio termico, viene effettuata a lavori strutturali terminati. Si nota che l'attivazione termica della struttura non comporta particolari calcoli strutturali ma va posta una certa cura nella disposizione delle serpentine. Come si vedrà nel capitolo successivo un'errata posizione delle tubazioni potrebbe comportare il malfunzionamento dell'intero impianto.

3.5 Attivazione termica

L'obbiettivo di questo lavoro è quello di attivare termicamente i muri contro terra dei piani interrati degli edifici di civile abitazione. Per poter effettuare un'attivazione termica efficace dei muri contro terra va fatto riferimento a tutte le caratteristiche descritte nei paragrafi precedenti, dove si è parlato della geotermia a bassa entalpia, delle sonde geotermiche con le loro varie caratteristiche, sono stati affrontati da vicino le problematiche relative alle tubazioni, ai fluidi termovettori, agli antigelo, i sistemi a sonde orizzontali e verticali, le pompe di calore e le geostrutture. In questo paragrafo sì studieranno le possibili disposizioni delle sonde geotermiche. Verrà affrontato il processo relativo alla realizzazione delle strutture interrate in

funzione dei terreni in cui vengono costruite per poi andare a ottimizzare il processo di attivazione termica in funzione del posizionamento delle sonde studiando varie configurazioni. In questo caso si potrà parlare di sonde posizionate verticalmente, ovvero sullo strato superficiale (fino ad un massimo di 10 m di profondità). Questi sono impianti a circuito chiuso come descritto in precedenza.

Per ottimizzare l'attivazione termica di un muro contro terra bisogna studiare a fondo come avviene la trasmissione dell'energia termica. Nel capitolo precedente si sono studiate le varie tipologie di sistemi e il loro funzionamento, si è parlato sia del materiale dal quale sono costituite le sonde geotermiche sia del fluido che li attraversa. Successivamente si è parlato anche delle pompe di calore e del loro funzionamento, necessarie affinché funzioni l'intero sistema nel suo complesso. Ora si vedranno più da vicino i tre differenti meccanismi attraverso i quali si tramette l'energia termica:

- Conduzione: si lega al trasferimento di energia cinetica dalle molecole ad alta temperatura a quelle a bassa temperatura. È la metodologia tipica del trasferimento del calore dei corpi solidi e non c'è mai movimento di materia.
- Convezione: il calore viene trasportato per via del movimento dei fluidi. Si instaurano dei moti convettivi nel fluido, questo viene scaturito dai differenziali di temperatura (convezione naturale), pertanto avviene in questo caso il trasferimento di materia. Questa ha energia interna differente punto per punto poiché è caratterizzata da diverse condizioni di temperatura. La convezione si verifica con maggiore facilità nello scambio di calore tra un corpo solido e un fluido.
- Irraggiamento: si verifica questa trasmissione del calore per via delle onde elettromagnetiche assorbite ed emesse dai corpi.

Si ricorda che per il secondo principio della termodinamica l'energia termica viene ceduta dal corpo a temperatura più alta a quello a temperatura inferiore. Nel caso si volesse un trasferimento del calore nel verso opposto allora è necessario compiere del lavoro e quindi bisogna utilizzare dell'energia di forma diversa da quella termica.

L'attivazione termica dei muri contro terra, come descritto nel paragrafo precedente, viene effettuata a opera strutturale compiuta. L'operazione viene svolta ponendo le serpentine tra il muro e il terreno. Per effettuare la posa delle serpentine si procede con l'inserimento delle stesse dopo il disarmo del calcestruzzo e prima del rinterro nel caso di strutture nuove. Nel caso di strutture esistenti l'attivazione viene effettuata sbancando il terreno vicino alla fondazione, inserendo le tubazioni e effettuando il ripristino del terreno. In entrambi i casi appena menzionati il funzionamento dell'impianto è analogo poiché l'efficienza viene determinata dallo scambio di calore tra il fluido termovettore circolante nelle tubazioni e il terreno. L'attivazione termica del muro è caratterizzata dalla modalità di disposizione delle serpentine, dalla temperatura esterna, dallo spessore delle fondazioni e dalle caratteristiche del terreno.

3.5.1 Layout sonde geotermiche

La disposizione delle sonde geotermiche può essere effettuata in diverse modalità. Come descritto nei capitoli in precedenza, alcuni fattori della disposizione delle tubazioni come interassi, saldature e collegamenti variano in funzione del materiale, delle tubazioni, del diametro e del fluido termovettore. Vengono proposte alcune disposizioni possibili, di forma regolare, per una facilità di montaggio.

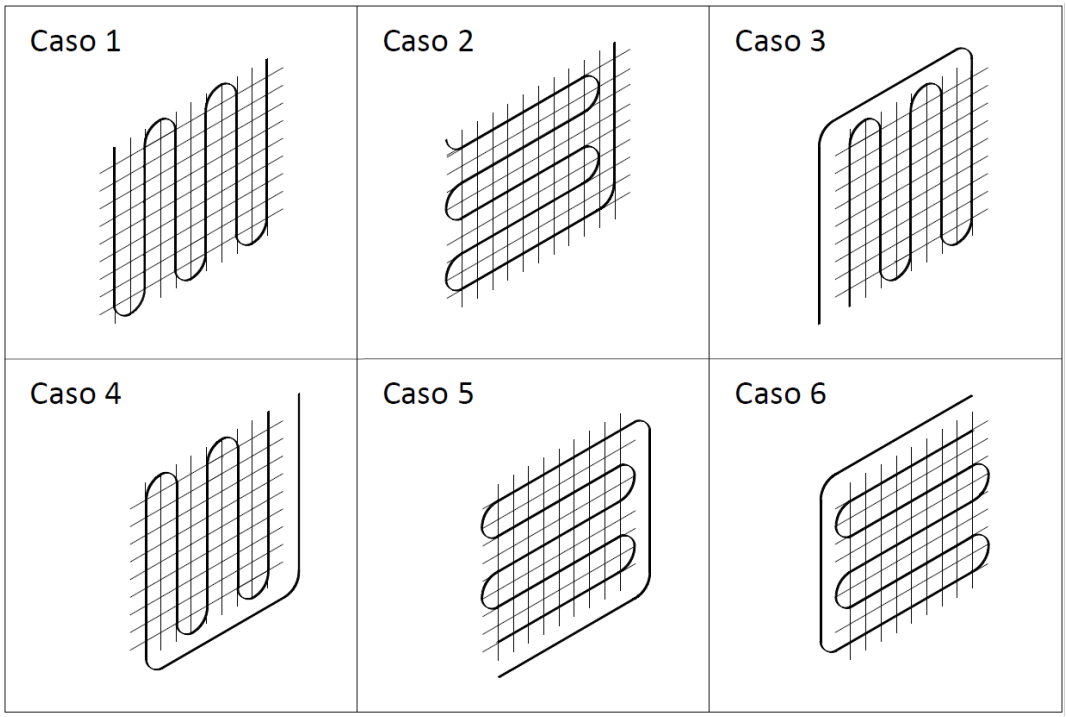


FIGURA 21 POSSIBILI CONFIGURAZIONI DEGLI IMPIANTI

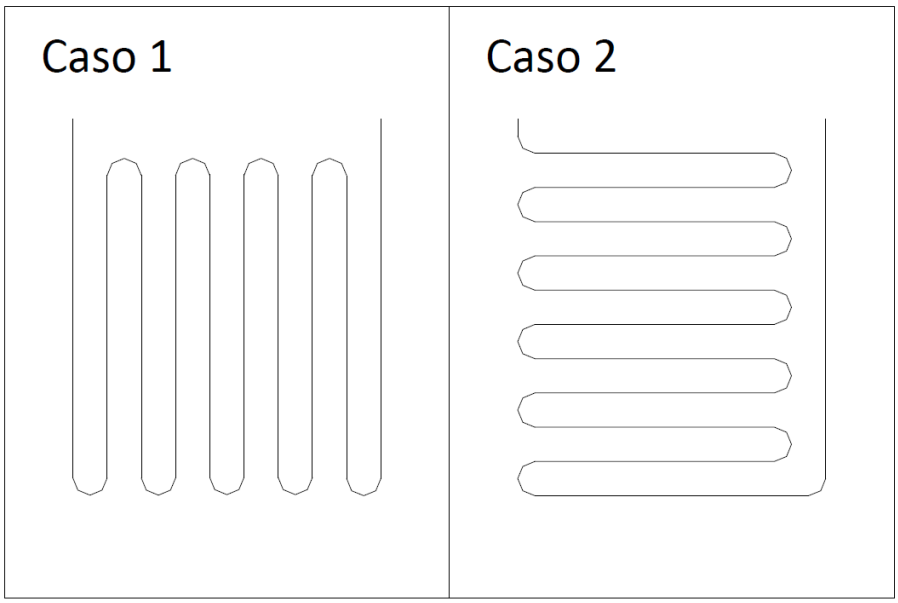


FIGURA 22 CONFIGURAZIONI DELLE SERPENTINE

In Figura 21 vengono riportati 6 possibili configurazioni delle sonde da applicare sulla struttura. In Figura 22 invece sono rappresentate due delle configurazioni della Figura 21 Possibili configurazioni degli impiantiFigura 21 con delle variazioni sulle lunghezze delle tubazioni e sull'interasse tra una serpentina e l'altra. Le tubazioni possono essere preparate precedentemente, legate a una rete elettrosaldata in modo tale da facilitare la posa in sito. In base al verso predominante delle tubazioni, alla loro lunghezza e al tipo di giunti che vengono effettuati, è possibile ottenere diversi layout. Ognuno di questi layout fornisce una produzione di energia diversa rispetto agli altri.

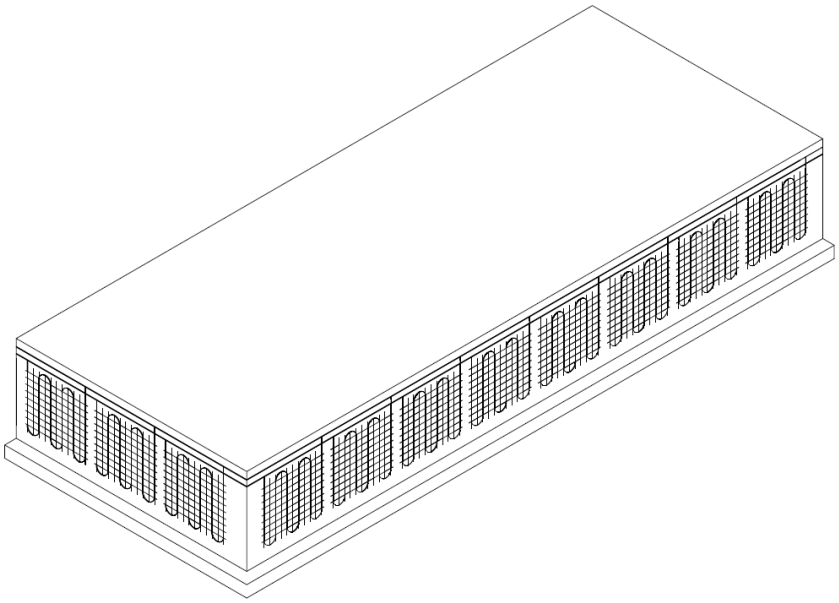


FIGURA 23 SERIE DI PANNELLI LUNGO LE FONDAZIONI DI UNA STRUTTURA

In Figura 23 sono presenti una serie di pannelli modulari che lavorano in parallelo. Ci si riferisce alle fondazioni di una struttura sulle quali viene applicata in parallelo la configurazione 1 mostrata precedentemente in Figura 21.

3.5.2 Installazione dell'impianto

Nei paragrafi precedenti gli argomenti trattati sono stati quelli relativi alla geotermia superficiale, alle tubazioni, ai fluidi termovettori e successivamente è stata affrontata l'interazione tra il terreno e le strutture che hanno un maggior perimetro a contatto con il terreno, concentrando l'attenzione sui muri di sostegno e sui parcheggi sotterranei portando alla luce alcuni esempi in letteratura già esistenti. L'obiettivo di questo lavoro è quello di andare a inserire dei pannelli modulari di sonde geotermiche a contatto tra il terreno e la superficie della struttura realizzata.

Questo processo dell'attivazione termica può avvenire in due momenti diversi:

- Durante la realizzazione di una nuova struttura

- Applicando le sonde geotermiche in un secondo momento su una struttura già esistente.

Per quanto riguarda il primo caso, la parte dell'attivazione termica viene studiata durante la fase di progettazione. In questo ambito la sua realizzazione è più facilmente eseguibile poiché essa, intesa come lavoro esecutivo, verrà posizionata dopo lo scassero delle fondazioni. Maturato il calcestruzzo gettato, vengono rimossi i casseri. A questo punto sulla facciata esterna (nel caso di realizzazione di una struttura) o sulla facciata interna (nel caso di muri controterra) vengono applicati i pannelli modulari delle sonde geotermiche (Figura 21) Terminata la posa delle serpentine si procede con il ripristino del terreno, che verrà posizionato a contatto con il muro. Tra il muro e la terra avremmo le sonde geotermiche.

Nel secondo caso, a opera già esistente, una volta individuata la struttura interessata, le operazioni da eseguire sono quelle relative allo scavo del terreno che è a contatto con la superficie perimetrale della struttura, successivamente vengono posizionati i pannelli modulari delle sonde geotermiche e a posizionamento completo si ripristina la terra spostata andando a ottenere la condizione iniziale con le serpentine inserite. Procedendo cosi la struttura e il terreno non vengono alterati minimamente ma viene effettuata l'attivazione termica delle sonde geotermiche

CAPITOLO 4

Simulazione numerica del muro attivato termicamente

4.1 Il software agli elementi finiti FEFLOW

Per la simulazione numerica del problema in esame viene utilizzato il software agli elementi finiti FEFLOW, il cui nome sta per Finite Element subsurface FLOW system. Viene particolarmente utilizzato per le simulazioni del flusso di acque sotterranee, il trasferimento di calore in mezzi porosi e in mezzi fratturati e il trasferimento di massa. Attraverso l'utilizzo delle analisi agli elementi finiti, il software risolve l'equazione del flusso delle acque sotterranee ed esegue le analisi sia in condizioni sature che insature. Il metodo agli elementi finiti del problema è espresso come un sistema di equazioni algebriche, le quali una volta risolte, il programma fornisce valori approssimati delle incognite per un numero discreto di punti nel dominio. Gli elementi finiti sono un supporto attraverso i quali il programma suddivide il problema grande in problemi composti da più parti piccoli e semplici. Il FEM attraverso metodi numerici risolve il sistema riducendo al minimo una funzione di errore associata.

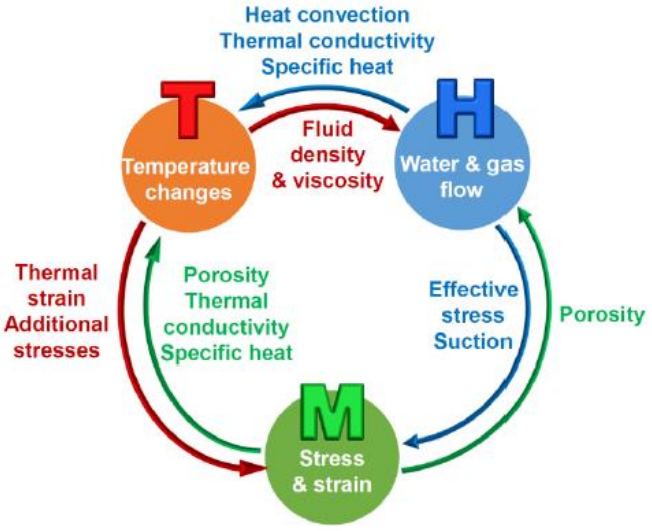


FIGURA 24 RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEL PROBLEMA TERMO-IDRO-MECCANICO

L'insieme delle equazioni differenziali che definiscono un problema termo-idro-meccanico (Figura 24) non può essere facilmente risolto attraverso soluzioni analitiche. Si possono trovare soluzioni approssimate utilizzando metodi numerici. Nel metodo degli elementi finiti il dominio

del problema è suddiviso in elementi discreti e le equazioni che governano il problema sono scritte e risolte per punti o nodi a cui sono collegati elementi adiacenti. Il metodo agli elementi finiti fornisce una soluzione esatta a un'approssimazione differenziale del problema attraverso l'utilizzo delle funzioni di forma (funzioni di approssimazione). Inizialmente si passa dal modello reale a un modello discretizzato generando una "mesh" e suddividendo cosi il modello in piccole regioni chiamate elementi finiti. Nel problema THM devono essere definite le leggi di compatibilità, le leggi di equilibrio e le leggi costitutive per l'analisi meccanica. Il trasferimento di calore è controllato dalle equazioni di conservazione dell'energia. Il processo idraulico nei mezzi porosi è governato dalle equazioni della conservazione della massa e dalla velocità di Darcy. Vanno definite diverse proprietà e parametri per caratterizzare i materiali coinvolti oltre alle equazioni suddette. Focalizzando l'attenzione sull'efficienza energetica è possibile utilizzare un approccio disaccoppiato (TH) andando così a semplificare i calcoli.

4.1.1 Problema termo-idraulico: equazioni

Viene considerata l'analisi accoppiata termoidraulica, la quale permette di accoppiare lo studio dei flussi idraulici con lo studio dei flussi di calore.

Il problema termo-idraulico da un punto di vista matematico viene governato dalle seguenti tre equazioni:

- Equazione di conservazione dell'energia;
- Equazione di conservazione della massa;
- Legge di Darcy.

Assumendo la fase solida incomprimibile e la densità del fluido costante si avrà, per il principio di conservazione della massa che:

$$-\nabla \cdot (v_i) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \qquad (eq. 5.1)$$

Dove:

- ∇ → divergenza;
- ε_v → deformazione volumetrica.
- $\frac{\partial \varepsilon v}{\partial t}$ → derivata nel tempo;
- t → tempo;
- v_i → velocità del fluido;

Di seguito viene riportata l'espressione della legge di Darcy:

$$v_i = -k_i \nabla h \qquad (eq. 5.2)$$

Dove:

- ∇ → gradiente;

- k_i → conducibilità idraulica / coefficiente di permeabilità del mezzo poroso;
- h → carico idraulico totale

Inserendo la legge di Darcy nell'equazione (eq.5.1) si ottiene:

$$-\nabla \cdot (-k_i \nabla h) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot (k_i \nabla h) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \qquad (eq. 5.3)$$

Dentro l'equazione della conservazione dell'energia compaiono i seguenti contributi:

- calore scambiato per irraggiamento;
- calore scambiato per convezione;
- calore scambiato per conduzione.

Il calore scambiato per irraggiamento, dal momento che è una quantità irrilevante, viene generalmente trascurato nel campo di applicazione in oggetto.

Lo scambio di calore per convezione principalmente è legato alla presenza del fluido in movimento, considerando l'ipotesi di mezzo saturo.

La conduzione avviene per via del contatto tra due corpi a temperatura diversa. Questo fenomeno è legato alla conducibilità termica del mezzo. Lo scambio di calore principalmente avviene a causa della differenza di energia cinetica a livello molecolare.

Ora si riportano le espressioni riguardanti la conduzione e la convezione.

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T$$

$$q_C = c_w \rho_w v_i \Delta T$$

Dove:

- $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ → conducibilità termica del materiale. È una quantità fornita dal rapporto, in condizioni stazionarie, del flusso di calore e del gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore. Per flusso di calore si intende la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie;
- $c_w \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ → calore specifico del fluido. Rappresenta, in condizioni di pressione costante, la quantità di energia necessaria per un materiale di 1 kg di incrementare di 1 K la temperatura;
- $\rho_w \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ → densità del fluido;
- ΔT $[°C]$ → rappresenta la differenza di temperatura tra i due corpi.

L'equazione finale, tenendo conto del fenomeno di convezione, del fenomeno di conduzione e del termine relativo all'accumulo di calore poiché in regime transitorio, per il principio della conservazione dell'energia viene riscritta come:

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

Dove:

- $c\rho$ → è la capacità termica del terreno. Questo termine comprende sia il termine della fase solida $c_s\rho_s$ che di quella liquida $c_w\rho_w$. L'espressione completa è la seguente:
$$c\rho = nc_w\rho_w + (1-n)c_s\rho_s$$
- λ → esprime la conducibilità termica del terreno. Anche in questo caso il termine comprende sia la parte solida che quella liquida. Di seguito si riporta l'espressione corretta:
$$\lambda = n\lambda_w + (1-n)\lambda_s$$
- n → porosità del terreno.

4.1.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno possono essere di tre tipi:

- Condizioni al contorno di Dirichlet o di 1° tipo;
- Condizioni al contorno di Neumann o di 2° tipo;
- Condizioni al contorno di Cauchy o di 3° tipo.

La condizione al contorno di tipo Dirichlet implica la conoscenza della soluzione su un particolare punto/contorno del dominio del problema, pertanto si assume un valore che la variabile primaria deve assumere in quel punto/contorno. Questa potrebbe essere nelle analisi termoidrauliche una condizione che descrive un carico idraulico noto o una zona a temperatura nota. Quindi specifica i valori che la soluzione deve assumere su una superficie come ad esempio $y = f(\boldsymbol{r}, t)$. Le condizioni al contorno di Neumann vengono imposte su una equazione differenziale ordinaria o una alle derivate parziali, andando a specificare i valori che la derivata di una soluzione deve assumere sul contorno del dominio. La condizione al contorno di tipo Cauchy è una condizione al contorno in cui sono dati il valore della funzione incognita sui bordi del dominio di definizione del problema differenziale e il valore della sua derivata direzionale normale a tale superficie. Questo corrisponde a imporre sia una condizione al contorno di Neuman che una condizione al contorno di Dirichlet.

4.2 Realizzazione del modello numerico

4.2.1 Geometria del problema

Si valuta in generale l'efficacia di diverse disposizioni delle serpentine in una molteplicità di condizioni del sito. Il primo passo è la creazione del modello 2D su AutoCad schematizzando la geometria nella seguente maniera:

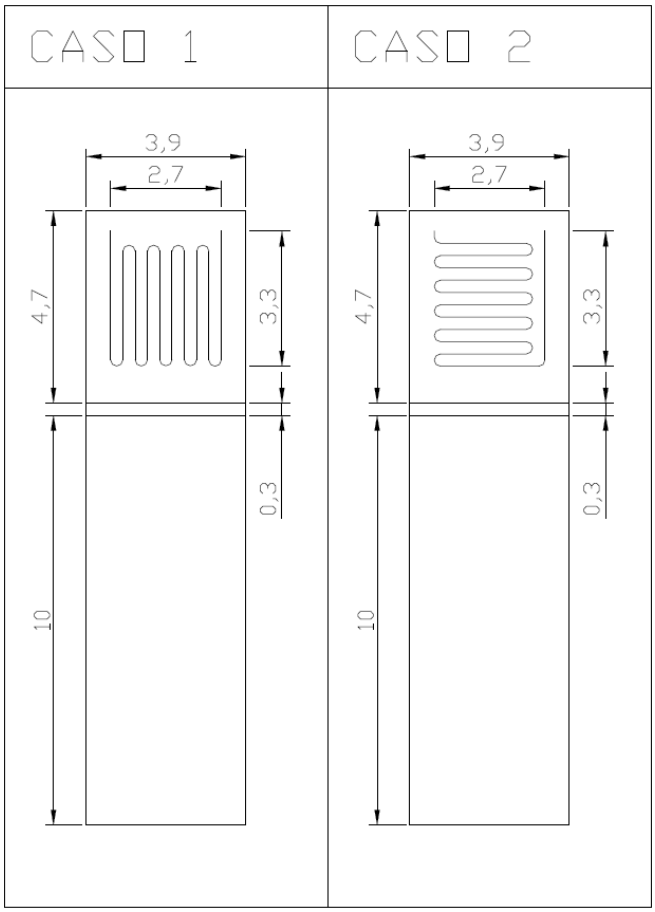


FIGURA 25 GEOMETRIA DEL MODELLO BENCHMARK

La sezione in Figura 25 rappresenta il punto di contatto tra il terreno di ripristino e la struttura in oggetto. 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 modulari, sui quali vengono montate le serpentine hanno una dimensione di 2,7 x 3.3 m. Questi vengono applicati lungo l'intero edificio in maniera modulare. Per l'analisi che verrà svolta si studierà il comportamento di un singolo pannello modulare di dimensione 2,7x3.3 m. La geometria esterna del modello 2D si presenta nella seguente maniera: i bordi della geometria 2D si trovano a una distanza di 60 cm dalle sonde geotermiche. Questa distanza di 60 cm permette di tenere in considerazione il fatto che sia a destra che a sinistra del pannello modulare studiato sono presenti altri moduli uguali a quello in esame. Il modello si sviluppa nelle tre dimensioni, pertanto nella terza dimensione i limiti

del modello saranno come quelli in Figura 26 e Figura 27. 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 la temperatura rimane costante lungo tutto l'anno.

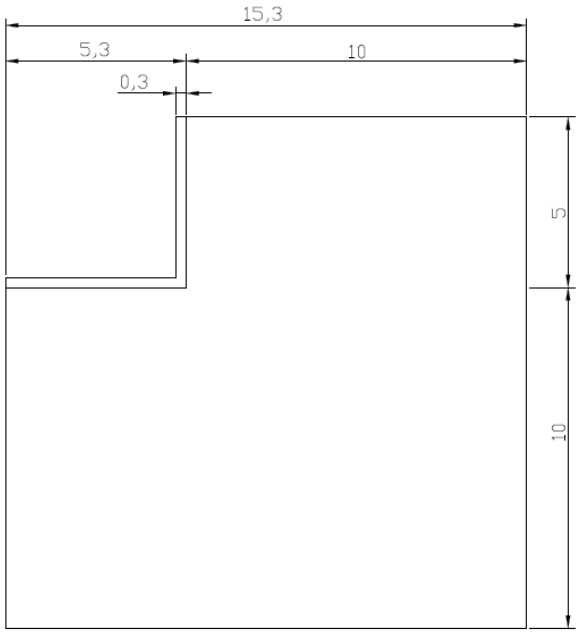


FIGURA 26 VISTA LATERALE DEL MODELLO

Definite le geometrie su AutoCAD, viene importato sul software FEFLOW, dove attraverso l'elemento "linea" sono state ricalcate le sonde geotermiche e con il comando "poligono" è stato definito il dominio. Le curvature delle serpentine sono state discretizzate attraverso delle polilinee. Definite le geometrie si procede alla generazione della "mesh" attraverso la quale il modello viene suddiviso in elementi finiti triangolari. Gli elementi triangolari a tre nodi risultano i più adeguati ad un'analisi di flussi. 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.

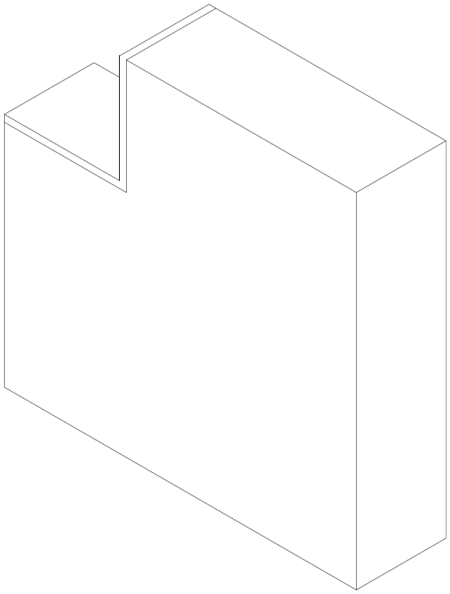


FIGURA 27 MODELLO 3D

La Figura 27 rappresenta il modello tridimensionale. Il modello tridimensionale si riferisce alla porzione di terreno che è stata utilizzata per la modellazione, allo spessore della struttura in calcestruzzo e all'aria che circola dentro un eventuale parcheggio o altre strutture simili come cavedi. Per lo sviluppo nella terza dimensione sono stati utilizzati i "layers" e gli "slices", elementi che in funzione della zona di interesse possono essere più o meno fitti.

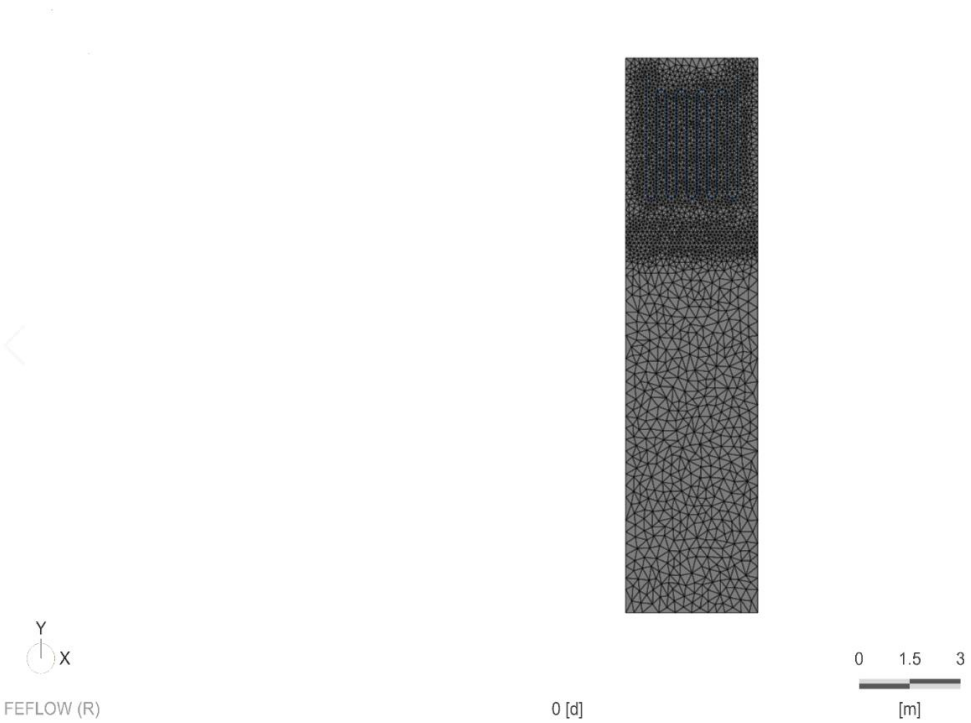


FIGURA 28 CASO 1 GENERAZIONE DELLA MESH

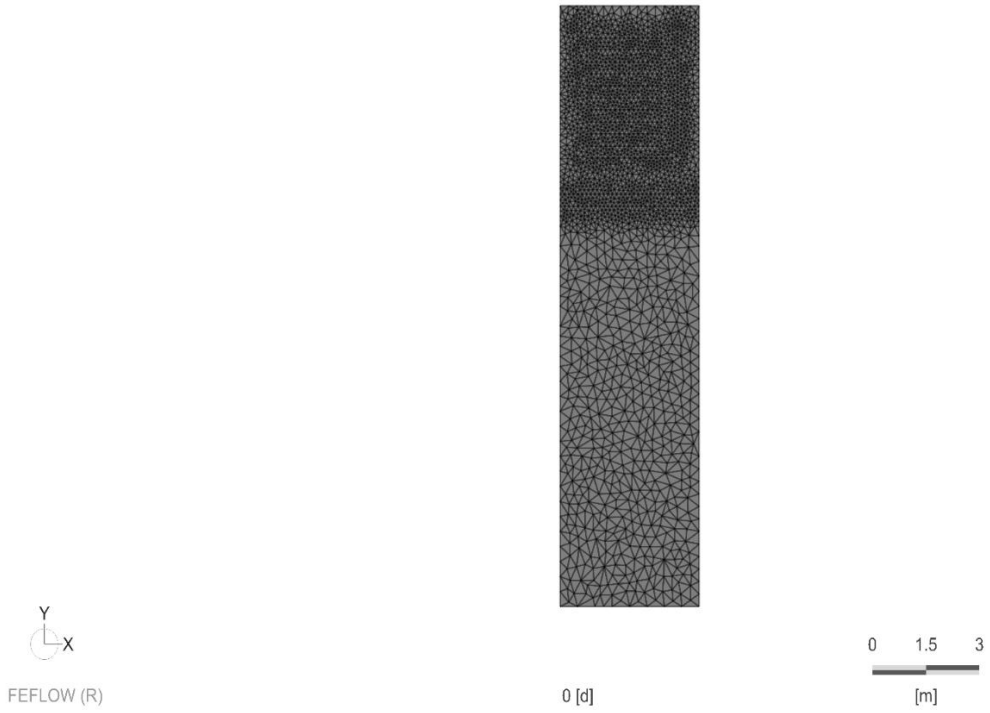


FIGURA 29 CASO 2 GENERAZIONE DELLA MESH

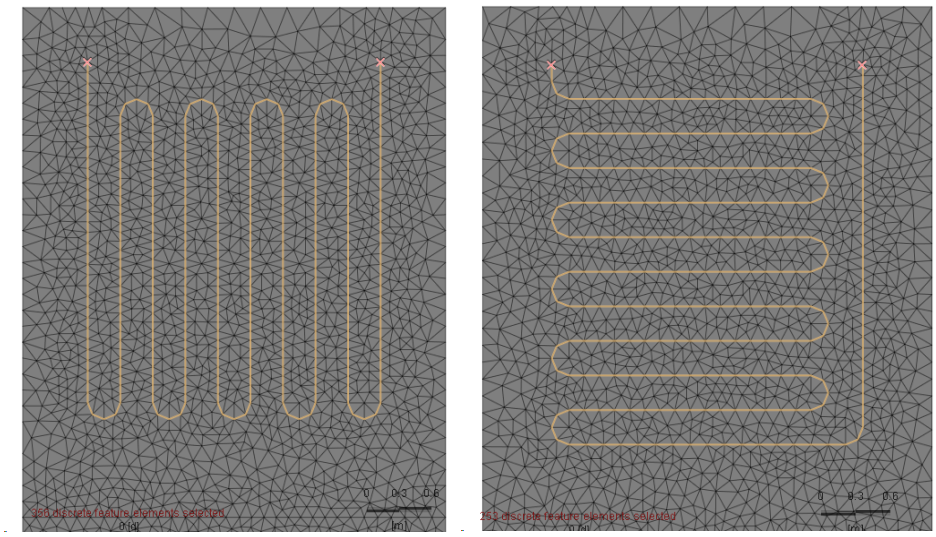


FIGURA 30 PARTICOLARE DELLA GENERAZIONE DELLA MESH CASO 1 E CASO 2

In Figura 28 e Figura 29 vengono riportati i due casi della Figura 25 con la “mesh” eseguita. Si osserva come la “mesh” è più fitta nelle zone di interesse ovvero nelle zone vicino alle serpentine. Partendo dalla “mesh” si prosegue con la generazione del modello 3D trattato nel paragrafo successivo. Viene riportato in Figura 30 il particolare della generazione della “mesh”. Sono rappresentati sia il caso 1 relativo alla disposizione a prevalenza verticale delle serpentine che il caso 2 relativo alla disposizione a prevalenza orizzontale.

4.2.2 Generazione del modello 3D

Nel paragrafo precedente è stata descritta la geometria del modello e la sua realizzazione nella bidimensionalità, quindi la configurazione delle serpentine e la generazione della "mesh". In questo paragrafo vengono affrontate le condizioni iniziali, di contorno e il dominio necessari per la realizzazione del modello 3D.

Le impostazioni relative al tempo di simulazione, alla direzione della gravità secondo l'asse y negativo e il trasporto del calore vengono impostate sotto il comando "Problem Settings" con un'interfaccia che appare rispettivamente nelle seguenti maniere (Figura 31 e Figura 32)

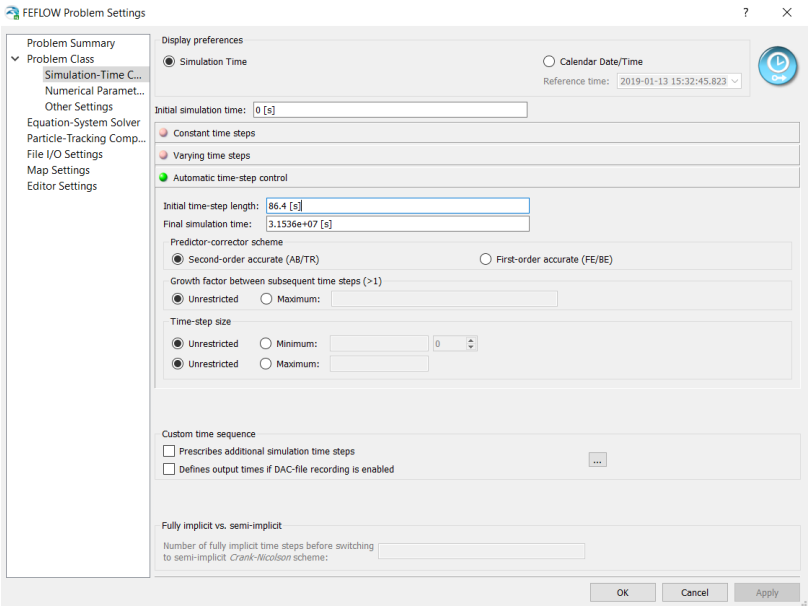


FIGURA 31 TEMPI E PASSI DI SIMULAZIONE

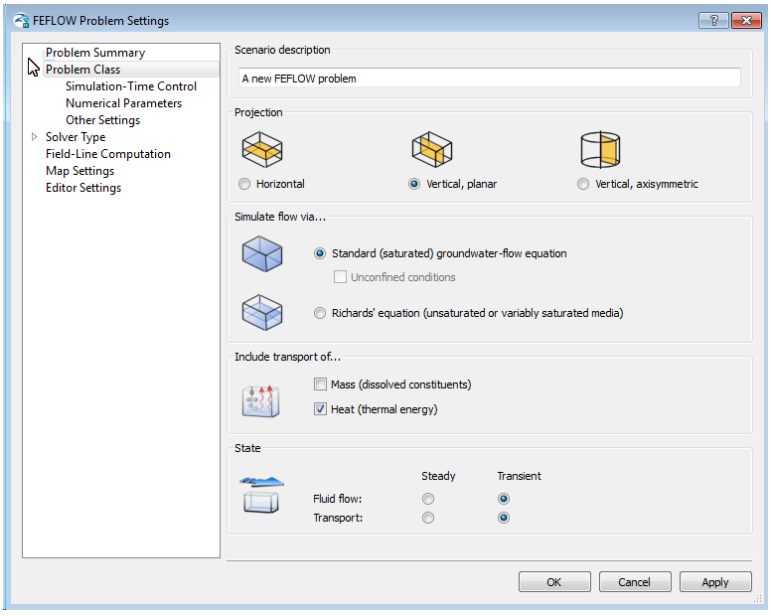


FIGURA 32 IMPOSTAZIONI DELLA DIREZIONE DI GRAVITÀ E TRASPORTO DI CALORE

Queste impostazioni vengono definite solo a “mesh” completa. La creazione della “mesh” avviene tramite il comando “Mesh Generator” e tra le varie opzioni è stata utilizza la “Triangle Mesh”. La “Triangle Mesh” è un tipo di meshatura molto veloce e permette di avere geometrie complesse di poligoni, linee e punti nella Supermesh. È possibile applicare preferenze e limiti relativi alla generazione degli elementi, è di nostro interesse una maggiore raffinatezza della “mesh” in alcuni punti particolari, come quelli vicino alle sonde geotermiche. Esistono anche altri algoritmi per la generazione delle “mesh” come “Advancing Front”, “Gridbulder” e “Transport Mapping”.

Generata la “mesh” più adatta, si passa alla creazione del modello 3D attraverso l’utilizzo dei “layers” e dei “slices”. Il modello 3D è stato creato come nella Figura 33.

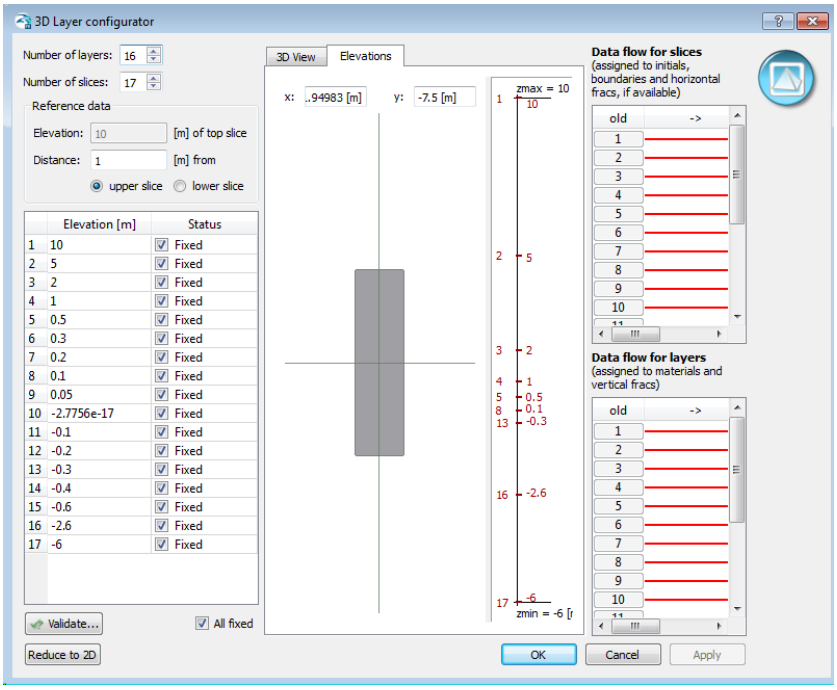


FIGURA 33 CREAZIONE DEL MODELLO 3D

Per ogni caso di studio che verrà analizzato il numero di “layers” è pari a 16, mentre quello degli “slices” è paria a 17. Si osserva in Figura 33 che i “layers” sono più fitti nella zona dove sono presenti le serpentine, queste si trovano sul “slice” 9. Il modello si presenterà come in Figura 34 e Figura 35.

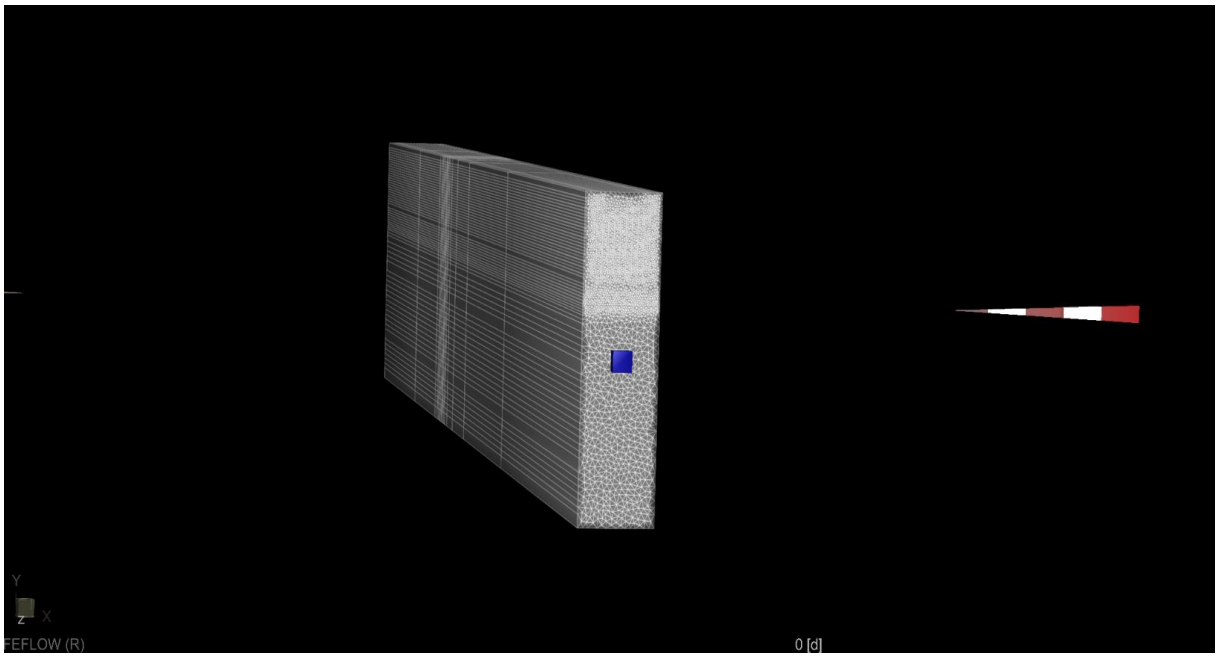


FIGURA 34 CASO 1 VISTA 3D

Come si può osservare nelle due configurazioni il modello nella terza dimensione è lo stesso, l'unico elemento che cambia tra i due modelli è quello presentato in Figura 25 dove si osservano le due disposizioni studiate.

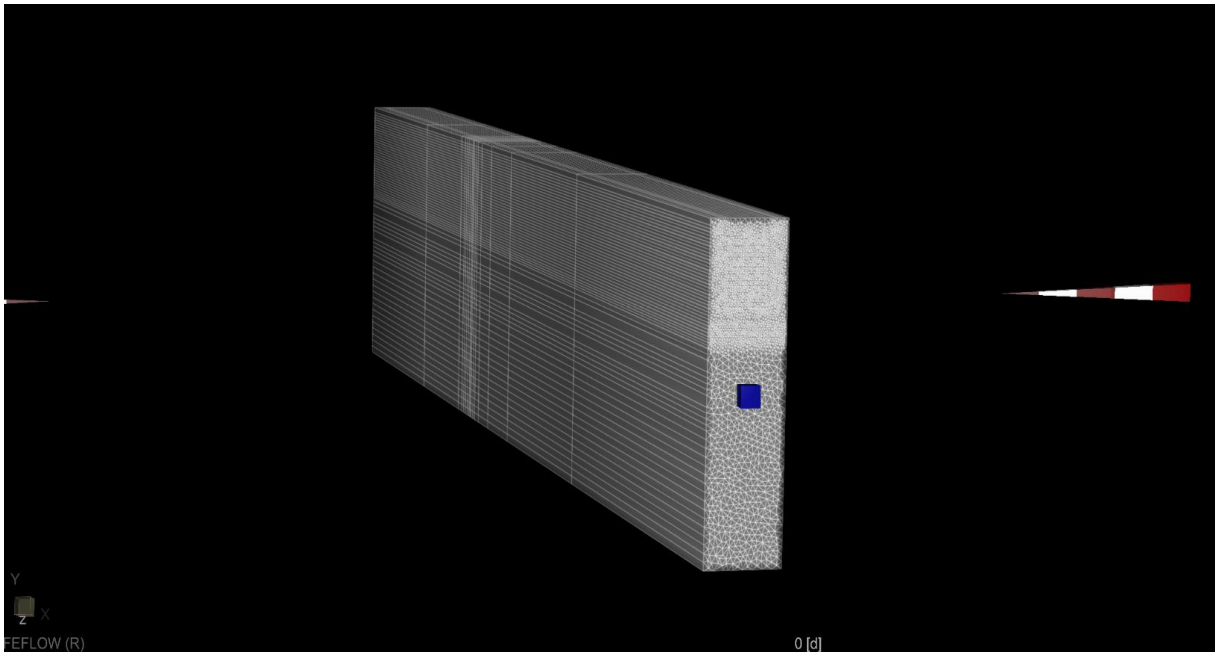


FIGURA 35 CASO 2 VISTA 3D

Avendo generato il modello 3D si procede con l'assegnazione delle proprietà dei materiali e successivamente con le condizioni iniziali e le condizioni al contorno elencate in precedenza.

Come già accennato le condizioni al contorno possono essere relative al flusso di un fluido ("Fluid flow") o al trasporto di calore ("Heat transport").

Di fondamentale importanza è la creazione delle sonde geometriche, le quali vengono interposte tra il terreno e il muro. Questi elementi, attraverso i quali passa il fluido termovettore, sono stati discretizzati con le "Discrete Features" e sono di dimensione inferiore rispetto alla dimensione del modello. Sono elementi 1D in modelli bidimensionali e si presentano come elementi 1D/2D nei modelli tridimensionali. Fisicamente rappresentano la presenza di una frattura o la presenza di una condotta all'interno del modello. Le "Discrete Features" sono definiti attraverso i parametri termici e idraulici, pertanto gli viene assegnata la sezione trasversale, la capacità termica e volumetrica del fluido, il raggio idraulico, la dispersività longitudinale e la conducibilità del fluido (Tabella 4)

In principio è stata eseguita una prima analisi con il software FEFOW dove le serpentine ("Discret Features") sono stati inseriti nel dominio del terreno. Questo significa che la zona intorno alle serpentine è stata modellata come terreno. Procedendo in questa maniera sono stati riscontrati problemi dal momento che il flusso del fluido termovettore non attraversava solo le serpentine ma si propagava anche nel terreno. Problema causato dal fatto che la porosità del terreno era troppo elevata. Per oltrepassare questa problematica sono stati creati due "layers" nei dintorni delle serpentine ai quali sono state fornite delle caratteristiche diverse. Avendo assegnato ai "layers artificio" porosità nulla, è stata utilizzata la seguente formulazione per cambiare la conducibilità.

$$nc_{wartificio}\rho_{wa} + (1-n)c_{sartificio}\rho_{sa} = nc_{wterreno}\rho_{wt} + (1-n)c_{sterreno}\rho_{st}$$

Ponendo in questa maniera la porosità dell'artificio uguale a zero si è osservato che la capacità termica del fluido ($\rho_w C_w$) moltiplicata per la porosità diventa nulla e pertanto del nuovo "layers" artificio rimane solo la capacità termica del solido ($\rho_s C_s$). In Figura 36 si riporta un particolare del confine terreno/artificio/muro.

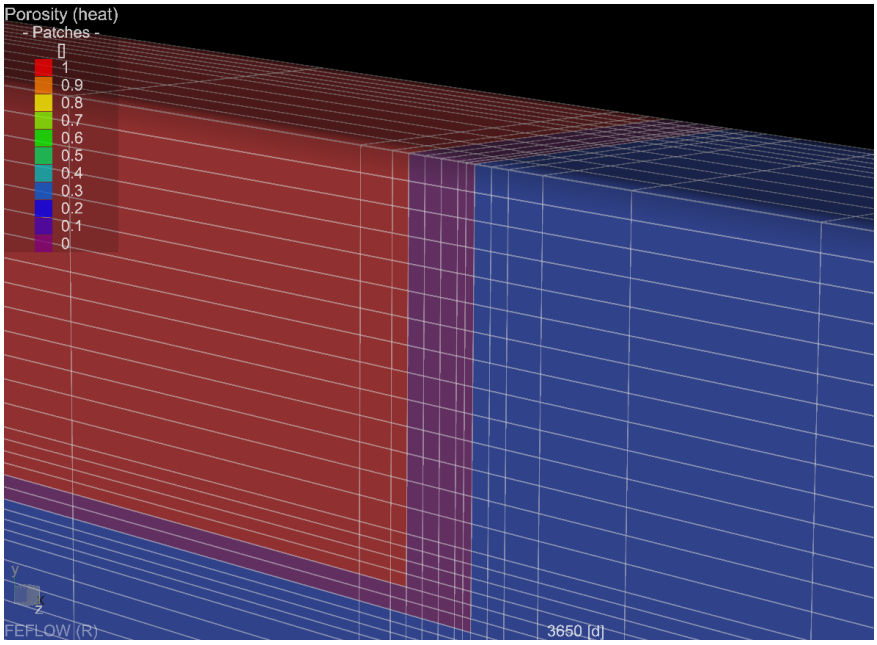


FIGURA 36 PARTICOLARE ARIA/MURO/TERRENO

4.3 Parametri dei materiali

In questo capitolo vengono descritti i parametri principali che sono stati utilizzati per la modellazione.

- "n" – porosità, definita come il rapporto tra il volume dei vuoti V_v e il volume totale V.

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

- "K" – conducibilità idraulica. Definisce la capacità del materiale di far passare attraverso di esso un fluido. Dimensionalmente parlando è rappresentato da una velocità ed è definita come:

$$K = k\frac{\rho g}{\mu}\left[\frac{m}{s}\right]$$

  Dove: ρ è la densità del fluido mentre μ è la viscosità del fluido. g è l'accelerazione della gravità e k la permeabilità del mezzo poroso.

- "S" – è il coefficiente di immagazzinamento. Rappresenta la quantità di acqua per unità di volume. L'unità di volume considerata è di natura satura e l'acqua in oggetto è quella che viene immagazzinata o espulsa a causa della comprimibilità dello stesso scheletro minerale.

- "C" – capacità termica. Questa quantità è il rapporto del calore scambiato tra l'ambiente e il corpo in oggetto e la variazione di temperatura. La formulazione matematica è la seguente:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}\left[\frac{J}{K}\right]$$

- "λ" – conducibilità termica. Espressa dal rapporto tra il flusso di calore e il gradiente di temperatura dovuto al passaggio del calore relativo alla conduzione termica. L'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore è misurata dalla conducibilità termica.
- "α" – dispersione termica. Quantifica, durante i processi di filtrazione, il trasporto di massa.

Per il modello del Benchmark sono stati utilizzati i seguenti parametri

Parametro	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica orizzontale ($k_x = k_z$)	$4.15*10^{-3}$	[m/s]
Conducibilità idraulica verticale (k_y)	$2.075*10^{-4}$	[m/s]
Capacità termica del fluido ($\rho_w C_w$)	4.2	[MJ/m^3/K]
Capacità termica del solido ($\rho_s C_s$)	2.0	[MJ/m^3/K]
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	[m^{-1}]
Porosità (n)	0.25	[-]
Dispersione termica longitudinale (α_L)	3.1	[m]
Dispersione termica trasversale (α_T)	0.3	[m]

TABELLA 1 PARAMETRI DEL TERRENO

I parametri idraulici, idro-dispersivi e termici dell'acquifero sono il risultato di prove di pompaggio, con monitoraggio della temperatura, eseguite per tre mesi consecutivi (Barla et al. 2013) come indicato in Tabella 1.

Parametro	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica isotropa ($k_x = k_z = k_y$)	10^{-2}	[m/s]
Capacità termica del fluido ($\rho_w C_w$)	10^{-3}	[MJ/m^3/K]
Coducibilità termica del fluido (λ_w)	0.53	[W/m/K]
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	[m^{-1}]
Porosità (n)	1	[-]
Dispersione termica longitudinale (α_L)	5	[m]
Dispersione termica trasversale (α_T)	0.5	[m]

TABELLA 2 PARAMETRI DELL'ARIA

In Tabella 2 sono riportati i parametri relativi all'aria. Si fa riferimento all'aria nella porzione dove viene realizzato il parcheggio o la struttura sotterranea.

Parametro	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica isotropa ($k_x = k_z = k_y$)	10^{-16}	[m/s]
Capacità termica del solido ($\rho_s C_s$)	1.05	[MJ/m^3/K]
Coducibilità termica del solido (λ_s)	1.12	[W/m/K]
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	[m^{-1}]
Porosità (n)	0	[-]

TABELLA 3 PARAMETRI DEL CALCESTRUZZO

La Tabella 3 è quella relativa ai parametri del calcestruzzo. Queste proprietà verranno utilizzate per assegnare le caratteristiche a quella porzione che si interpone tra il terreno e il parcheggio.

Parametro	Valore	U.M.
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	[m^{-1}]
Capacità termica del fluido ($\rho_w C_w$)	4.2	[$MJ/m^3/K$]
Coducibilità termica del fluido (λ_w)	0.65	[W/m/K]
Area trasversale	3,14	[cm^2]
Raggio idraulico	0.5	[cm]

TABELLA 4 PARAMETRI DELLE TUBAZIONI

I parametri da assegnare alle tubazioni vengono riportati in Tabella 4.

Viene posta particolare attenzione sulla conducibilità termica del fluido (λ_w) e del solido (λ_s). Questi sono due parametri che subiranno delle variazioni nel corso delle analisi che saranno effettuate nei paragrafi successivi. La suddivisone iniziale viene effettuata sul caso saturo e non saturo (Tabella 5 e Tabella 6) e quindi si lavora sulla conducibilità termica del fluido (λ_w) e una volta divisi i due casi si modula la conducibilità termica del solido (λ_s). Per il caso saturo avremmo 18 combinazioni tra il caso 1 e il caso 2 e successivamente ci saranno altre 18 combinazioni per il caso non saturo. Terminate le due analisi appena descritte saranno effettuate altre 18 combinazioni per il caso di falda in movimento. In totale per il modello benchmark verranno eseguite 54 analisi. Oltre a queste variazioni verrà effettuata un'analisi parametrica sulla variazione della temperatura esterna dell'aria come sarà descritto nel paragrafo successivo.

Parametro	Ipotesi 1	Ipotesi 2	Ipotesi 3	U.M.
Conducibilità termica del fluido (λ_w)	0.65	0.65	0.65	[W/m/K]
Conducibilità termica del solido (λ_s)	0.9	2.26	3.9	[W/m/K]

TABELLA 5 CONDUCIBILITÀ TERMICA TERRENO (MODELLO BENCHMARK) CONFIGURAZIONE 1 SATURO

Parametro	Ipotesi 1	Ipotesi 2	Ipotesi 3	U.M.
Conducibilità termica del fluido (λ_w)	0	0	0	[W/m/K]
Conducibilità termica del solido (λ_s)	0.9	2.26	3.9	[W/m/K]

TABELLA 6 CONDUCIBILITÀ TERMICA TERRENO (MODELLO BENCHMARK) CONFIGURAZIONE 2 NON SATURO

4.4 Condizioni al contorno e condizioni iniziali

La temperatura media annuale di Torino, a una profondità di 15 m dal piano campagna, è di 14°C, pertanto è stata assegnata una temperatura ai punti inferiori del dominio, quelli corrispondenti al limite inferiore del terreno, pari a 14°C per tutte le simulazioni. Contrariamente però il limite superiore del modello, essendo a contatto con l'atmosfera, presenta delle variazioni sia giornaliere che mensili. Ai punti relativi al bordo superiore, è stata applicata una temperatura ciclica attraverso una "time series" la quale rappresenta l'andamento delle temperature annuali. Sono stati simulati 10 anni senza l'attivazione delle serpentine e si è osservato l'andamento delle temperature nel terreno. Questa simulazione ha permesso di osservare come e a che profondità il terreno viene influenzato dalle temperature cicliche esterne.

Le condizioni relative alla falda saranno di tre tipi:

- Completamente saturo;
- Completamente insaturo;
- Presenza di flusso di falda.

Nel secondo caso di falda in movimento, verrà imposto un gradiente idraulico per il quale la velocità di falda sarà di circa 2,4 m/g. La legge di Darcy è quella che regola il flusso all'interno del mezzo poroso ed è espressa nella seguente maniera:

$$V = ki$$

Dove:

- V → è la velocità apparente di filtrazione della falda e viene inserita nel modello come un dato di input;
- k → è la permeabilità del terreno;
- i → è il gradiente idraulico, definito come $\frac{\Delta h}{L}$.

Condizioni al contorno di fondamentale importanza sono quelle inserite nei punti di ingresso e di uscita del fluido. È stata utilizzata la condizione "Fluid-flux BC" sul software FEFLOW per impostare la velocità del fluido all'interno delle sonde geotermiche. In ingresso la velocità assegnata è pari a -0.4 $^{m}/_{s}$ e in uscita 0.4 $^{m}/_{s}$. Il segno negativo indica il fluido in entrata mentre quello positivo il fluido in uscita al dominio.

Un'altra condizione che viene imposta al sistema è quella relativa alla temperatura sul fluido d'ingresso nelle serpentine. Questa condizione viene imposta attraverso il comando "Temperature BC" e viene assegnata sul singolo nodo. Questa temperatura, diversamente dal flusso del fluido che rimane sempre lo stesso, cambia in funzione della stagione in cui stiamo operando. Nelle stagioni invernali sarà uguale a 2°C mentre in quelle estive pari a 30°C.

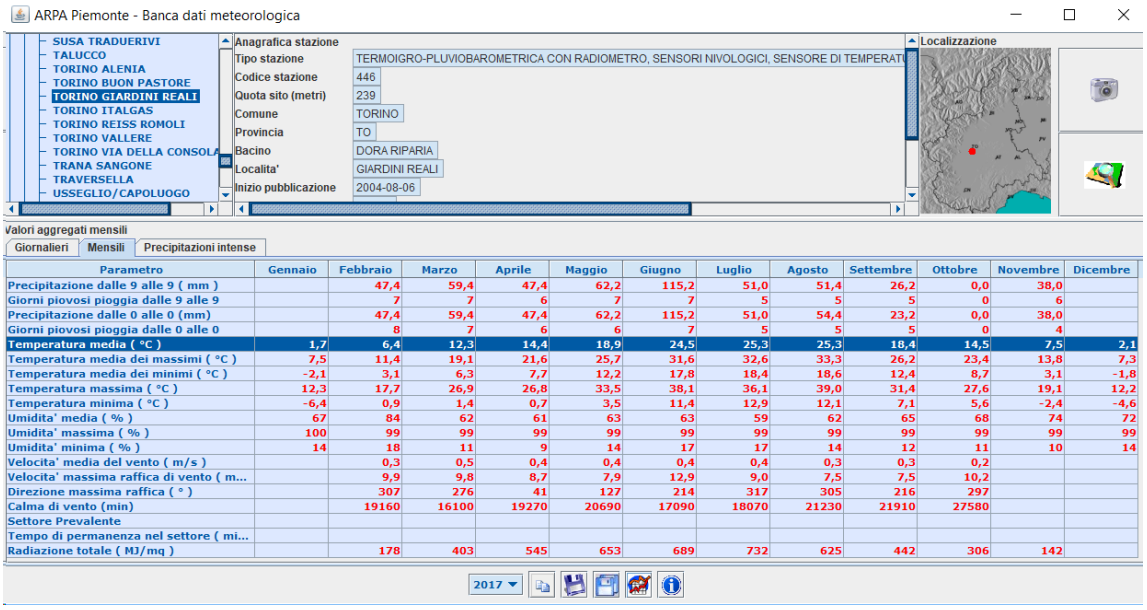
Per poter generare un flusso idrico nel terreno esistono più modalità. Considerando i nodi facenti parte dei bordi laterali del modello, si può imporre un'altezza idraulica generando così un flusso idrico nel terreno, o in alternativa si assegna un determinato flusso di fluido. Nel primo

caso si parla di “Hydraulic-head BC” mentre nel secondo di “Fluid-flux BC”. Verrà utilizzata un’assegnazione del primo tipo per la simulazione della falda in movimento. Le condizioni al contorno relative alla temperatura vengono assegnate tramite il comando “Temperature BC” e qui i casi di assegnazione sono due: o si assegna una temperatura fissa oppure si procede tramite l’assegnazione di una serie temporale di temperature. È stata utilizzata una “time series” sul dominio superiore e una temperatura costante sul dominio inferiore.

4.4.1 Simulazione temperatura del terreno prima dell’attivazione delle serpentine

Come accennato nei capitoli precedenti, a seguito delle analisi eseguite sulle temperature del terreno a Torino, a una profondità di 15 m la temperatura del terreno può essere assunta costante e pari a 14°C (Barla et al., 2015). Dall’altro lato però, sulla superfice superiore, persiste il problema legato alla variazione stagionale della temperatura. Per ovviare a questo fattore variabile, verranno simulati 10 anni di inattività delle serpentine con l’obiettivo di studiare come si attesta l’andamento della temperatura nel terreno. Si procede con la definizione della “time series” annuale che agisce sulla superficie superiore, a contatto con l’aria.

La zona di riferimento è quella di Torino, pertanto accedendo sul sito dell’Arpa sono stati selezionati i valori delle temperature annuali di Torino. L’anno di riferimento è il 2017, dal momento che i dati del 2018 non sono completi. Il riferimento è la temperatura media mensile espressa in gradi centigradi. Il minimo si verifica nel mese di gennaio dove la media del minimo è di 1.7°C, mentre il massimo è raggiunto nei mesi estivi di luglio e agosto con valori medi di 25.3°C. Nei mesi invernali sarà massima l’efficienza del riscaldamento mentre nei mesi estivi il raffreddamento. La pompa di calore per ipotesi non verrà utilizzata nei periodi primaverili e autunnali poiché in quei periodi dentro l’edificio si suppone una temperatura “vivibile”. L’andamento della temperatura annuale a Torino è rappresentato in Figura 37 e Figura 38.



Parametro	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Precipitazione dalle 9 alle 9 (mm)		47,4	59,4	47,4	62,2	115,2	51,0	51,4	26,2	0,0	38,0	
Giorni piovosi pioggia dalle 9 alle 9		7	7	6	7	7	5	5	5	0	6	
Precipitazione dalle 0 alle 0 (mm)		47,4	59,4	47,4	62,2	115,2	51,0	54,4	23,2	0,0	38,0	
Giorni piovosi pioggia dalle 0 alle 0		8	7	6	6	7	5	5	5	0	4	
Temperatura media (°C)	1,7	6,4	12,3	14,4	18,9	24,5	25,3	25,3	18,4	14,5	7,5	2,1
Temperatura media dei massimi (°C)	7,5	11,4	19,1	21,6	25,7	31,6	32,6	33,3	26,2	23,4	13,8	7,3
Temperatura media dei minimi (°C)	-2,1	3,1	6,3	7,7	12,2	17,8	18,4	18,6	12,4	8,7	3,1	-1,8
Temperatura massima (°C)	12,3	17,7	26,9	26,8	33,5	38,1	36,1	39,0	31,4	27,6	19,1	12,2
Temperatura minima (°C)	-6,4	0,9	1,4	0,7	3,5	11,4	12,9	12,1	7,1	5,6	-2,4	-4,6
Umidita' media (%)	67	84	62	61	63	63	59	62	65	68	74	72
Umidita' massima (%)	100	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
Umidita' minima (%)	14	18	11	9	14	17	17	14	12	11	10	14
Velocita' media del vento (m/s)		0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2		
Velocita' massima raffica di vento (m...		9,9	9,8	8,7	7,9	12,9	9,0	7,5	7,5	10,2		
Direzione massima raffica (°)		307	276	41	127	214	317	305	216	297		
Calma di vento (min)		19160	16100	19270	20690	17090	18070	21230	21910	27580		
Settore Prevalente												
Tempo di permanenza nel settore (mi...												
Radiazione totale (MJ/mq)		178	403	545	653	689	732	625	442	306	142	

FIGURA 37 BANCA DATI METEOROLOGICA TEMPERATURE MENSILI

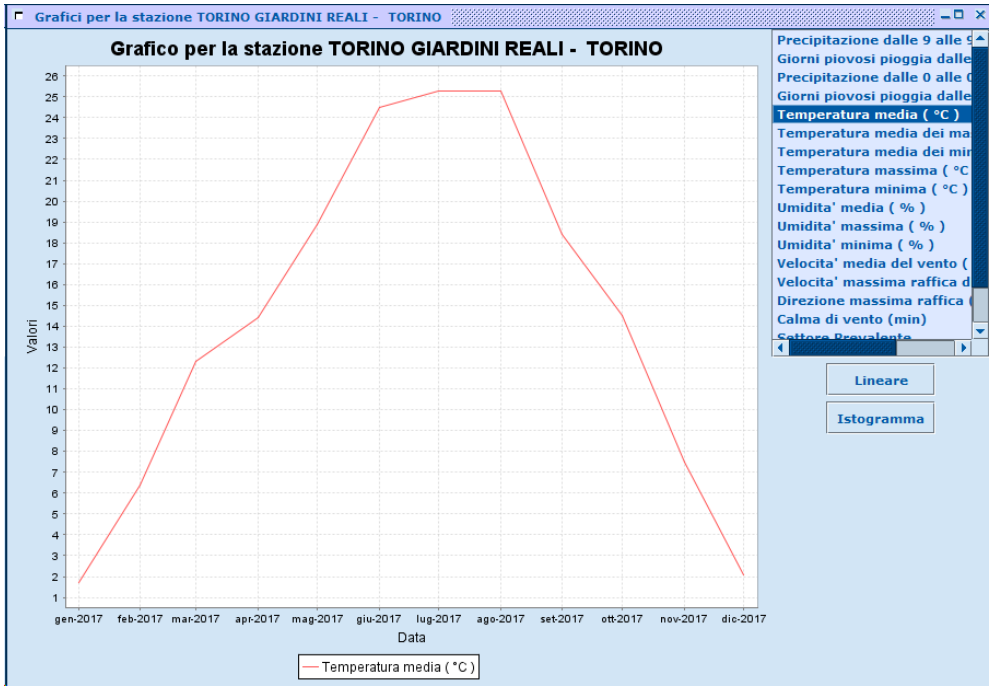


FIGURA 38 GRAFICO ANNUALE PER LA STAZIONE TORINO GIARDINI REALI

È stata creata la "time series" sul programma FEFLOW. Questa verrà applicata sui nodi superiori del modello e simulerà la temperatura dell'aria. La "time series" è una funzione ciclica con un'interpolazione curvilinea di tipo Akima1.

Volendo simulare il benchmark anche in condizioni diverse rispetto alla città di Torino, per semplicità sono stati studiati altri due casi relativi a un posto più caldo e uno più freddo. La simulazione di questi posti è stata eseguita traslando la "time series" di $\pm 2°C$ e contemporaneamente la temperatura inferiore del modello a 15 m di $\pm 2°C$ rispetto ai 14°C di Torino.

Come specificato in precedenza, nelle analisi di studio, sono stati assunti diversi parametri variabili, al fine di osservare il miglior e/o peggior comportamento del sistema, cercando così di capire quali sono le condizioni migliori durante le quali si ha la massima efficienza del sistema.

Imposta la temperatura variabile sul bordo superiore del modello e quella costante sul bordo inferiore, l'obiettivo è quello di studiare l'andamento della temperatura nei punti interni del dominio e come questa si disperde in funzione delle varie caratteristiche del modello.

Di seguito vengono riportati i diversi risultati ottenuti. La prima situazione che viene trattata è quella del modello che presenta una temperatura sul bordo inferiore pari a 14°C. Per quanto riguarda la conducibilità solida del terreno i grafici si riferiscono ai valori in crescendo, quindi si parte con una conducibilità pari a 0,9W/mK e si procede con 2.26W/mK per arrivare a 3,9W/mK. In allegato vengono riportate le inizializzazioni dei modelli per le temperature relative a 12°C e 16°C.

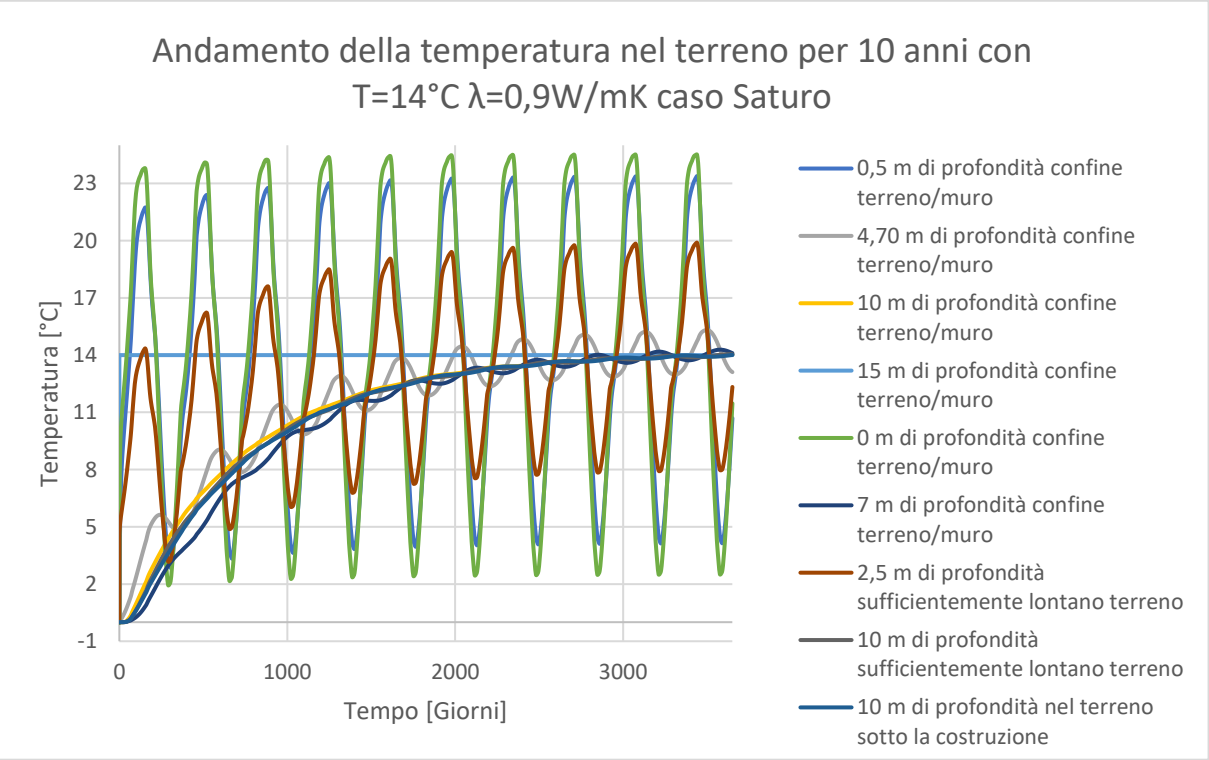


FIGURA 39 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E Λ=0,9 SATURO

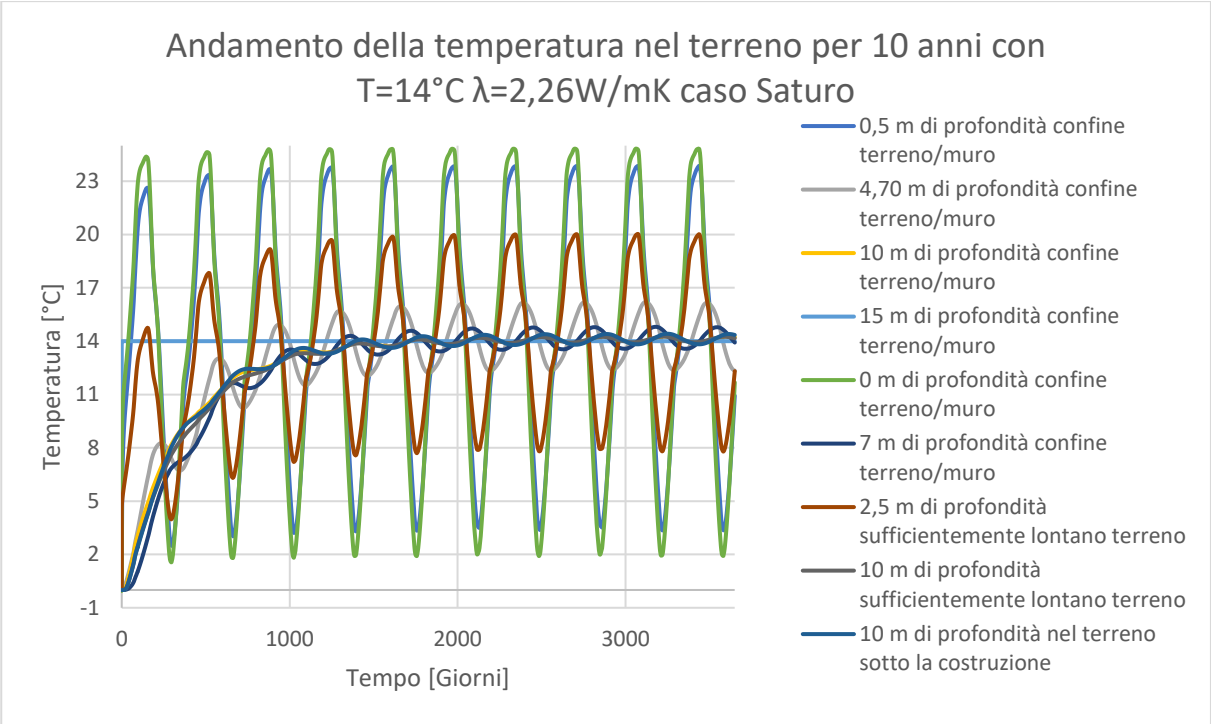


FIGURA 40 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E Λ=2,26 SATURO

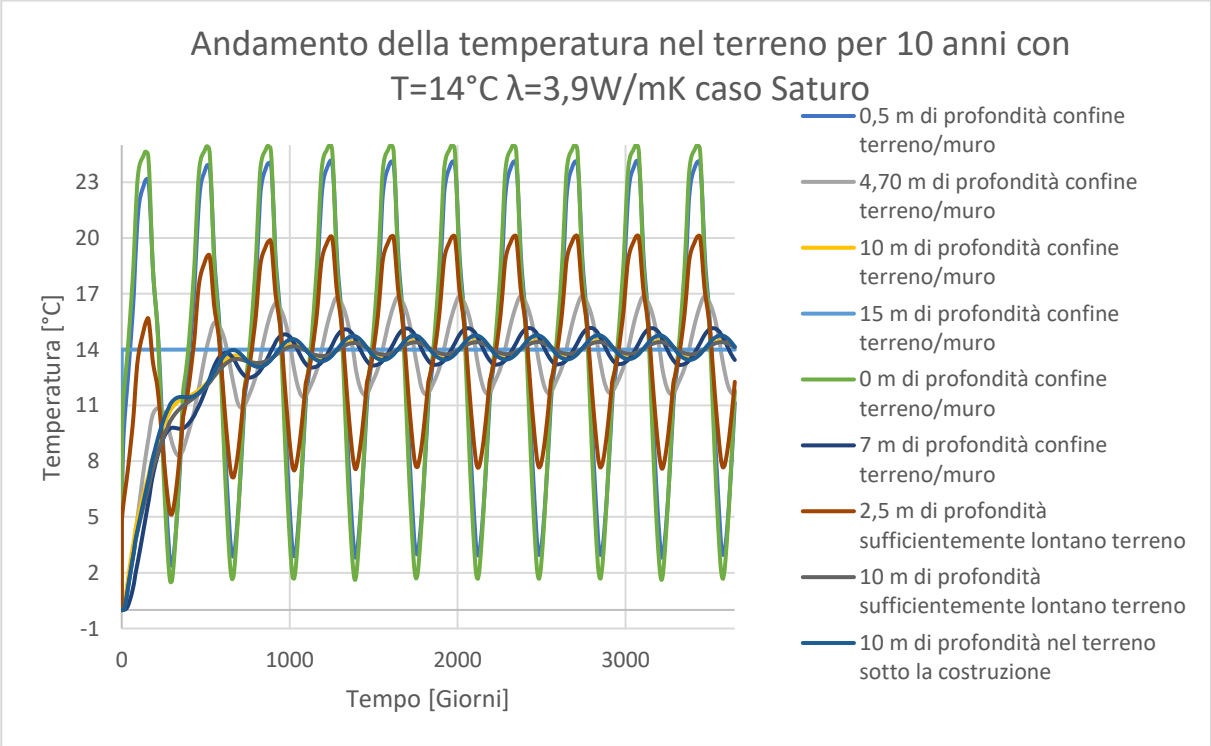


FIGURA 41 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E Λ=3,9 SATURO

Si osserva da questi tre grafici come in funzione della conducibilità solida del terreno, nel caso di terreno saturo, la temperatura dei punti interni del dominio, i punti ai quali non è stata preassegnata nessuna temperatura, fatichi più o meno a raggiungere un valore ciclico negli anni. Dal momento che il terreno viene influenzato maggiormente dalla conducibilità solida del terreno, i casi con T=12°C e T=16°C avranno un andamento analogo al caso in esame,

cambiando solo il valore attorno a cui si attestano le temperature (vedi da Figura X. 1 a Figura X. 6)

In Figura 39 si osserva come con una conducibilità bassa, pari a λ_s=0,9 W/mK, i punti che si trovano a una profondità dai 4,5 ai 10 m raggiungono una temperatura stabilmente ciclica dopo il 3000-esimo giorno ovvero dopo all'incirca 8 anni. Osservando poi la Figura 40, dove la conducibilità solida del terreno è paria a λ_s=2,26 W/mK si nota che in questo caso la temperatura stabilmente ciclica nel terreno viene raggiunta dopo circa 1500 giorni che corrispondono a circa 4 anni. La Figura 41 è quella relativa a una conducibilità solida del terreno pari a λ_s=3,9 W/mK. In questo caso la temperatura stabilmente ciclica all'interno del dominio viene raggiunta già dopo 800 giorni ovvero circa 2 anni.

Si conclude che all'aumentare della conducibilità solida del terreno, diminuisce il tempo necessario per raggiungere una temperatura ciclicamente stabile all'interno del dominio di interesse. Questo implica che la conducibilità solida del terreno influisce in maniera notevole sull'andamento della temperatura. Si vedrà nel paragrafo successivo che in presenza di una conducibilità solida del terreno elevata, lo scambio di calore sarà maggiore, permettendo così un'efficienza maggiore del sistema serpentine/terreno.

Lo stesso procedimento è stato eseguito anche per un terreno non saturo, imponendo λ_w=0 W/mK e i risultati ottenuti sono i seguenti.

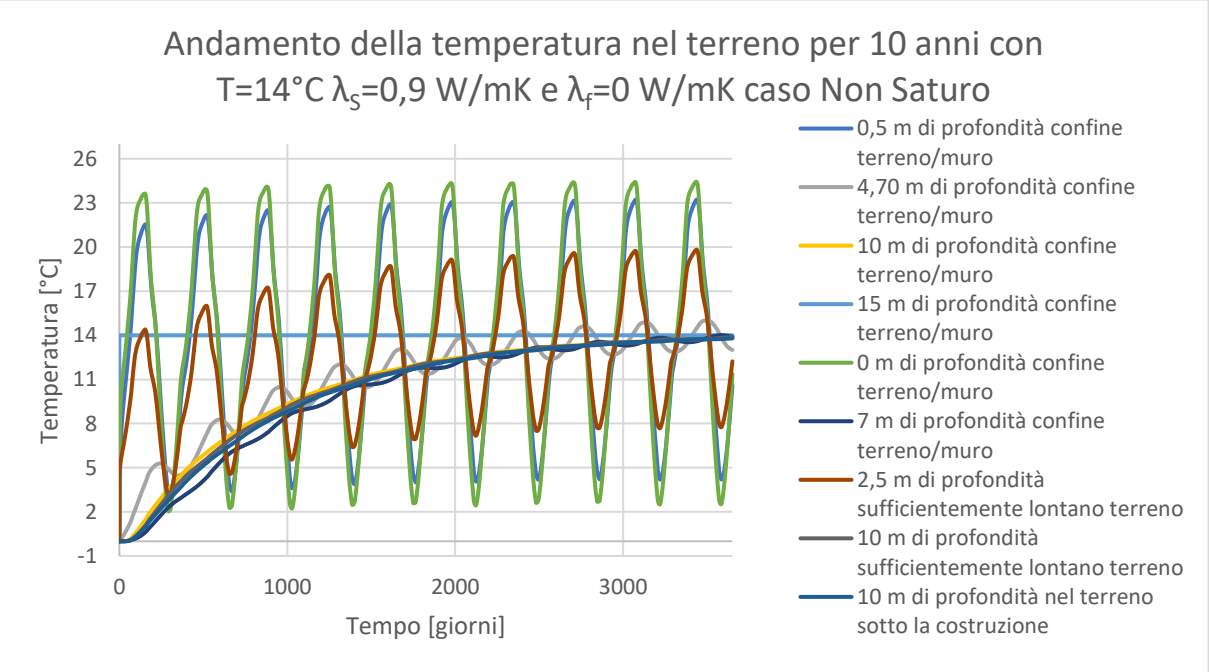


FIGURA 42 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E Λ_S=0,9 W/MK E Λ_F=0 W/MK NON SATURO

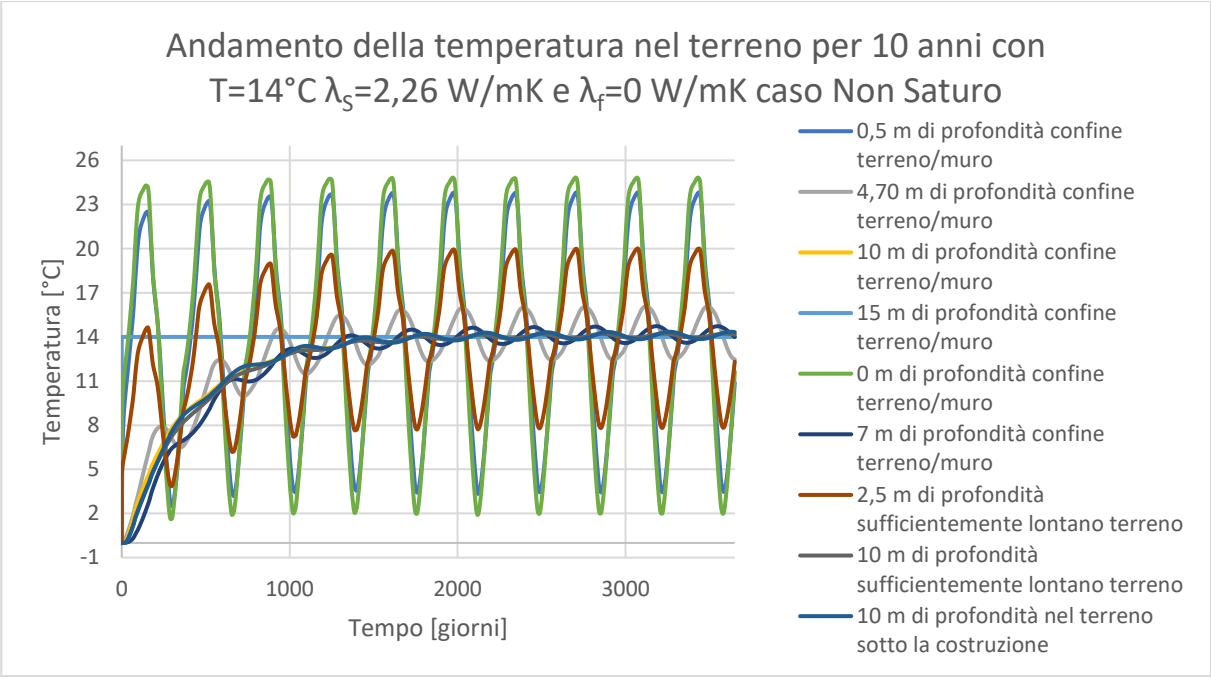


FIGURA 43 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E λ_S=2,26 W/MK E λ_F=0 W/MK NON SATURO

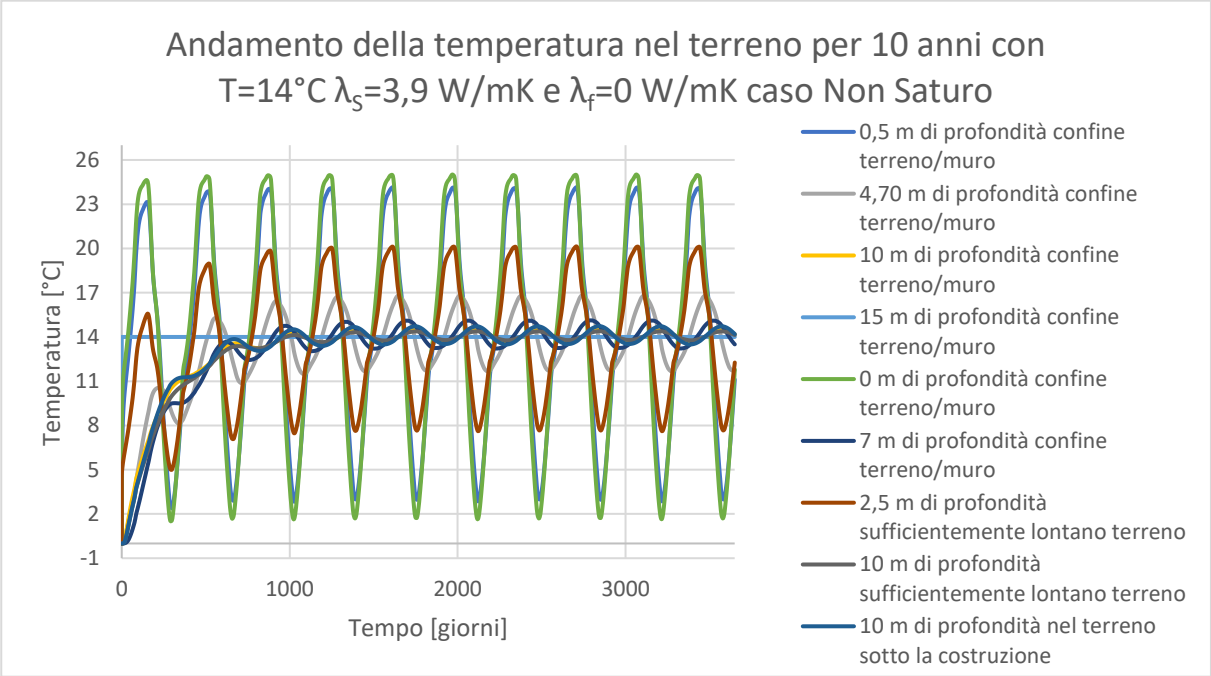


FIGURA 44 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E λ_S=3,9 W/MK E λ_F=0 W/MK NON SATURO

Osservando attentamente, si nota che nel caso di terreno non saturo, il tempo necessario per raggiungere una temperatura ciclicamente stabile, nei punti interni del modello considerato, aumenta leggermente di qualche giorno rispetto al caso precedentemente analizzato. Questo fenomeno viene giustificato dalla presenza di aria nei vuoti tra i granuli del terreno. La conducibilità termica diminuisce quando i vuoti sono occupati da aria anziché dall'acqua a causa della loro conducibilità.

L'ultimo caso è quello relativo a un caso ipotetico di presenza di flusso di falda. I risultati in questo caso mostrano che il tempo necessario per raggiungere una temperatura ciclicamente stabile all'interno del modello è nettamente più breve rispetto ai casi precedenti.

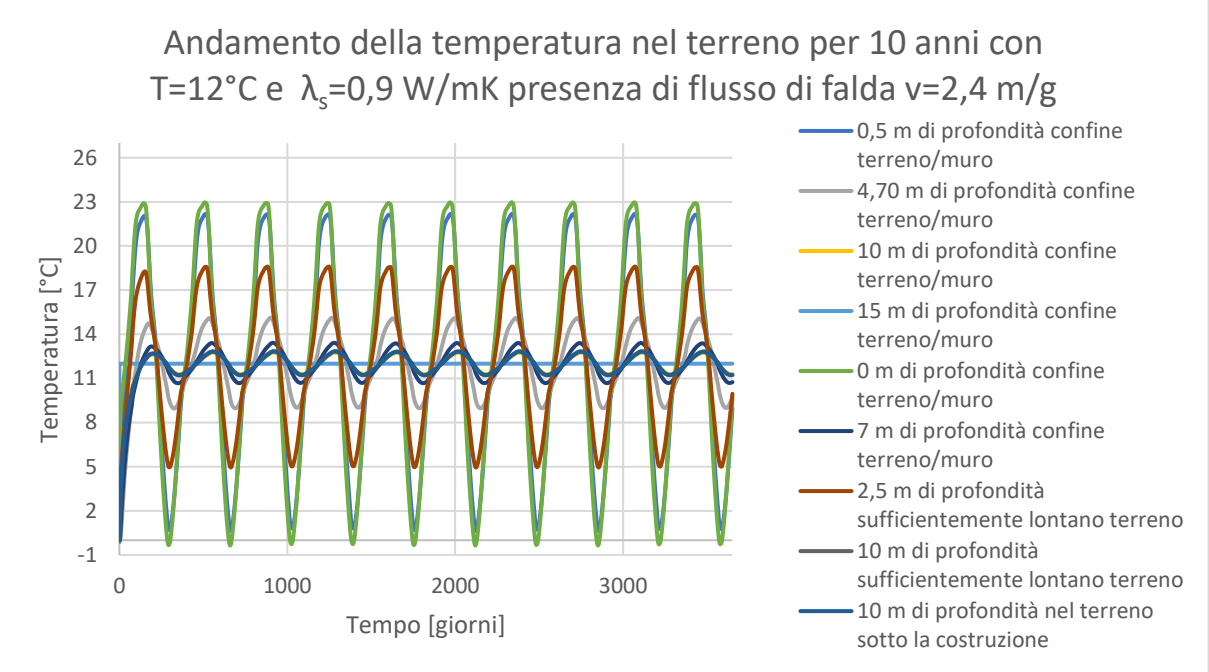


FIGURA 45 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E λ_S=0,9 W/MK E V=2,4M/G

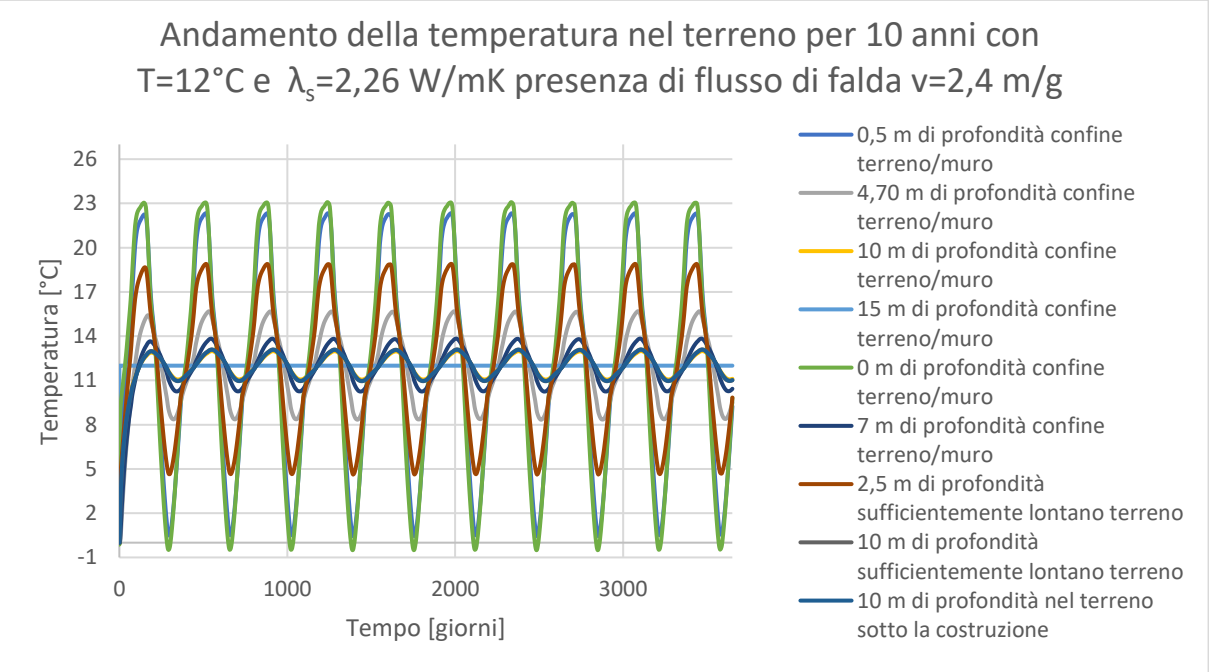


FIGURA 46 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E λ_S=2,26 W/MK E V=2,4M/G

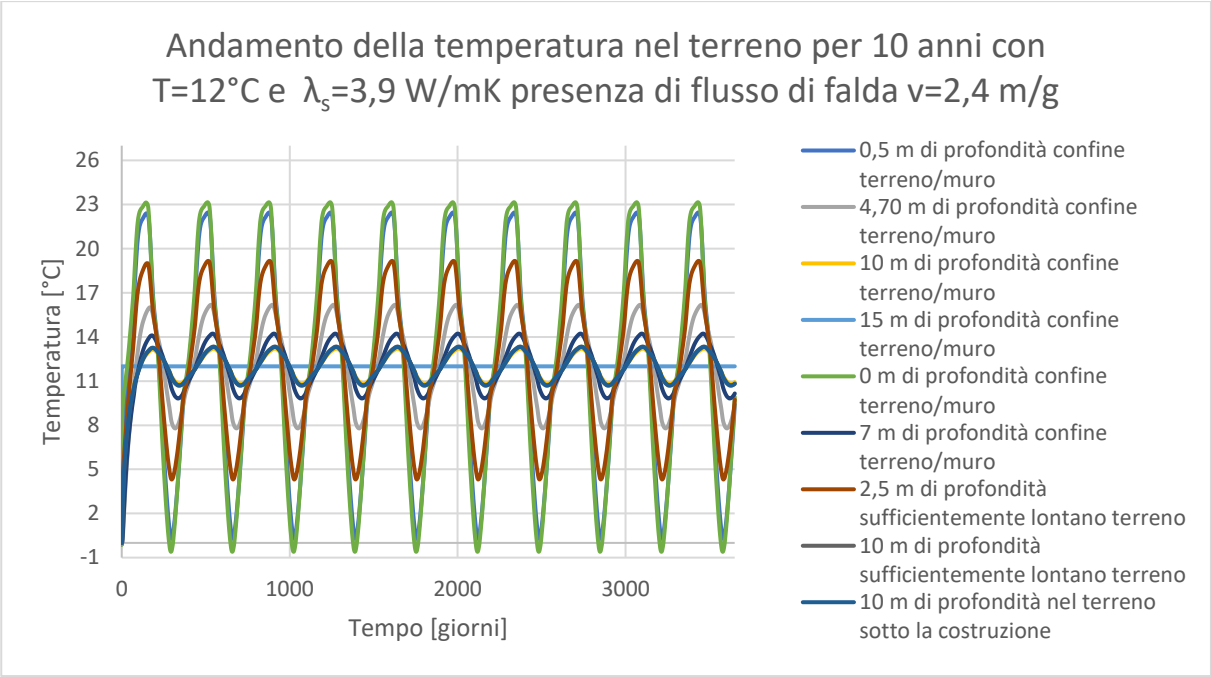


FIGURA 47 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E λ_S=3,9W/MK E V=2,4M/G

Si nota che nel caso di falda in movimento la conducibilità solida del terreno ha un ruolo meno rilevante rispetto al caso saturo/non saturo. Anche in questo caso, all'aumentare del parametro λ_s diminuisce il tempo necessario per raggiungere la temperatura ciclicamente stabile all'interno del dominio di interesse, ma con differenze tra una conducibilità e l'altra nettamente inferiori.

Al completamento dei 10 anni sono state attivate le serpentine e quindi entra in funzione la struttura geoenergetica. Questi risultati sono validi sia per il caso 1 che per il caso 2 poiché le condizioni al contorno e le condizioni iniziali non cambiano da un caso all'altro ma viene modificata solo la geometria.

4.5 Attivazione delle sonde geotermiche

La simulazione del sistema è stata effettuata separatamente nel caso estivo e nel caso invernale. La durata complessiva per il funzionamento è stata assunta pari a 90 giorni sia nel caso estivo che in quello invernale, permettendo così un approccio reale corrispondente ai giorni complessivi invernali e estivi. Come descritto in precedenza, assegnata una temperatura in ingresso pari a T=30°C e T=2°C rispettivamente nel caso estivo e invernale è stata imposta una velocità del flusso nei tubi pari a -0,4 m/s in entrata e +0,4 m/s in uscita. Al termine di queste due operazioni è stato possibile osservare la differenza tra la temperatura di ingresso e quella di uscita.

Sono state effettuate analisi di vario tipo, facendo variare la temperatura esterna, la conducibilità solida del terreno e quella fluida. I casi presi in esame, come descritto in

precedenza sono due per quanto riguarda il modello del Benchmark. Il primo caso è quello relativo alla disposizione a prevalenza verticale delle serpentine, mentre nel secondo caso le serpentine sono disposte a prevalenza orizzontale.

4.5.1 Condizione Satura

4.5.1.1 CASO 1 – DISPOSIZIONE A PREVALENZA VERTICALE

Il caso 1 è quello corrispondente alla disposizione a prevalenza verticale (vedi Figura 25, caso 1) e le varie simulazioni hanno fornito i seguenti risultati. Le figure sottostanti rappresentano la temperatura in output e in input. La temperatura in ingresso è un valore costante, mentre le temperature in uscita subiscono una variazione di temperatura in funzione del tempo di funzionamento dell'impianto.

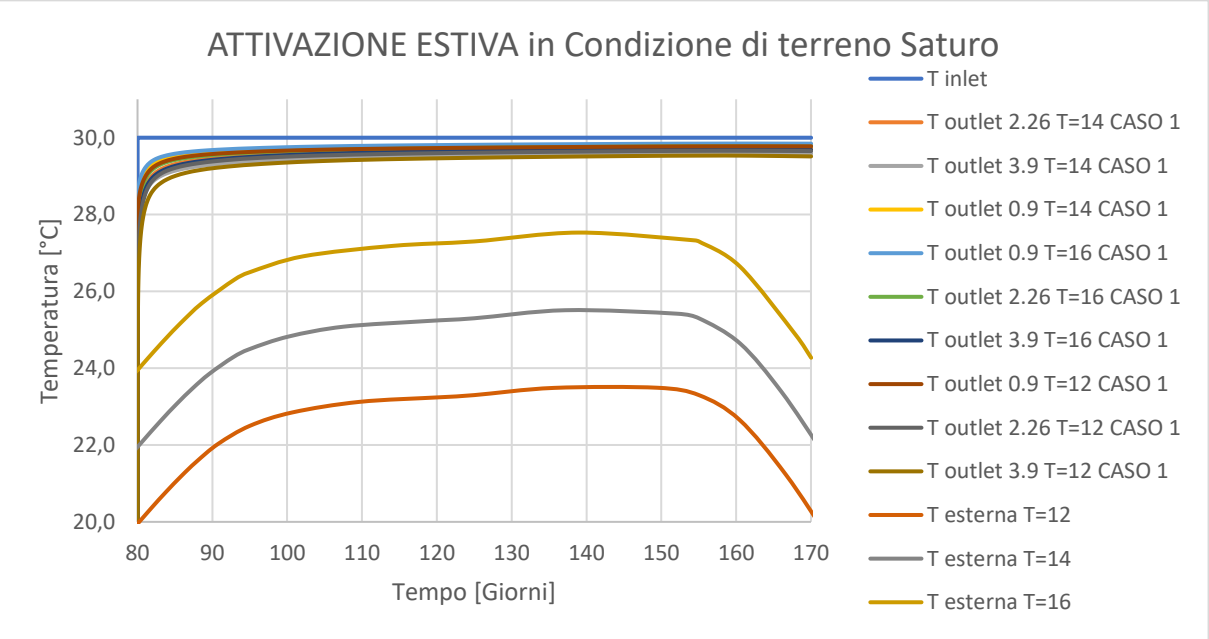


FIGURA 48 ATTIVAZIONE ESTIVA IN CONDIZIONE DI TERRENO SATURO CASO 1 CON TEMPERATURA ESTERNA

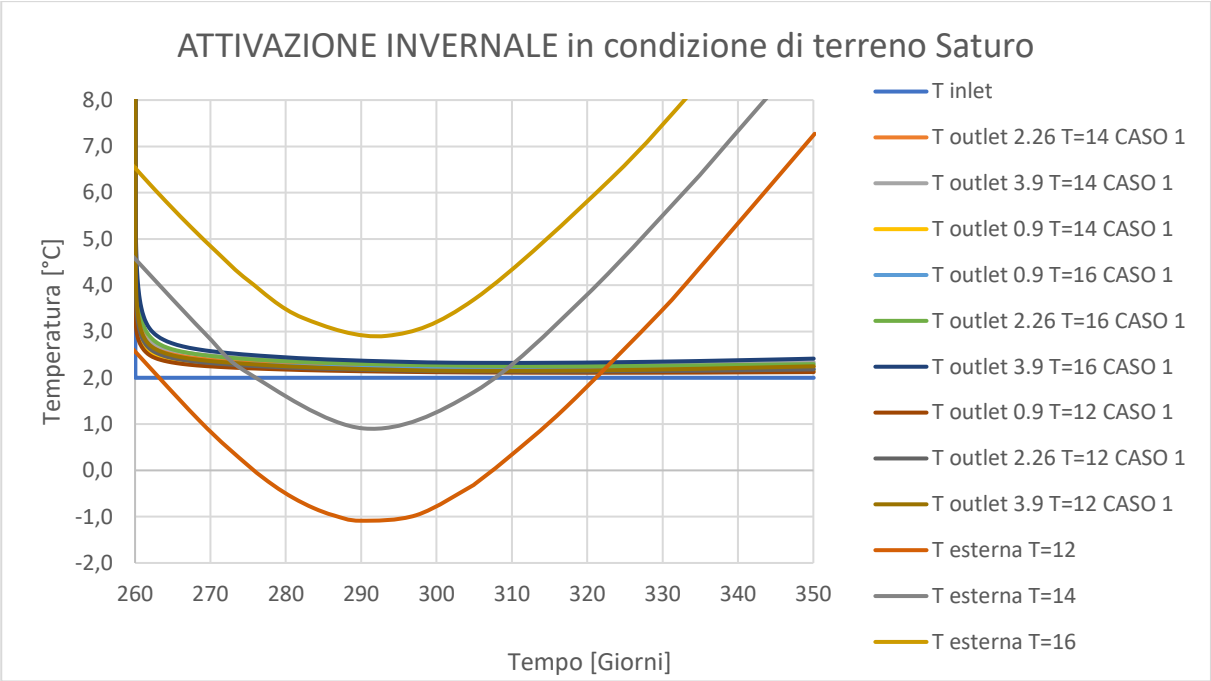


FIGURA 49 ATTIVAZIONE INVERNALE IN CONDIZIONE DI TERRENO SATURO CASO 1 CON TEMPERATURA ESTERNA

In Figura 48 e Figura 49 sono riportate le 9 simulazioni eseguite, facendo variare la temperatura esterna e la conducibilità solida del terreno λ_s. Per completezza dei risultati ottenuti viene plottato anche l'andamento della temperatura esterna nel caso estivo. Discorso analogo anche per il caso invernale.

Al fine di fornire una lettura più facile e chiara dei grafici, vengono rimosse dal grafico le temperature esterne concentrandosi cosi su un intervallo più compatto in modo da poter osservare le differenze in base alla temperatura esterna e alla conducibilità solida del terreno.

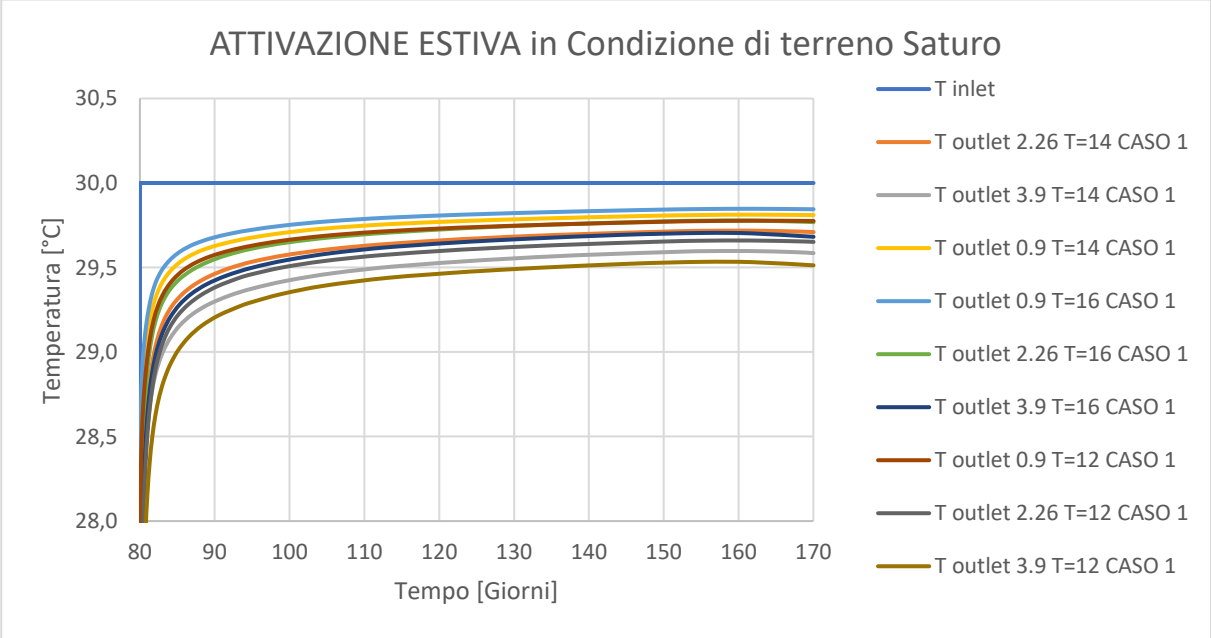


FIGURA 50 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 1 IN CONDIZIONE DI TERRENO SATURO

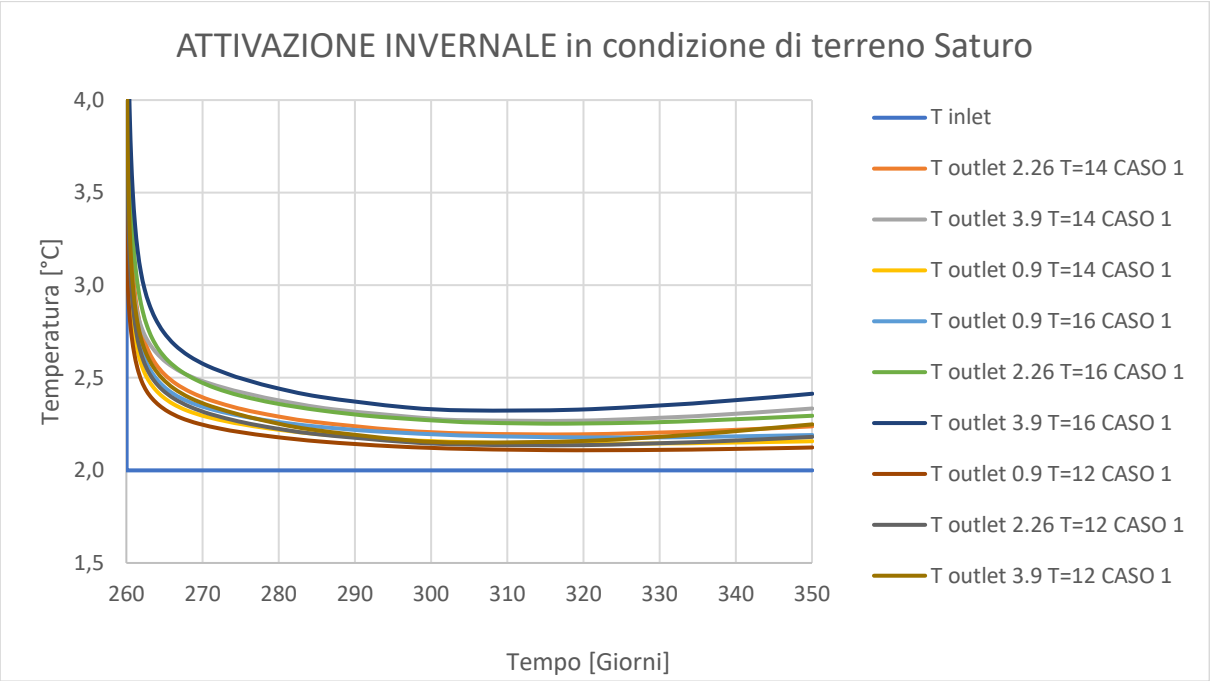


FIGURA 51 ATTIVAZIONE INVERNALE CASO 1 IN CONDIZIONE DI TERRENO SATURO

Dopo il trentesimo giorno di funzionamento dell'impianto, si osserva in Figura 50 e Figura 51, che le temperature, una volta raggiunta una ΔT, tendono a subire delle minime variazioni di ΔT. Questo fenomeno si spiega osservando la Figura 48 e Figura 49 dove si nota che la temperatura esterna per i tre mesi di riferimento, durante il funzionamento dell'impianto, non è costante ma presenta un picco. Questa dipendenza con la temperatura esterna influisce sula ΔT tra la temperatura di input e quella di output. Per ovviare a questo problema, viene preso come riferimento il trentesimo giorno di funzionamento dell'impianto, valore temporale dove i valori sono stabili e permettono di selezionare un valore rappresentativo.

Nella Tabella 7 vengono riportati i valori della ΔT al trentesimo giorno. In base alle condizioni esterne della temperatura e in funzione della conducibilità solida del terreno variano i risultati in output della ΔT. Si osservano delle differenze tra il caso estivo e quello invernale dovute alla differenza tra la temperatura di input e le temperature esterne dei casi studiati.

È importante sottolineare come risulta evidente che dalla prima analisi appena eseguita, l'efficienza del sistema risulta migliore nel periodo estivo. Il ΔT che si ricava nel periodo estivo è maggiore di quello invernale. Questo fenomeno si spiega osservando che già in partenza, pertanto prima di effettuare la simulazione dell'impianto, la differenza tra la temperatura esterna e la temperatura di input è maggiore nel caso estivo che in quello invernale.

CASO 1 SATURO			ESTATE		INVERNO		VALORI MEDIE ESTATE	VALORI MEDIE INVERNO	ΔT ESTATE	ΔT INVERNO
T=12°C	λ=0,9	Tempo [g]	104,56	111,56	285,75	295,17	110	290	0,29	0,14
		Temperatura[°C]	29,69	29,71	2,15	2,13	29,71	2,14		
	λ=2,26	Tempo [g]	104,54	112,09	284,76	297,00	110	290	0,43	0,18
		Temperatura[°C]	29,54	29,57	2,20	2,15	29,57	2,18		
	λ=3,9	Tempo [g]	104,67	113,20	284,17	296,81	110	290	0,57	0,2
		Temperatura[°C]	29,39	29,44	2,22	2,16	29,43	2,20		
T=14°C	λ=0,9	Tempo [g]	104,71	113,13	285,21	295,14	110	290	0,25	0,19
		Temperatura[°C]	29,73	29,76	2,20	2,17	29,75	2,19		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,21	112,30	284,39	295,71	110	290	0,37	0,25
		Temperatura[°C]	29,61	29,64	2,26	2,22	29,63	2,25		
	λ=3,9	Tempo [g]	105,91	114,17	287,29	300,15	110	290	0,51	0,33
		Temperatura[°C]	29,47	29,51	2,33	2,28	29,49	2,33		
T=16°C	λ=0,9	Tempo [g]	105,19	113,04	284,94	292,74	110	290	0,22	0,22
		Temperatura[°C]	29,77	29,79	2,24	2,21	29,78	2,22		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,70	113,09	285,51	293,29	110	290	0,30	0,30
		Temperatura[°C]	29,68	29,71	2,32	2,29	29,70	2,30		
	λ=3,9	Tempo [g]	105,77	113,72	285,43	296,64	110	290	0,39	0,36
		Temperatura[°C]	29,59	29,62	2,40	2,34	29,61	2,36		

TABELLA 7 BENCHMARK CASO 1 SATURO CON λ_F=0,65 W/MK, ΔT AL TRENTESIMO GIORNO DI FUNZIONAMENTO

4.5.1.2 CASO 2 – DISPOSIZIONE A PREVALENZA ORIZZONTALE

Il caso 2 è quello corrispondente alla disposizione a prevalenza orizzontale (vedi Figura 25, caso 2) e le varie simulazioni hanno fornito i seguenti risultati.

Come nel caso precedente, le figure sottostanti rappresentano la temperatura in output e in input. La temperatura in ingresso è un valore costante, mentre le temperature in uscita subiscono una variazione di temperatura in funzione del tempo di funzionamento dell'impianto, delle caratteristiche del terreno, delle tubazioni e della loro lunghezza.

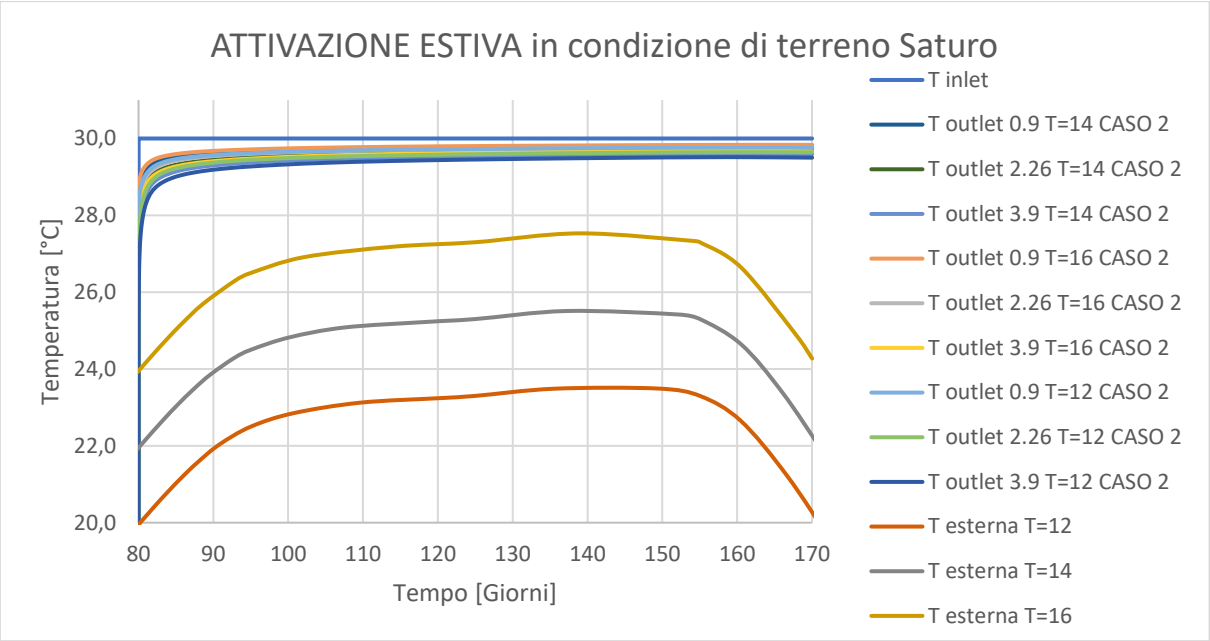


FIGURA 52 ATTIVAZIONE ESTIVA IN CONDIZIONE DI TERRENO SATURO CASO 2 CON TEMPERATURA ESTERNA

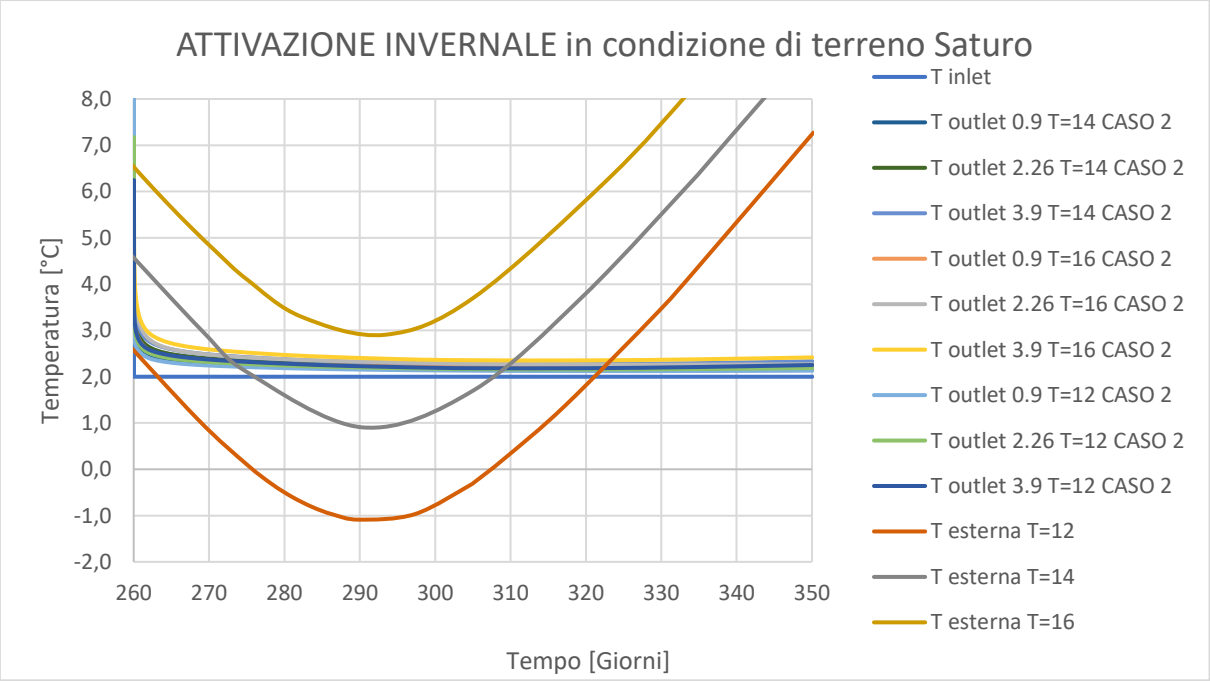


FIGURA 53 ATTIVAZIONE INVERNALE IN CONDIZIONE DI TERRENO SATURO CASO 2 CON TEMPERATURA ESTERNA

In Figura 52 e Figura 53 sono riportate le 9 simulazioni eseguite, facendo variare la temperatura esterna e la conducibilità solida del terreno λ_s. Per completezza dei risultati ottenuti viene plottato anche l'andamento della temperatura esterna nel caso estivo. Discorso analogo anche per il caso invernale. Al fine di fornire una lettura più facile e chiara dei grafici vengono riproposti gli stessi grafici senza le temperature esterne, concentrandosi cosi su un intervallo più compatto in modo da poter osservare le differenze in base alla temperatura esterna e alla conducibilità solida del terreno.

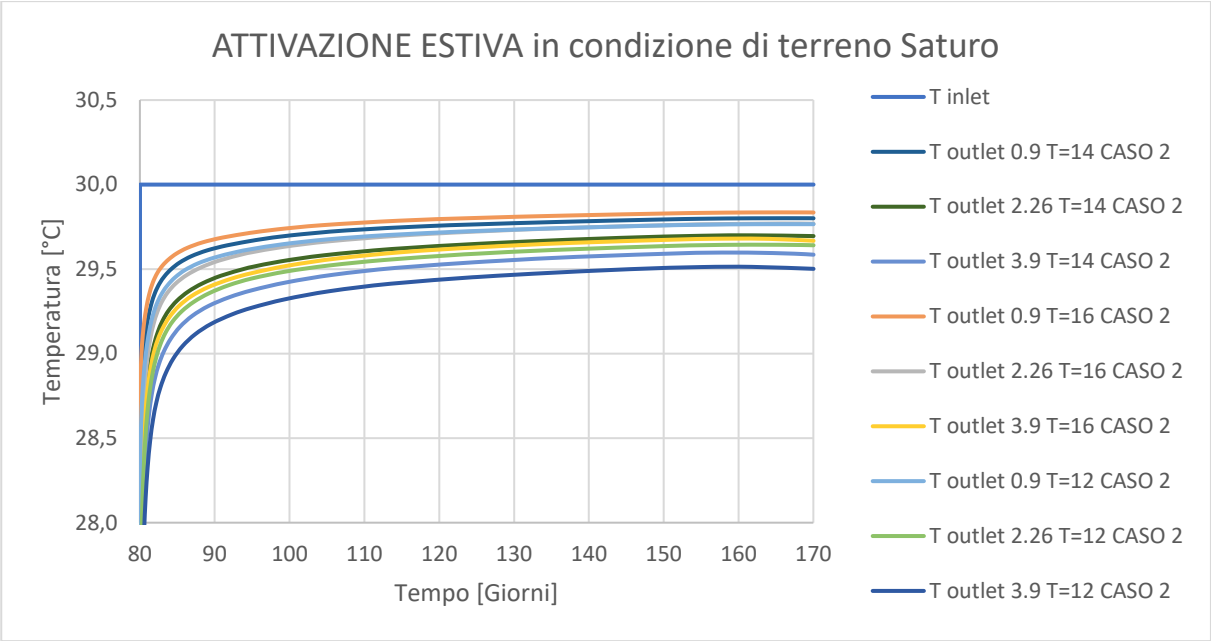


FIGURA 54 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 2 IN CONDIZIONE DI TERRENO SATURO

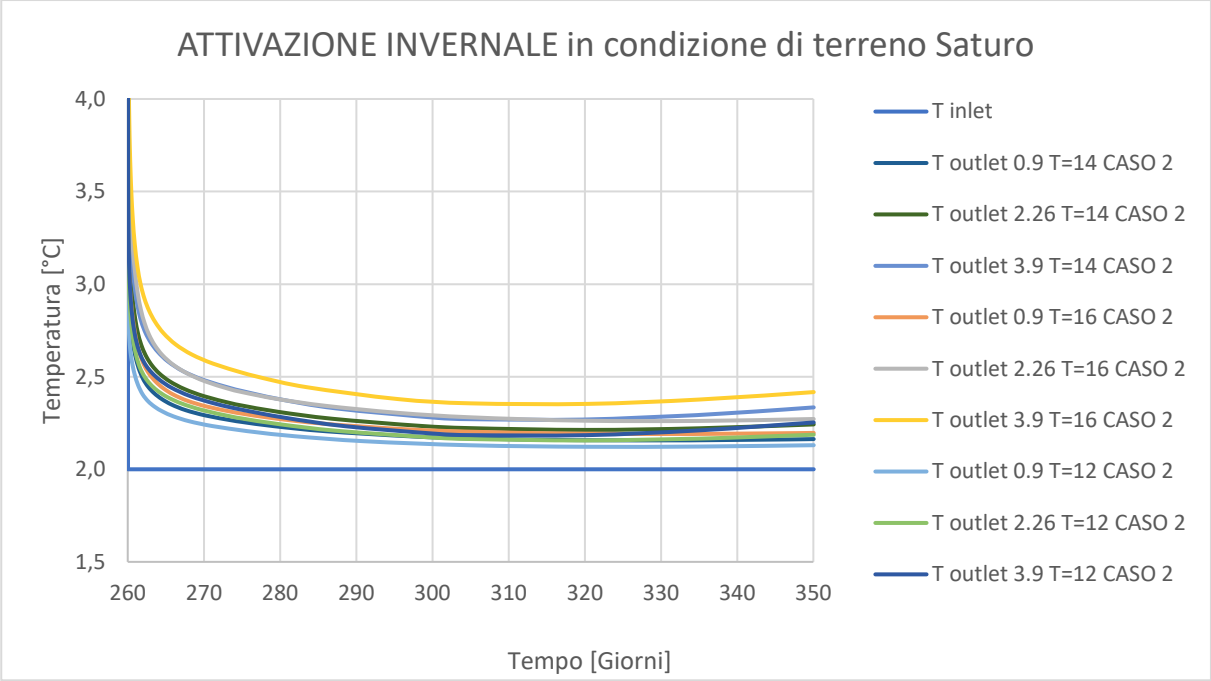


FIGURA 55 ATTIVAZIONE INVERNALE CASO 2 IN CONDIZIONE DI TERRENO SATURO

Riprendendo il procedimento del caso 1 anche in questo caso si presentano le stesse caratteristiche. La differenza di temperatura tra l'input e l'output cambia in funzione della differenza tra la temperatura di ingresso del fluido e la temperatura esterna. L'andamento della temperatura esterna influenza particolarmente l'andamento della temperatura di output, poiché in base alla presenza di picchi o meno anche la temperatura del liquido in uscita ne risentirà in maniera più o meno forte.

CASO 2 SATURO			ESTATE		INVERNO		VALORI MEDIE ESTATE	VALORI MEDIE INVERNO	ΔT ESTATE	ΔT INVERNO
T=12°C	λ=0,9	Tempo [g]	105,06	113,00	281,89	291,13	110	290	0,3	0,15
		Temperatura[°C]	29,68	29,70	2,18	2,15	29,70	2,15		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,37	112,57	287,54	300,28	110	290	0,46	0,2
		Temperatura[°C]	29,52	29,55	2,21	2,17	29,54	2,20		
	λ=3,9	Tempo [g]	105,42	113,49	288,55	300,61	110	290	0,6	0,23
		Temperatura[°C]	29,37	29,41	2,23	2,19	29,40	2,23		
T=14°C	λ=0,9	Tempo [g]	107,59	117,90	285,95	297,32	110	290	0,27	0,20
		Temperatura[°C]	29,73	29,75	2,21	2,18	29,73	2,20		
	λ=2,26	Tempo [g]	104,70	113,65	286,83	298,27	110	290	0,39	0,26
		Temperatura[°C]	29,58	29,62	2,27	2,23	29,61	2,26		
	λ=3,9	Tempo [g]	105,91	114,17	287,29	300,15	110	290	0,51	0,32
		Temperatura[°C]	29,47	29,51	2,33	2,28	29,49	2,32		
T=16°C	λ=0,9	Tempo [g]	104,37	114,59	285,56	296,18	110	290	0,22	0,24
		Temperatura[°C]	29,76	29,79	2,25	2,22	29,78	2,24		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,48	115,05	285,98	295,55	110	290	0,31	0,32
		Temperatura[°C]	29,67	29,70	2,34	2,30	29,69	2,32		
	λ=3,9	Tempo [g]	106,49	115,33	283,52	295,45	110	290	0,42	0,41
		Temperatura[°C]	29,56	29,60	2,44	2,38	29,58	2,41		

TABELLA 8 BENCHMARK CASO 2 SATURO CON λ_F=0,65 W/MK, ΔT AL TRENTESIMO GIORNO DI FUNZIONAMENTO

Nella Tabella 7 vengono riportati i valori della ΔT al trentesimo giorno. In base alle condizioni esterne della temperatura e in funzione della conducibilità solida del terreno variano i risultati in output della ΔT. Si osservano delle differenze tra il caso estivo e quello invernale, differenze derivanti dalla differenza tra la temperatura di input e le temperature esterne dei casi studiati. I valori di riferimento si riferiscono al trentesimo giorno, per selezionare il valore relativo al trentesimo giorno è stata eseguita una media tra il valore fornito dall'analisi antecedente al trentesimo giorno e quello successivo.

4.5.2 Condizione Non Satura

Per simulare la condizione non satura del terreno si è proceduto nella seguente maniera. A differenza del caso saturo in cui λ_f=0,65 W/mK, nel caso non saturo la conducibilità fluida del terreno è λ_f=0 W/mK in questa maniera i vuoti presenti tra i granuli sono riempiti di aria. Dall'altro lato la conducibilità solida del terreno verrà fatta variare come nel caso precedente, simulando per ogni temperatura i tre casi in esame con λ_s=0,9 W/mK, λ_s=2,26 W/mK e λ_s=3,9 W/mK.

4.5.2.1 CASO 1 – DISPOSIZIONE A PREVALENZA VERTICALE

Si riportano i grafici ottenuti dalla simulazione ottenuta con il software Feflow, fornendo come valori di lettura le temperature del fluido termovettore in entrata e uscita. Sullo stesso grafico viene riportata anche la temperatura esterna dell'aria, fondamentale per comprendere alcuni fenomeni che influenzano la temperatura in uscita del fluido termovettore.

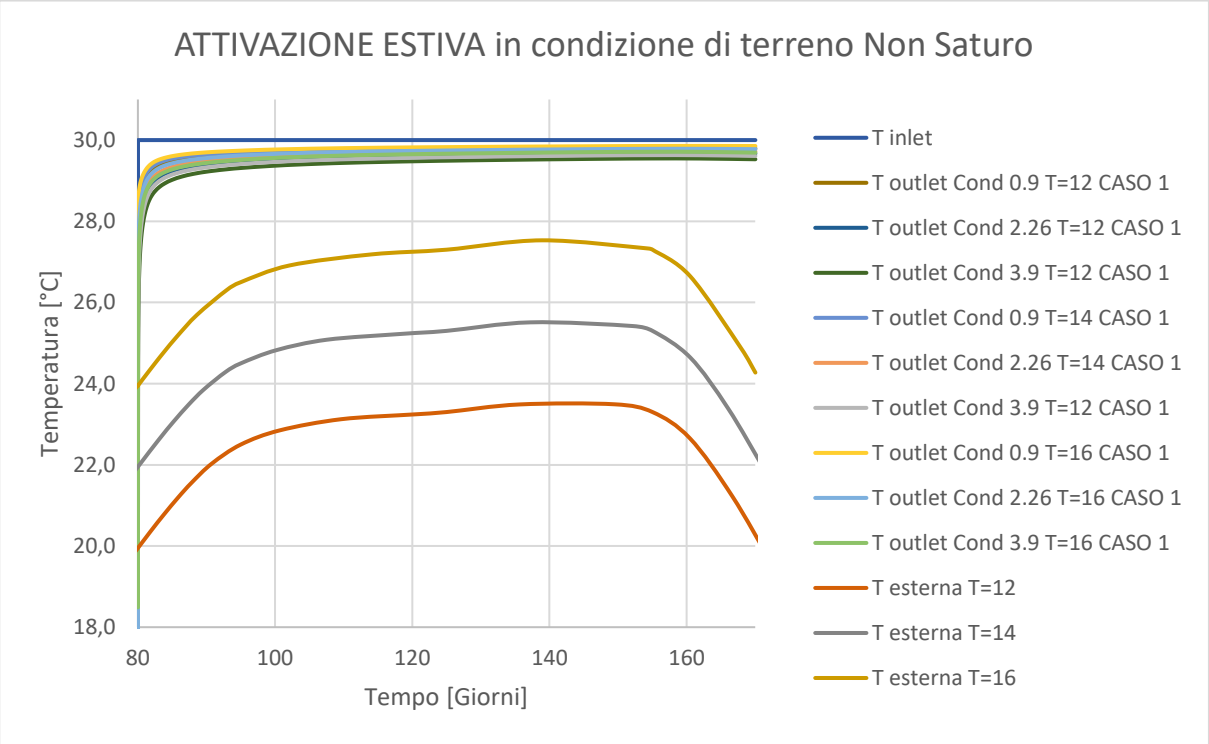


FIGURA 56 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 1 IN CONDIZIONE DI TERRENO NON SATURO CON TEMPERATURA ESTERNA

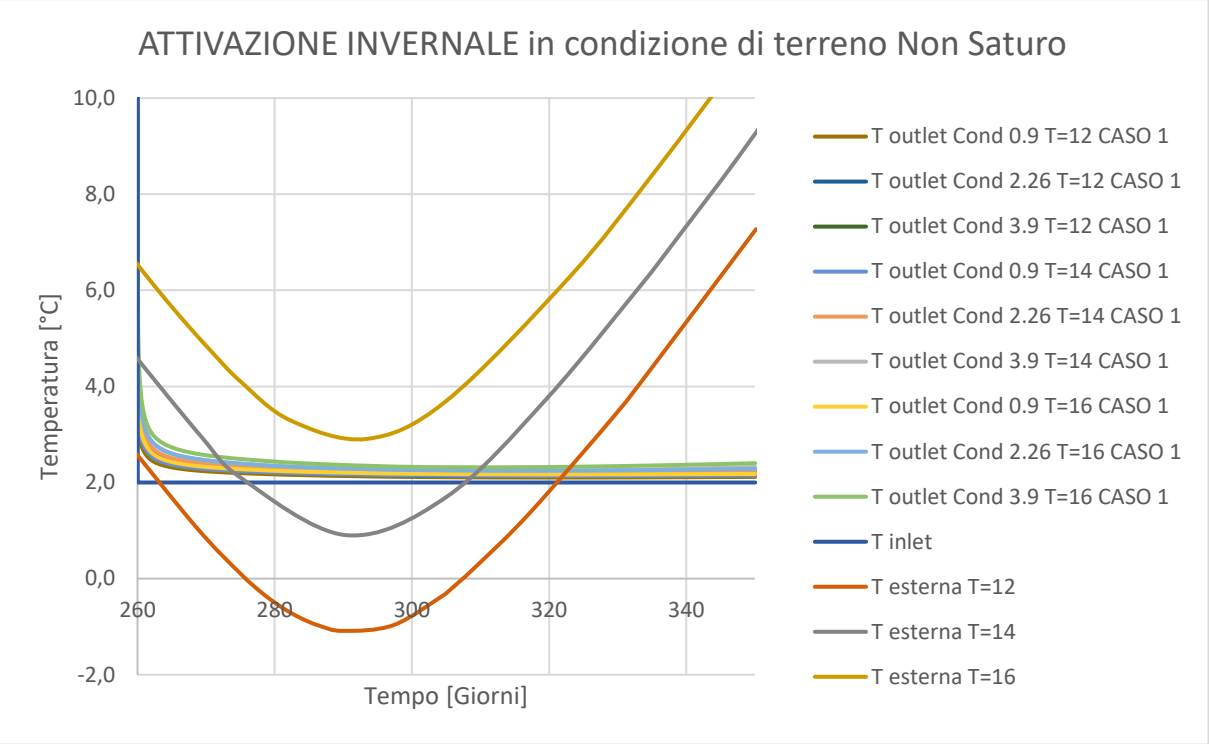


FIGURA 57 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 1 IN CONDIZIONE DI TERRENO NON SATURO CON TEMPERATURA ESTERNA

La presenza dell'aria al posto del fluido cambia le caratteristiche meccaniche del terreno e quindi la sua conducibilità varia. Quando i pori sono occupati da acqua la conducibilità è superiore rispetto al caso in cui i pori sono occupati solo da aria. Questo è dovuto alla differenza di conducibilità tra l'acqua e l'aria.

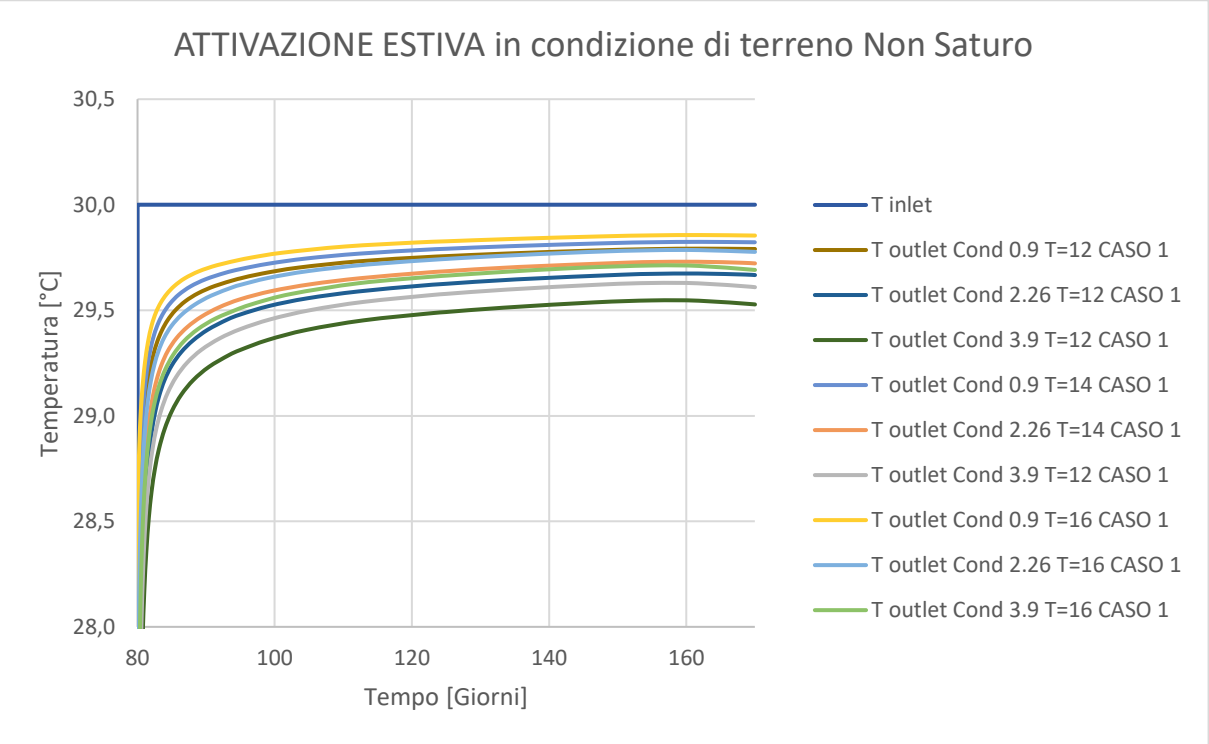


FIGURA 58 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 1 CONDIZIONE DI TERRENO NON SATURO

Nuovamente vengono rimosse le temperature esterne per facilitare la lettura dei grafici.

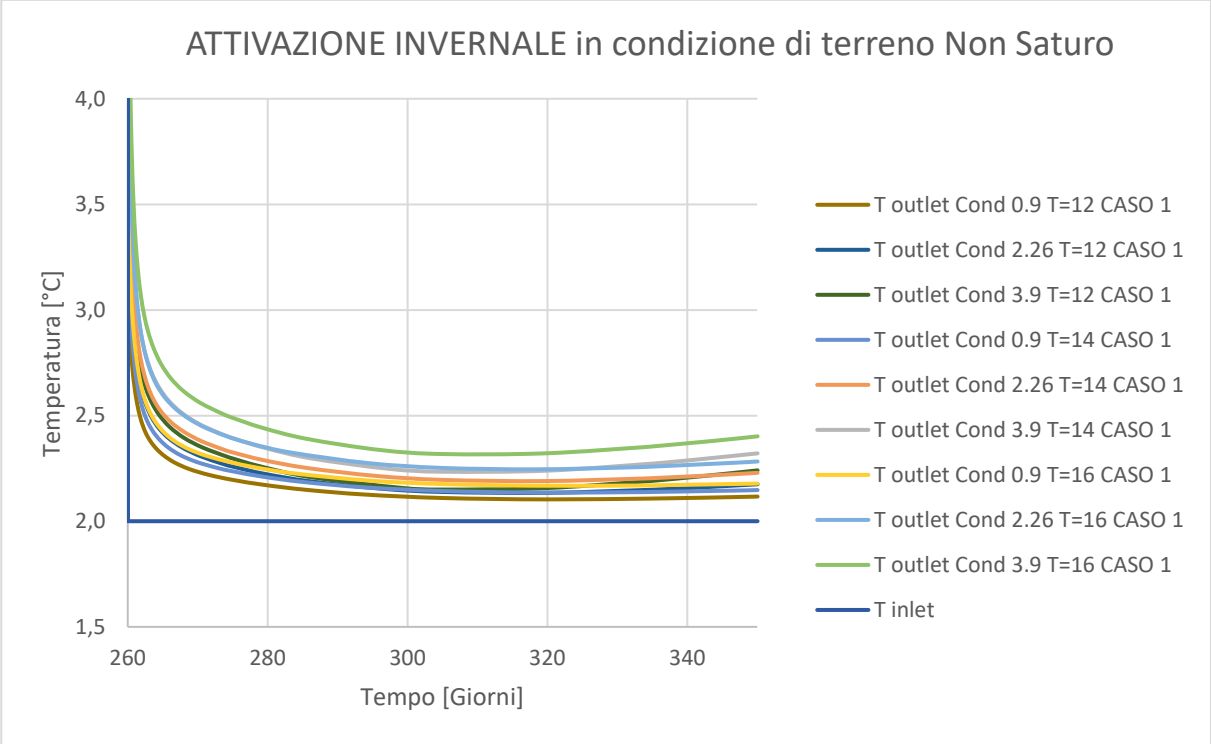


FIGURA 59 ATTIVAZIONE INVERNALE CASO 1 CONDIZIONE DI TERRENO NON SATURO

È importante osservare come anche in questo caso l'andamento della temperatura in uscita venga influenzato dalla temperatura esterna. Nel caso estivo il valore della temperatura dopo pochi giorni si attesta su una temperatura che rimane quasi costante nei giorni a proseguire. Nel caso invernale la temperatura in uscita raggiunge sempre un valore costante ma nei giorni a seguire questo valore diminuisce. Il picco che si presenta nella situazione invernale è dovuto al fatto che la temperatura esterna nei tre mesi di funzionamento dell'impianto non è costante ma presenta un valore massimo dopo il primo mese di funzionamento come si può osservare in Figura 57

In Tabella 9 sono stati riportati i valori corrispondenti al trentesimo giorno di funzionamento dell'impianto, valori che verranno utilizzati per il calcolo dell'efficienza dell'impianto. I valori selezionati sono quelli rappresentativi dell'impianto, poiché dopo il trentesimo giorno in un caso il ΔT aumenta adattando la sua forma a quella della temperatura esterna dell'aria e nell'altro diminuisce sempre secondo la temperatura esterna dell'aria, questo incremento/decremento però è trascurabile e inoltre selezionando i valori al trentesimo giorno si rimane in una condizione cautelativa e veritiera sull'effettiva efficienza dell'impianto.

CASO 1 λf = 0			ESTATE		INVERNO		VALORI MEDIE ESTATE	VALORI MEDIE INVERNO	ΔT ESTATE	ΔT INVERNO
T=12°C	λ=0,9	Tempo [g]	103,41	112,29	285,46	293,88	110	290	0,28	0,13
		Temperatura[°C]	29,70	29,73	2,15	2,13	29,72	2,13		
	λ=2,26	Tempo [g]	104,73	112,16	286,21	296,76	110	290	0,42	0,17
		Temperatura[°C]	29,56	29,59	2,19	2,15	29,58	2,17		
	λ=3,9	Tempo [g]	104,68	112,98	285,99	299,10	110	290	0,56	0,19
		Temperatura[°C]	29,41	29,45	2,21	2,16	29,44	2,19		
T=14°C	λ=0,9	Tempo [g]	104,65	112,35	285,15	294,16	110	290	0,24	0,17
		Temperatura[°C]	29,75	29,77	2,19	2,16	29,76	2,17		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,34	112,50	285,62	295,49	110	290	0,36	0,23
		Temperatura[°C]	29,62	29,65	2,25	2,21	29,64	2,23		
	λ=3,9	Tempo [g]	105,27	112,97	286,24	297,16	110	290	0,47	0,27
		Temperatura[°C]	29,50	29,54	2,30	2,25	29,53	2,27		
T=16°C	λ=0,9	Tempo [g]	101,13	110,21	283,82	294,65	110	290	0,20	0,21
		Temperatura[°C]	29,77	29,80	2,23	2,19	29,80	2,21		
	λ=2,26	Tempo [g]	104,96	113,71	283,40	294,48	110	290	0,29	0,29
		Temperatura[°C]	29,69	29,72	2,32	2,27	29,71	2,29		
	λ=3,9	Tempo [g]	102,41	112,38	285,58	296,08	110	290	0,38	0,35
		Temperatura[°C]	29,58	29,63	2,39	2,34	29,62	2,35		

TABELLA 9 BENCHMARK CASO 1 NON SATURO CON λ_F=0, ΔT AL TRENTESIMO GIORNO DI FUNZIONAMENTO

4.5.2.2 CASO 2 – DISPOSIZIONE A PREVALENZA ORIZZONTALE

Il caso 2 nuovamente si riferisce alla disposizione delle serpentine a prevalenza orizzontale. Qui si parla del caso 2 in condizioni non sature e la modalità di analisi è la stessa dei tre casi già visti in precedenza. Si osserva la differenza tra la temperatura in ingresso del fluido e quella in uscita, cercando così di osservare la differenza tra il caso saturo e quello non saturo.

In figura Figura 60 e Figura 61, come nei casi precedenti, vengono riportate la temperatura di ingresso e di uscita del fluido. Per completezza si integra con la temperatura esterna con la quale verranno giustificati eventuali presenze di picchi nella temperatura di uscita. In Figura 60 viene riportata la situazione estiva mentre nella Figura 61 quella invernale, dove rispettivamente le temperature di ingresso del fluido termovettore sono pari a 30°C e 2°C.

La differenza tra la temperatura in ingresso e la temperatura esterna è maggiore nel caso estivo pertanto l'efficienza dell'impianto sarà maggiore nella condizione estiva.

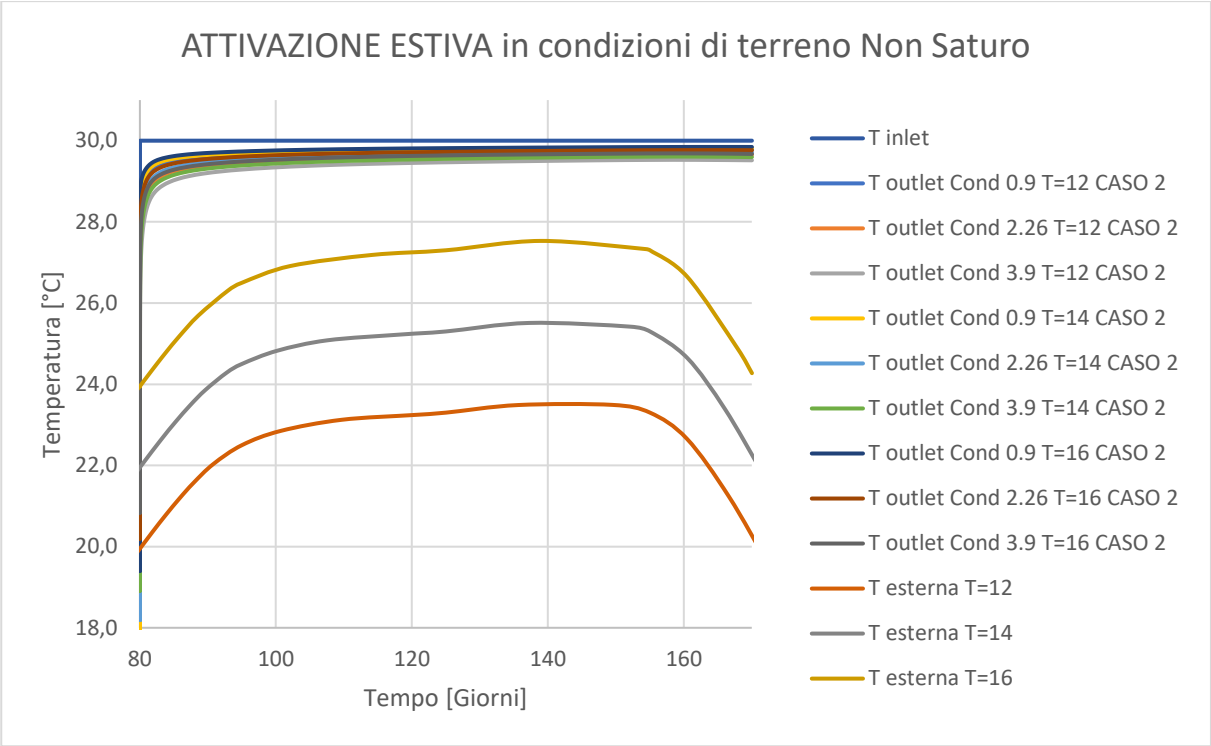


FIGURA 60 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 2 IN CONDIZIONI DI TERRENO NON SATURO CON TEMPERATURA ESTERNA

Come già spiegato in precedenza le tre temperature esterne si riferiscono alle varie modulazioni che sono state effettuate. La temperatura esterna di partenza come spiegato nei paragrafi precedenti è quella riferita alla città di Torino e successivamente la sinuisoidale è stata traslata di $\mp 2°C$.

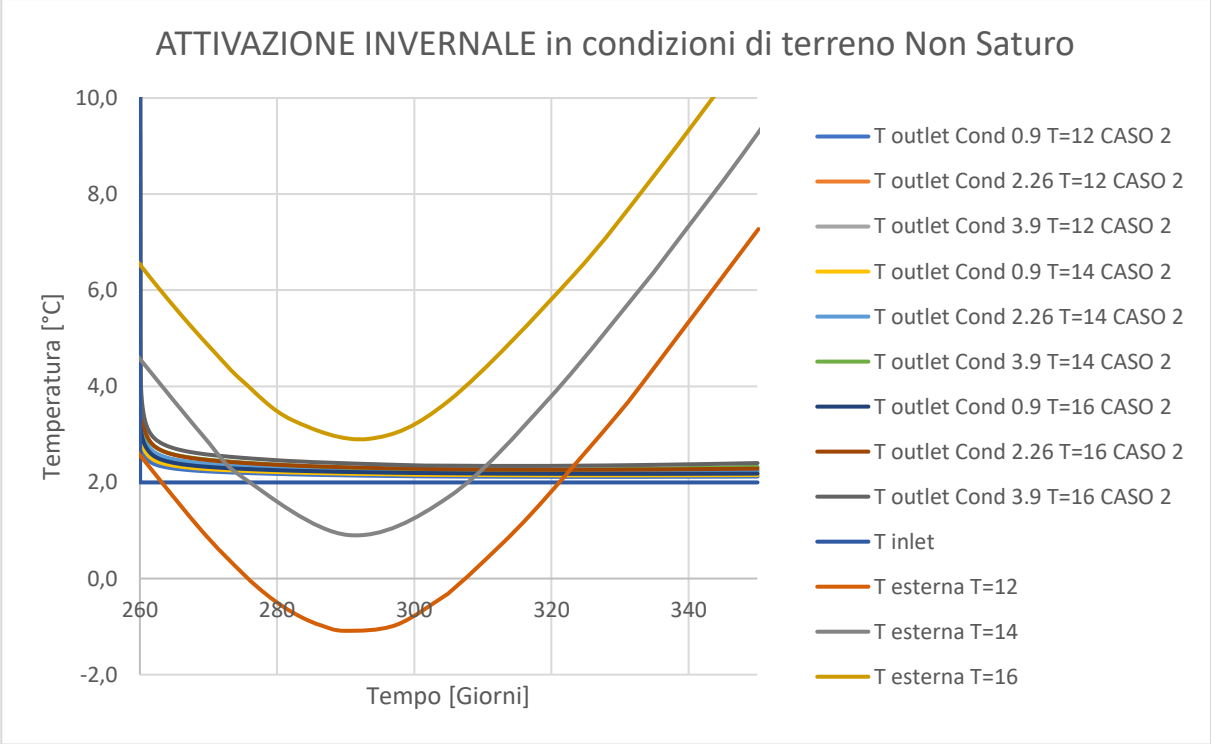


FIGURA 61 ATTIVAZIONE INVERNALE CASO 2 IN CONDIZIONI DI TERRENO NON SATURO CON TEMPERATURA ESTERNA

Per poter osservare al meglio il ΔT che si instaura tra la temperatura d'ingresso e quella di uscita, vengono levate le temperature esterne dell'aria riducendo così l'intervallo dei valori sull'asse delle y e quindi delle temperature.

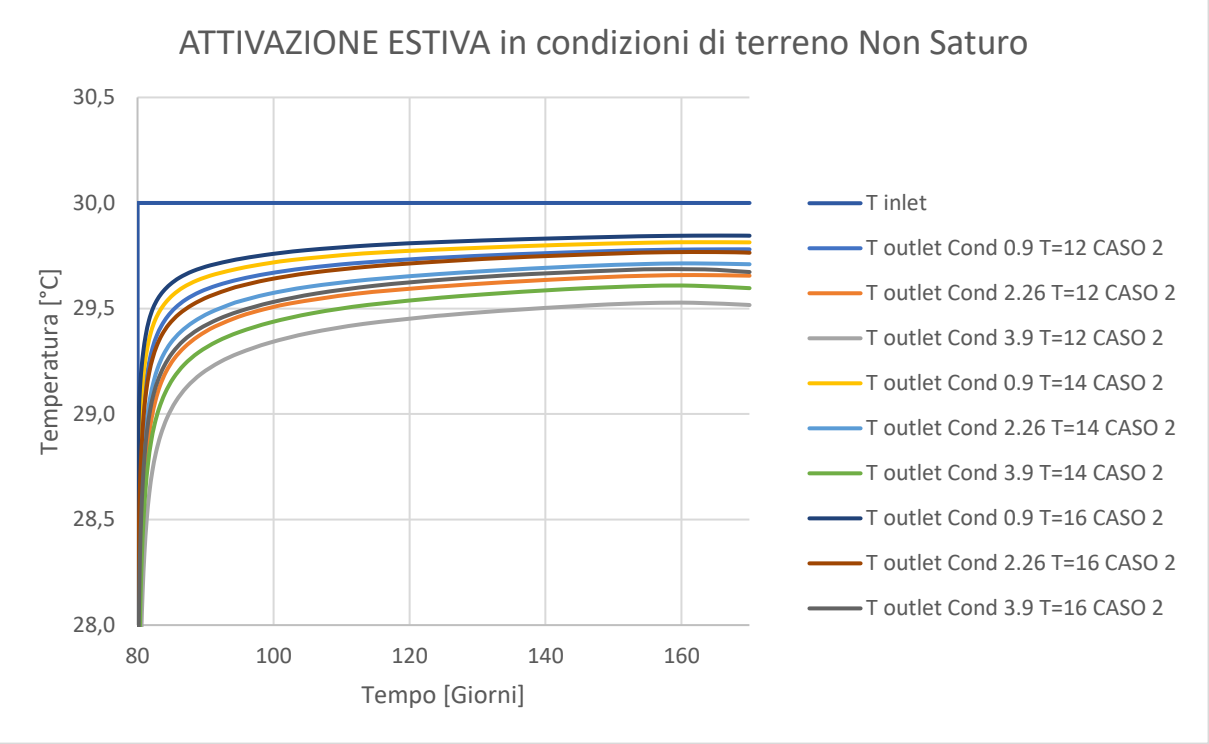


FIGURA 62 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 2 IN CONDIZIONI DI TERRENO NON SATURO

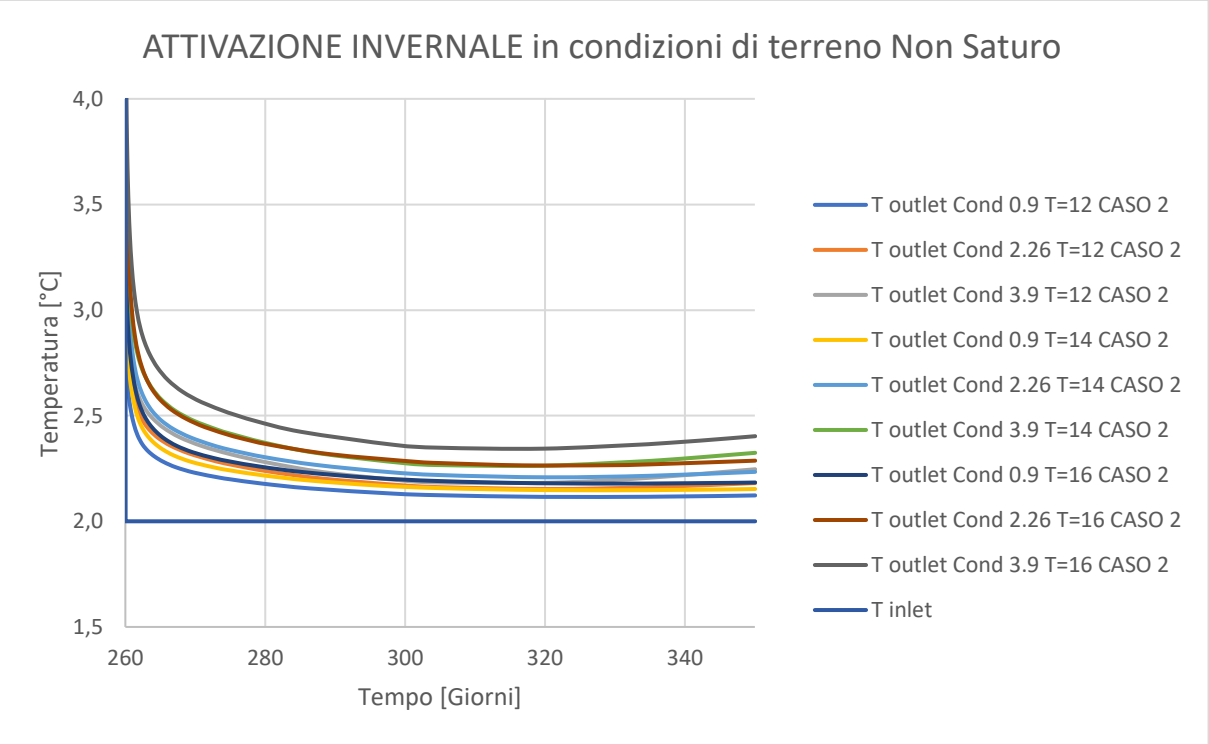


FIGURA 63 ATTIVAZIONE INVERNALE CASO 2 IN CONDIZIONI DI TERRENO NON SATURO

In Tabella 10, come fatto nel paragrafo precedente, vengono riassunti i valori di riferimento corrispondenti al trentesimo giorno di funzionamento dell'impianto. Questi sono i valori che verranno utilizzati per calcolare l'efficienza del sistema. I valori si riferiscono sia alla condizione invernale che a quella estiva. Sia nel caso estivo che in quello invernale vengono riportati i valori in funzione della temperatura esterna e in funzione della conducibilità solida del terreno. Per il caso 2, nella condizione di terreno non saturo, avremmo 9 risultati durante il periodo estivo e altrettanti nel caso di funzionamento invernale. Dalla Tabella 10 risulta evidente come il ΔT estivo sia maggiore rispetto al ΔT invernale, come già spiegato in precedenza questo è dovuto alla differenza maggiore che c'è tra la temperatura esterna dell'aria e quella in entrata del fluido nel caso estivo rispetto a quello invernale.

CASO 2 λf = 0			ESTATE		INVERNO		VALORI MEDIE ESTATE	VALORI MEDIE INVERNO	ΔT ESTATE	ΔT INVERNO
T=12°C	λ=0,9	Tempo [g]	104,72	111,85	286,40	298,32	110	290	0,29	0,14
		Temperatura[°C]	29,69	29,71	2,16	2,13	29,71	2,14		
	λ=2,26	Tempo [g]	102,55	112,00	288,06	299,50	110	290	0,44	0,19
		Temperatura[°C]	29,52	29,57	2,20	2,17	29,56	2,19		
	λ=3,9	Tempo [g]	105,34	113,19	288,36	299,74	110	290	0,58	0,22
		Temperatura[°C]	29,38	29,43	2,23	2,19	29,42	2,22		
T=14°C	λ=0,9	Tempo [g]	102,68	113,17	286,04	296,00	110	290	0,25	0,18
		Temperatura[°C]	29,73	29,76	2,19	2,17	29,75	2,18		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,15	113,88	287,24	297,49	110	290	0,37	0,25
		Temperatura[°C]	29,60	29,64	2,27	2,23	29,63	2,25		
	λ=3,9	Tempo [g]	105,82	113,85	287,37	299,86	110	290	0,49	0,31
		Temperatura[°C]	29,48	29,52	2,32	2,28	29,51	2,31		
T=16°C	λ=0,9	Tempo [g]	104,73	114,61	285,56	295,00	110	290	0,21	0,22
		Temperatura[°C]	29,78	29,80	2,23	2,21	29,79	2,22		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,65	114,85	289,25	301,61	110	290	0,30	0,31
		Temperatura[°C]	29,67	29,70	2,32	2,28	29,70	2,31		
	λ=3,9	Tempo [g]	106,41	115,01	285,18	298,34	110	290	0,41	0,40
		Temperatura[°C]	29,57	29,61	2,42	2,36	29,59	2,40		

TABELLA 10 BENCHMARK CASO 2 NON SATURO CON λ_F=0, ΔT AL TRENTESIMO GIORNO DI FUNZIONAMENTO

Altro fattore che vale la pena sottolineare è come il ΔT (sia nel caso invernale che in quello estivo) aumenti all'aumentare della conducibilità solida del terreno. Questo evento si verifica per ogni temperatura esterna su cui sono state fatte le simulazioni e lo stesso vale anche per il caso saturo. Aumentando la conducibilità solida del terreno, il calore viene scambiato più facilmente e quindi la temperatura del fluido termovettore che scorre dentro le serpentine è più facilmente soggetta a cedere o acquistare calore, ottenendo così dei ΔT maggiori quando la conducibilità è maggiore. Questo implica che l'efficienza dell'impianto sarà maggiore nel caso in cui la conducibilità solida del terreno è maggiore. I valori cambiano oltre che in funzione della conducibilità solida del terreno anche in base ai valori della temperatura esterna. L'impianto in condizioni estive funzionerà meglio quando la temperatura del fluido in ingresso è sempre pari a 30°C ma la temperatura dell'aria esterna è più bassa. Discorso reciproco per il caso invernale, dove la temperatura di ingresso del fluido è tenuta paria a 2°C e in questo caso l'efficienza sarà maggiore quando la temperatura esterna dell'aria sarà maggiore.

4.5.3 Condizione in Presenza di flusso di falda

Per simulare la condizione di falda in movimento, nel caso in esame, è stata assegnata una differenza di carico idraulico tra le due estremità di ΔH=10 cm. In questa maniera è stato possibile simulare una velocita di $V \cong 2{,}4\ m/g$. Come nei casi precedenti di caso saturo/ non saturo, la conducibilità solida del terreno verrà fatta variare simulando per ogni temperatura i tre casi in esame con λ_s=0,9 W/mK, λ_s=2,26 W/mK e λ_s=3,9 W/mK. Essendo un modello si suppone che tale velocità sia plausibile anche se nei casi reali per un modello cosi superficiale è difficile raggiungere quella velocità di Darcy. Il valore così alto della velocità di Darcy è stato scelto anche per sottolineare di quanto migliora la potenza estraibile dallo stesso sistema studiato precedentemente.

4.5.3.1 CASO 1 – DISPOSIZIONE A PREVALENZA VERTICALE

Seguendo la linea dei casi analizzati nei paragrafi precedenti si riportano in Figura 64 e Figura 65 le variazioni di temperatura ottenute nel caso di movimento di falda. Avendo una velocita di $V \cong 2{,}4\ m/g$ si osserva che i risultati forniti, ovvero il ΔT che si crea tra la temperatura del fluido in entrata e quello in uscita è superiore ai due casi visti in precedenza. Le simulazioni sono state eseguite anche in questo caso con le condizioni iniziali e al contorno analoghe a quelle dei casi precedenti. Si osserva in Figura 64 e Figura 65 che la temperatura esterna dell'aria nei mesi estivi e in quelli invernali si presenta come nei paragrafi precedenti.

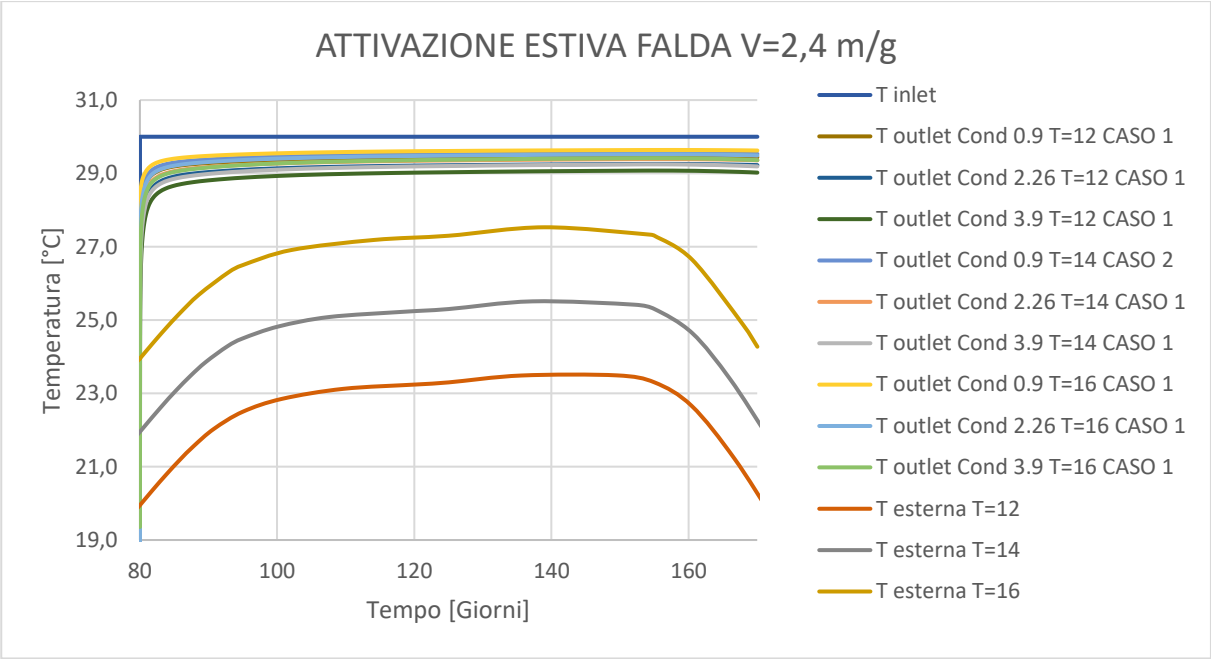


FIGURA 64 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 1 FALDA IN MOVIMENTO CON TEMPERATURA ESTERNA

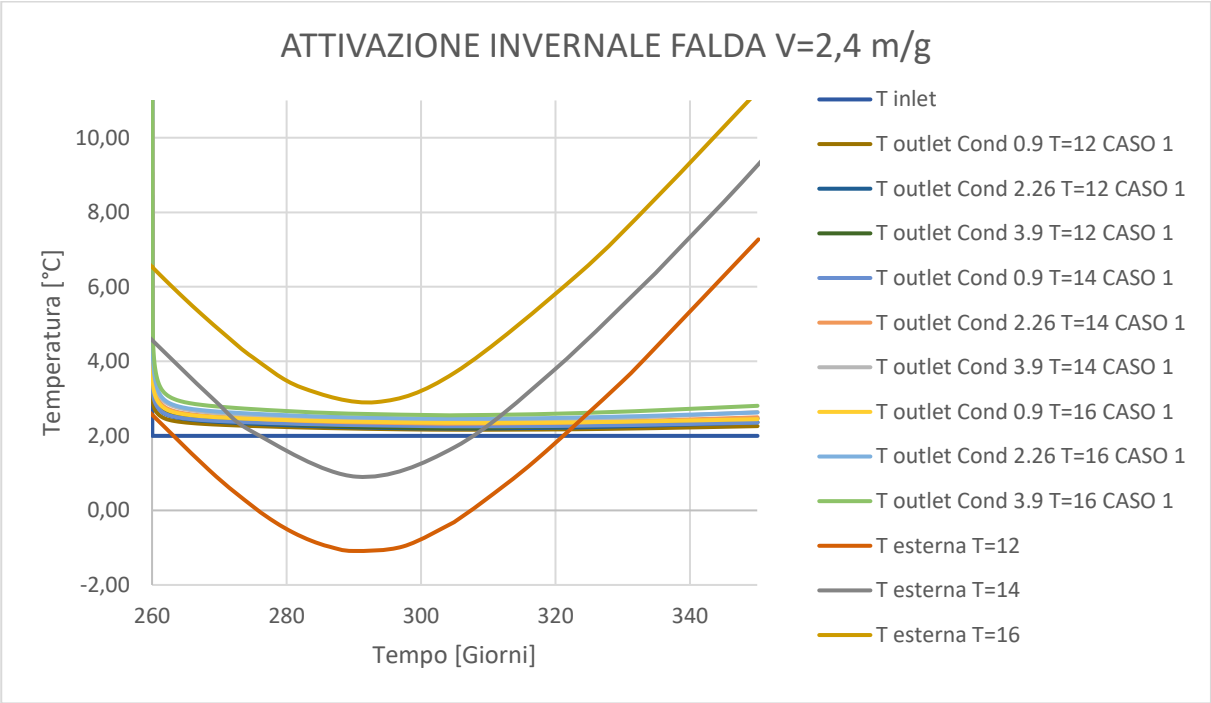


FIGURA 65 ATTIVAZIONE INVERNALE CASO 1 FALDA IN MOVIMENTO CON TEMPERATURA ESTERNA

Nuovamente vengono riportati gli stessi grafici senza le temperature esterne per poter meglio osservare la ΔT che si instaura.

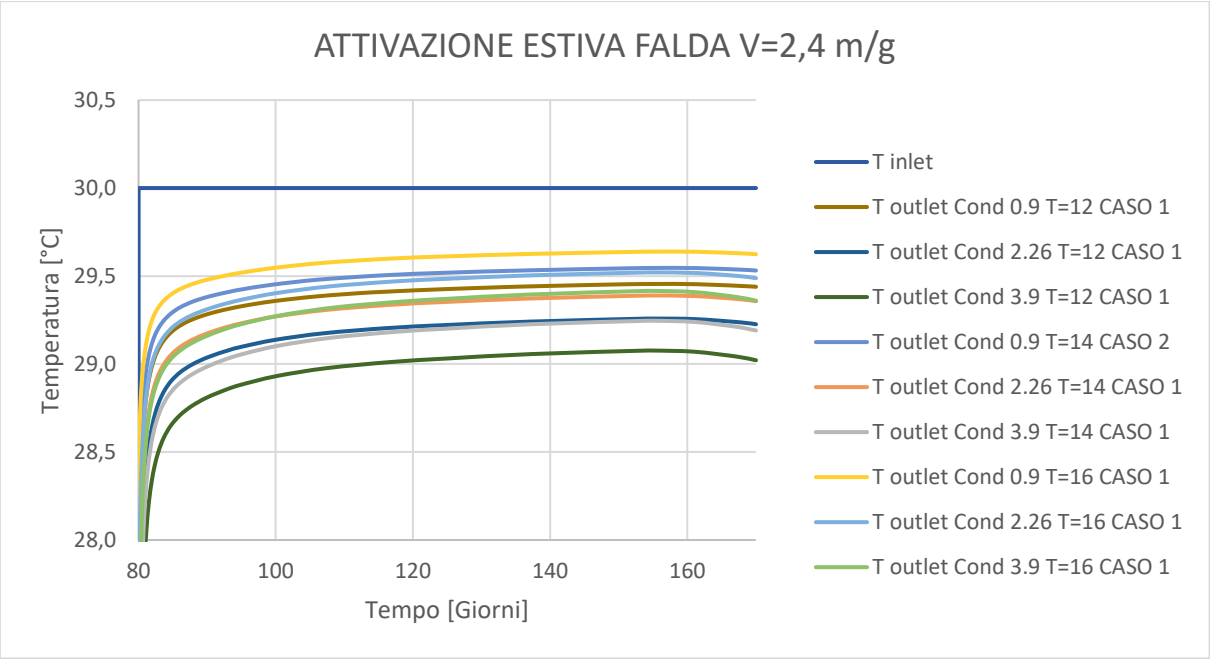


FIGURA 66 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 1 FALDA IN MOVIMENTO

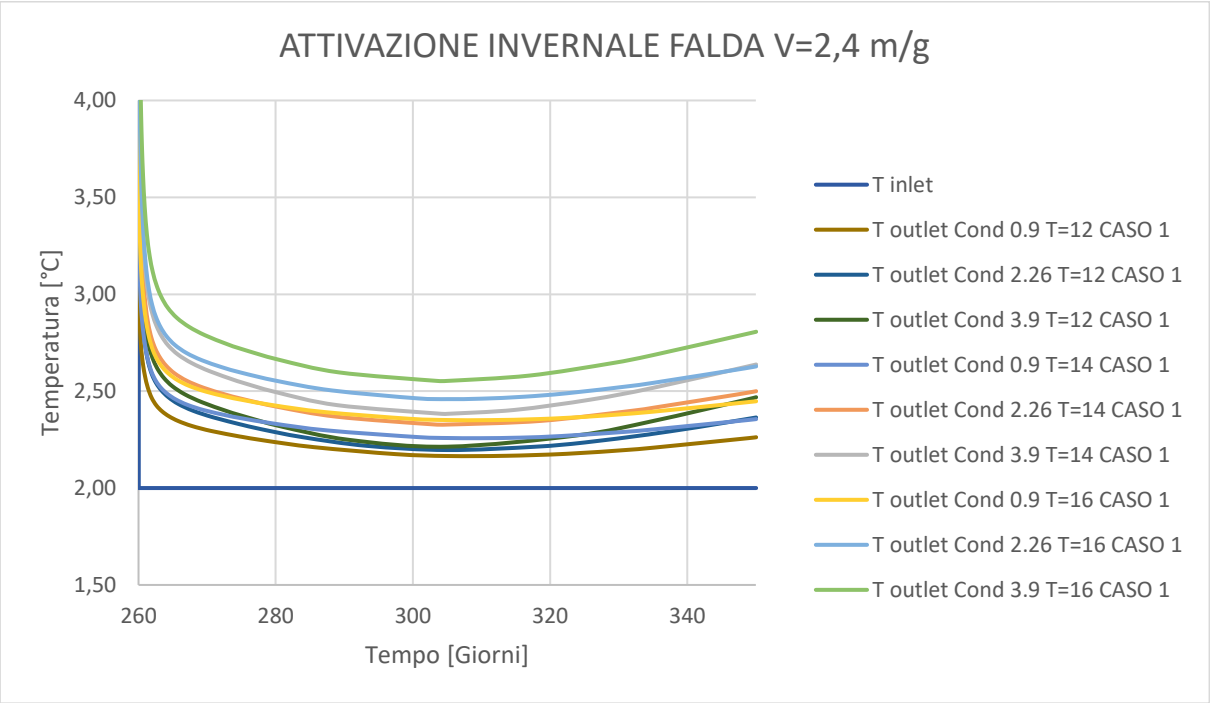


FIGURA 67 ATTIVAZIONE INVERNALE CASO 1 FALDA IN MOVIMENTO

In Figura 66 e Figura 67, dove sono presenti le temperature in uscita del fluido termovettore in funzione delle varie caratteristiche assegnate al modello, il ΔT che si instaura tra la temperatura del fluido in entrata e quella del fluido in uscita è maggiore rispetto ai due casi visti in precedenza. Per una conducibilità solida del terreno alta si avrà un ΔT maggiore, questo avviene sia nel caso invernale che in quello estivo. Il ΔT, indipendente dalla temperatura esterna, è maggiore quando la conducibilità aumenta, come si deduce da Figura 66 e Figura 67. Se il

terreno presenta una conducibilità solida pari 0,9 allora il ΔT scambiato sarà inferiore al ΔT ricavato dallo stesso terreno ma con una conducibilità di 3,9.

In Tabella 11 sono riportati i valori del ΔT di riferimento in funzione della temperatura esterna dell'aria e della conducibilità solida del terreno. I valori sono maggiori rispetto a quelli discussi nei due paragrafi precedenti. Durante il funzionamento estivo si ottiene la massima efficienza del sistema quando la temperatura esterna dell'aria è la più bassa, questo avviene perché viene imposta una temperatura in ingresso del fluido termovettore pari a 30°C. Al contrario per il caso invernale si ha la massima efficienza del sistema quando la temperatura esterna dell'aria è quella più altra e anche in questo caso va mantenuta costante la temperatura in ingresso del fluido termovettore paria a 2°C. Facendo riferimento al trentesimo giorno di funzionamento dell'impianto le temperature ricavate per calcolare l'energia prodotta sono quelli indicati in Tabella 11.

CASO 1 IN PRESENZA DI FALDA IN MOVIMENTO ΔH=0,1			ESTATE		INVERNO		VALORI MEDIE ESTATE	VALORI MEDIE INVERNO	ΔT ESTATE	ΔT INVERNO
T=12°C	λ=0,9	Tempo [g]	106,11	114,34	285,61	297,53	110	290	0,61	0,19
		Temperatura[°C]	29,38	29,41	2,21	2,17	29,39	2,19		
	λ=2,26	Tempo [g]	106,99	116,37	283,85	293,31	110	290	0,82	0,23
		Temperatura[°C]	29,17	29,20	2,26	2,22	29,18	2,23		
	λ=3,9	Tempo [g]	107,43	116,93	280,87	290,71	110	290	1,01	0,25
		Temperatura[°C]	28,98	29,01	2,32	2,25	28,99	2,25		
T=14°C	λ=0,9	Tempo [g]	106,39	116,20	287,58	300,98	110	290	0,51	0,30
		Temperatura[°C]	29,48	29,51	2,30	2,26	29,49	2,30		
	λ=2,26	Tempo [g]	107,57	116,71	288,92	302,81	110	290	0,68	0,37
		Temperatura[°C]	29,31	29,34	2,37	2,33	29,32	2,37		
	λ=3,9	Tempo [g]	108,17	117,53	288,96	304,22	110	290	0,84	0,43
		Temperatura[°C]	29,15	29,18	2,43	2,38	29,16	2,43		
T=16°C	λ=0,9	Tempo [g]	107,07	116,76	287,06	299,63	110	290	0,41	0,39
		Temperatura[°C]	29,58	29,60	2,39	2,36	29,59	2,39		
	λ=2,26	Tempo [g]	107,92	117,21	288,19	300,62	110	290	0,55	0,50
		Temperatura[°C]	29,44	29,47	2,50	2,46	29,45	2,50		
	λ=3,9	Tempo [g]	108,82	118,42	289,21	303,43	110	290	0,67	0,60
		Temperatura[°C]	29,32	29,36	2,60	2,55	29,33	2,60		

TABELLA 11 BENCHMARK CASO 1 FALDA IN MOVIMENTO ΔH=0,1M, ΔT AL TRENTESIMO GIORNO DI FUNZIONAMENTO

4.5.3.2 CASO 2 – DISPOSIZIONE A PREVALENZA ORIZZONTALE

Come nel caso 1 si riportano gli stessi grafici, prima con le temperature esterne e successivamente, per meglio focalizzarsi sulla ΔT, solo la temperatura in ingresso e in uscita del fluido termovettore.

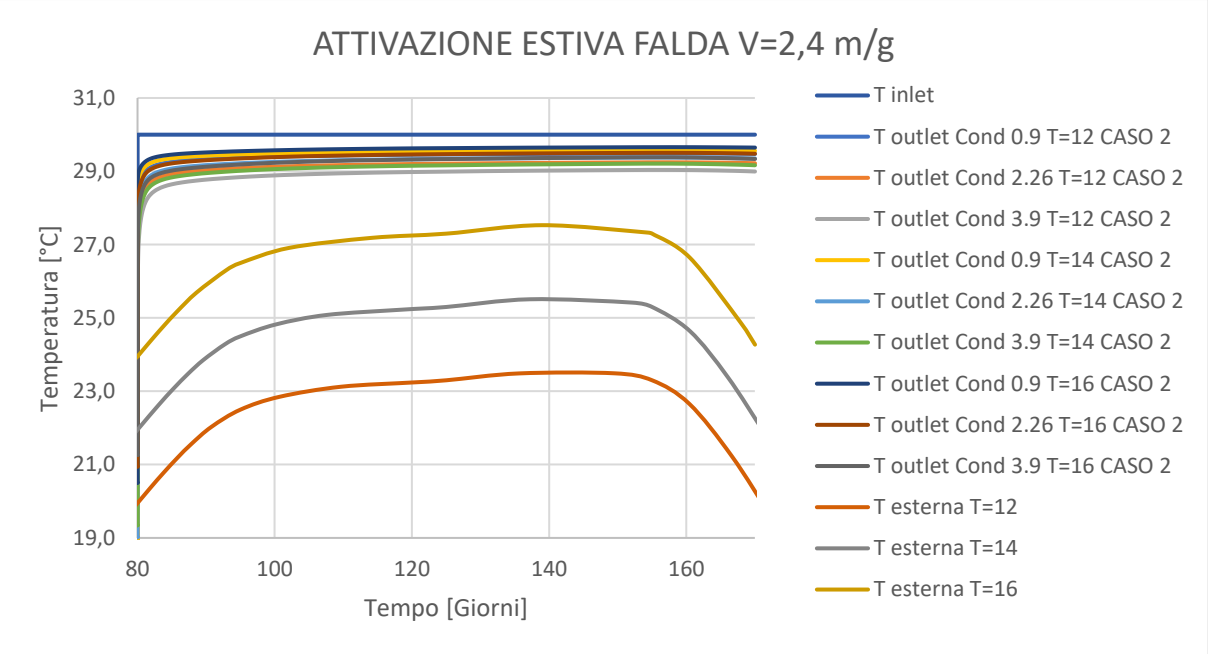


FIGURA 68 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 2 FALDA IN MOVIMENTO CON TEMPERATURA ESTERNA

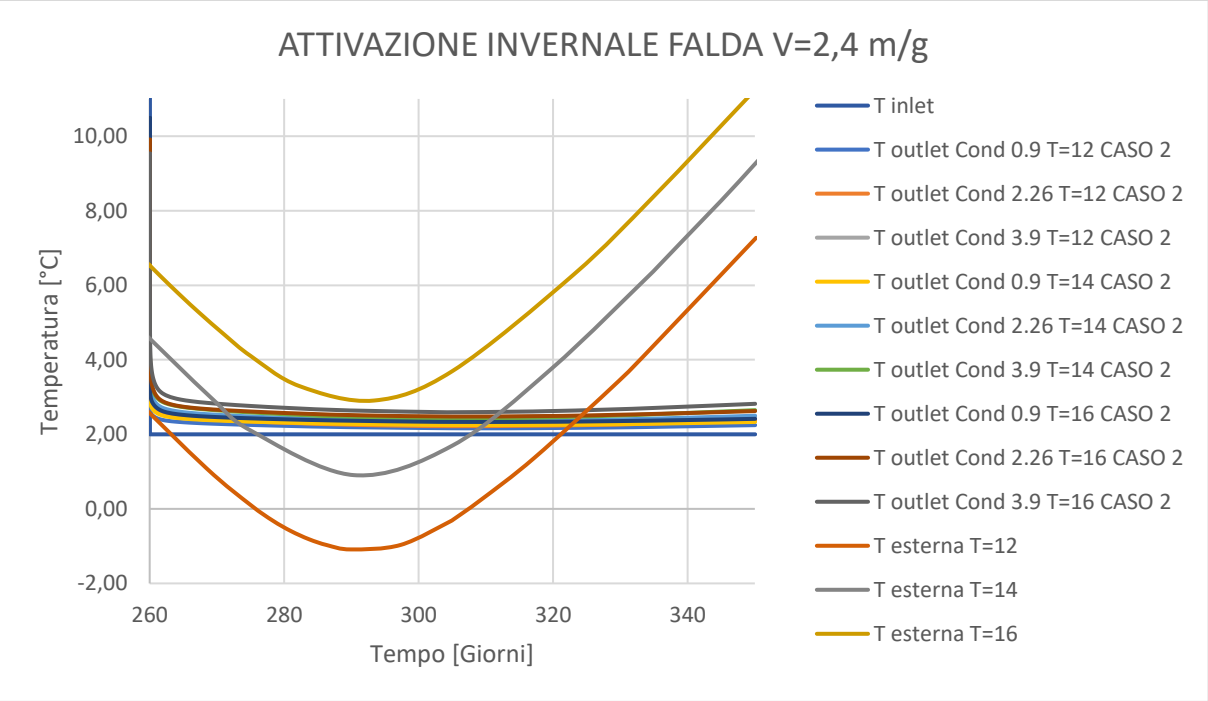


FIGURA 69 ATTIVAZIONE INVERNALE CASO 2 FALDA IN MOVIMENTO CON TEMPERATURA ESTERNA

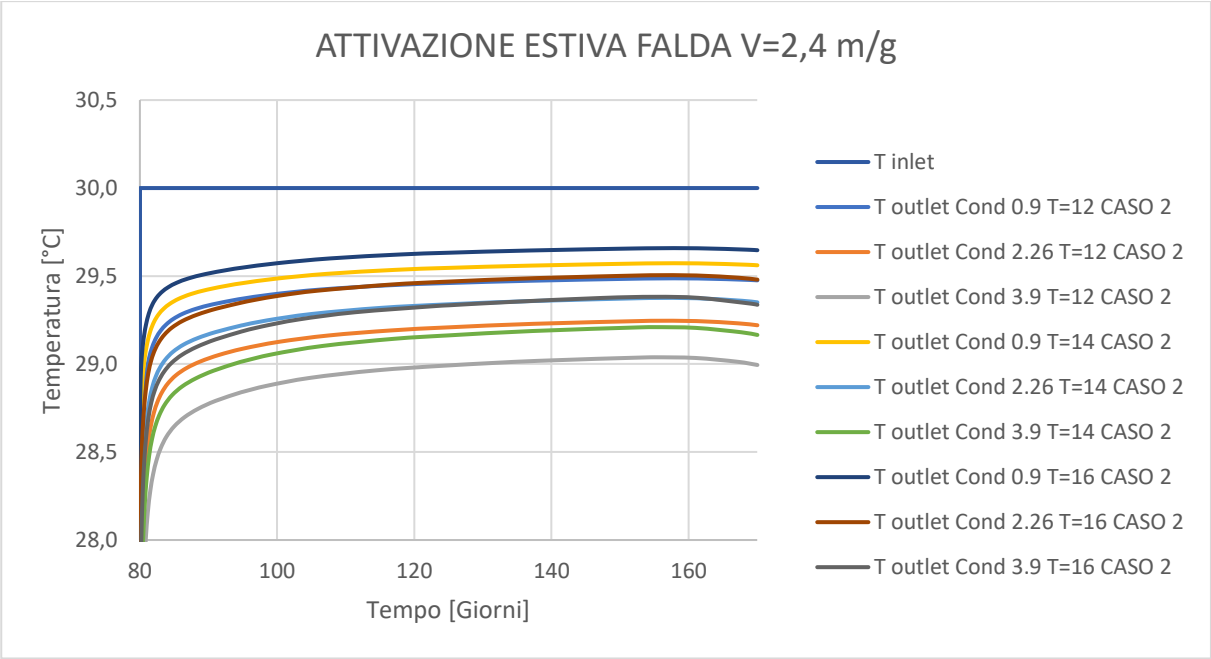


FIGURA 70 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 2 FALDA IN MOVIMENTO

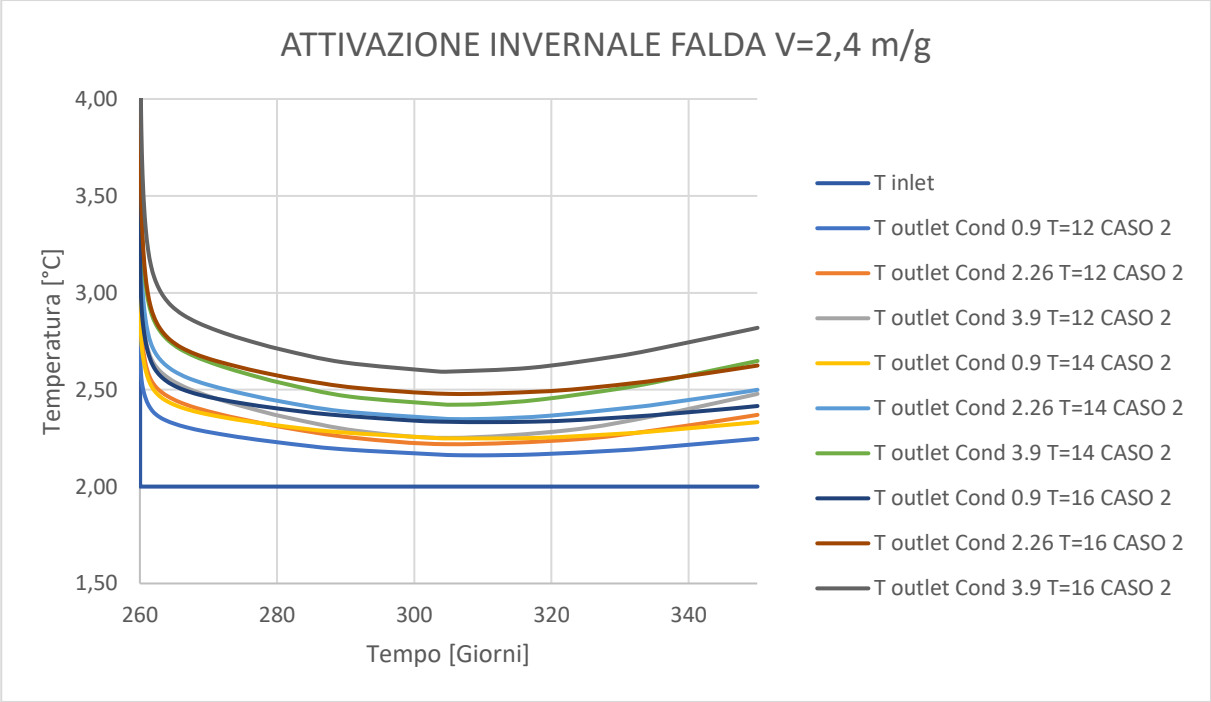


FIGURA 71 ATTIVAZIONE ESTIVA CASO 2 FALDA IN MOVIMENTO

Dalla Figura 70 e Figura 71 per interpolazione sono stati ottenuti i valori di riferimento che si riferiscono al trentesimo giorno di funzionamento dell'impianto e sono riportati in Tabella 12 dove i valori ottenuti sono maggiori rispetto al caso saturo e non saturo trattati nei paragrafi precedenti.

CASO 2 IN PRESENZA DI FALDA IN MOVIMENTO ΔH=0,1			ESTATE		INVERNO		VALORI MEDIE ESTATE	VALORI MEDIE INVERNO	ΔT ESTATE	ΔT INVERNO
T=12°C	λ=0,9	Tempo [g]	106,29	116,38	289,51	304,84	110	290	0,57	0,19
		Temperatura[°C]	29,42	29,45	2,19	2,16	29,43	2,19		
	λ=2,26	Tempo [g]	107,57	116,55	281,27	291,19	110	290	0,83	0,25
		Temperatura[°C]	29,16	29,19	2,30	2,25	29,17	2,25		
	λ=3,9	Tempo [g]	104,83	114,43	281,55	291,79	110	290	1,06	0,29
		Temperatura[°C]	28,92	28,96	2,36	2,29	28,94	2,29		
T=14°C	λ=0,9	Tempo [g]	107,29	117,23	288,58	303,31	110	290	0,48	0,28
		Temperatura[°C]	29,51	29,54	2,28	2,25	29,52	2,28		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,09	114,98	289,68	304,87	110	290	0,70	0,39
		Temperatura[°C]	29,28	29,32	2,39	2,35	29,30	2,39		
	λ=3,9	Tempo [g]	106,65	117,01	281,01	290,59	110	290	0,88	0,46
		Temperatura[°C]	29,10	29,14	2,53	2,46	29,12	2,46		
T=16°C	λ=0,9	Tempo [g]	107,80	118,01	287,81	299,96	110	290	0,40	0,37
		Temperatura[°C]	29,60	29,62	2,37	2,34	29,60	2,37		
	λ=2,26	Tempo [g]	105,93	116,56	283,21	291,63	110	290	0,57	0,51
		Temperatura[°C]	29,42	29,45	2,55	2,51	29,43	2,51		
	λ=3,9	Tempo [g]	103,13	111,37	289,79	303,33	110	290	0,71	0,64
		Temperatura[°C]	29,25	29,29	2,64	2,59	29,29	2,64		

TABELLA 12 BENCHMARK CASO 2 FALDA IN MOVIMENTO ΔH=0,1M, ΔT AL TRENTESIMO GIORNO DI FUNZIONAMENTO

Avendo seguito lo stesso metodo di analisi sia per il caso 1 che per il caso 2 si osserva nelle tabelle che i valori ottenuti, avendo la stessa lunghezza delle serpentine ma cambiando solo la disposizione, ovvero la ΔT subisce delle piccole variazioni tra un caso e l'altro. Dalle analisi effettuate si nota che la ΔT maggiore, anche se di pochissimo, è quella corrispondente al caso 2 e quindi nel caso di una disposizione delle serpentine a prevalenza orizzontale.

4.6 Quantificazione della potenza estraibile nei casi considerati

La potenza estraibile dai sistemi precedenti si valuta con la seguente formula

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

Dove:

- Q → potenza estraibile [kW]
- $\dot{m} = \rho_w v A$ → velocità di flusso massica $\left[{}^{kg}/_{s}\right]$
- c → calore specifico dell'acqua $\left[{}^{kJ}/_{kg\ K}\right]$
- ΔT → differenza di temperatura tra il fluido uscente e quello entrante nelle sonde geotermiche
-

In tabella i valori a cui si è fatto riferimento nel calcolo:

Valori per calcolo potenza estraibile	Valore	U.M.
ρ_w	997	[kg/m^3]
v	0,4	[m/s]
A	0,000314	[m^2]
c	4,186	[kJ/(kg K)]
m	0,1252	[kg/s]

TABELLA 13 VALORI PER IL CALCOLO DELLA POTENZA ESTRAIBILE

Più è grande la differenza di temperatura tra il fluido in ingresso e quello in uscita, più è grande il calore scambiato in accordo con il primo principio della Termodinamica.

Il concetto di Potenza scambiata per metro lineare di tubazione $\left({}^{W}/_{m}\right)$ serve per effettuare un'analisi costi-benefici ed è un criterio più solido. È possibile valutare quanti watt vengono scambiati per ogni metro di tubazione in base a ciascuna configurazione analizzata in precedenza. Si prendono i watt calcolati precedentemente e si divide per i metri della tubazione.

Si effettua un'analisi costi benefici. Considerando un costo di 2.7€ al metro lineare di tubazione si procede nella seguente maniera. Non si considerano costi aggiuntivi di manodopera e costi operativi di posa.

Di seguito vengono riportati i valori per ogni configurazione effettuata.

CASO 1 NON SATURO			ΔT [°C]	Q[kW]	Q[W]	W/m	W/m²	kWh	Ricavo €
T=12°C	λ=0,9	ESTATE	0,29	0,15	151,99	4,90	17,06	328,29	55,81
		INVERNO	0,14	0,07	73,37	2,37	8,23	158,48	26,94
	λ=2,26	ESTATE	0,43	0,23	225,36	7,27	25,29	486,77	82,75
		INVERNO	0,18	0,09	94,34	3,04	10,59	203,77	34,64
	λ=3,9	ESTATE	0,57	0,30	298,73	9,64	33,53	645,26	109,69
		INVERNO	0,20	0,10	104,82	3,38	11,76	226,41	38,49
T=14°C	λ=0,9	ESTATE	0,25	0,13	131,02	4,23	14,71	283,01	48,11
		INVERNO	0,19	0,10	99,58	3,21	11,18	215,09	36,56
	λ=2,26	ESTATE	0,37	0,19	193,91	6,26	21,76	418,85	71,20
		INVERNO	0,25	0,13	131,02	4,23	14,71	283,01	48,11
	λ=3,9	ESTATE	0,51	0,27	267,28	8,62	30,00	577,33	98,15
		INVERNO	0,33	0,17	172,95	5,58	19,41	373,57	63,51
T=16°C	λ=0,9	ESTATE	0,22	0,12	115,30	3,72	12,94	249,05	42,34
		INVERNO	0,22	0,12	115,30	3,72	12,94	249,05	42,34
	λ=2,26	ESTATE	0,30	0,16	157,23	5,07	17,65	339,61	57,73
		INVERNO	0,30	0,16	157,23	5,07	17,65	339,61	57,73
	λ=3,9	ESTATE	0,39	0,20	204,39	6,59	22,94	441,49	75,05
		INVERNO	0,36	0,19	188,67	6,09	21,18	407,53	69,28

TABELLA 14 BENCHMARK CASO 1 SATURO CON A_F=0,65, POTENZA ESTRAIBILE E RICAVO

In Tabella 14 vengono riportati i valori relativi al trentesimo giorno di funzionamento dell'impianto ottenuti per mezzo della modellazione eseguita nei paragrafi precedenti. Per ottenere quanto ricavo è possibile ottenere con l'impianto in esame sono necessari alcuni valori come la lunghezza delle tubazioni posizionati e il costo. Tutti i dati utili al calcolo vengono riportati in Tabella 15.

lunghezza tubazioni [m]	31
prezzo unitario [€]	2,7
Costo [€]	84
prezzo medio kWh [€]	0,17
Funzionamento continuo per 90 giorni [h]	2160

TABELLA 15 VALORI CARATTERISTICI PER IL CALCOLO DELL'EFFICIENZA DEL MODELLO BENCHMARK

CASO 2 NON SATURO			ΔT [°C]	Q[kW]	Q[W]	W/m	W/m²	kWh	Ricavo €
T=12°C	λ=0,9	ESTATE	0,30	0,16	157,23	5,07	17,65	339,61	57,73
		INVERNO	0,15	0,08	78,61	2,54	8,82	169,80	28,87
	λ=2,26	ESTATE	0,46	0,24	241,08	7,78	27,06	520,73	88,52
		INVERNO	0,20	0,10	104,82	3,38	11,76	226,41	38,49
	λ=3,9	ESTATE	0,60	0,31	314,45	10,14	35,29	679,22	115,47
		INVERNO	0,23	0,12	120,54	3,89	13,53	260,37	44,26
T=14°C	λ=0,9	ESTATE	0,27	0,14	141,50	4,56	15,88	305,65	51,96
		INVERNO	0,20	0,10	104,82	3,38	11,76	226,41	38,49
	λ=2,26	ESTATE	0,39	0,20	204,39	6,59	22,94	441,49	75,05
		INVERNO	0,26	0,14	136,26	4,40	15,29	294,33	50,04
	λ=3,9	ESTATE	0,51	0,27	267,28	8,62	30,00	577,33	98,15
		INVERNO	0,32	0,17	167,71	5,41	18,82	362,25	61,58
T=16°C	λ=0,9	ESTATE	0,22	0,12	115,30	3,72	12,94	249,05	42,34
		INVERNO	0,24	0,13	125,78	4,06	14,12	271,69	46,19
	λ=2,26	ESTATE	0,31	0,16	162,47	5,24	18,23	350,93	59,66
		INVERNO	0,32	0,17	167,71	5,41	18,82	362,25	61,58
	λ=3,9	ESTATE	0,42	0,22	220,12	7,10	24,70	475,45	80,83
		INVERNO	0,41	0,21	214,88	6,93	24,12	464,13	78,90

TABELLA 16 BENCHMARK CASO 2 SATURO CON Δ_F=0,65, POTENZA ESTRAIBILE E RICAVO

La Tabella 14 e la Tabella 16 sono quelle relative al caso saturo, rispettivamente si riferiscono la prima al caso 1 ovvero quello in cui le serpentine sono disposte a prevalenza verticale mentre la seconda è quella relativa alle serpentine disposte a prevalenza orizzontale e quindi il caso 2. Avendo in precedenza ottenuto dei valori diversi di ΔT tra il caso 1 e osservando dalla Tabella 15 che sia per il caso 1 che per il caso 2 la lunghezza delle serpentine è la stessa si deduce che una configurazione produce dei valori leggermente superiori. In questo caso, in presenza di terreno saturo risulta migliore la combinazione 2 e quindi quella in cui le tubazioni sono disposte a prevalenza orizzontale.

Ottenuti i valori relativi al caso saturo si passa al caso di terreno non saturo. Le analisi relative a questa condizione sono riportate in Tabella 17 e Tabella 18 dove si osserva subito che i valori della potenza estraibile e il ricavo sono inferiori rispetto ai valori della Tabella 14 e della Tabella 16. Risultato accettabile poiché già in partenza abbiamo dei valori di ΔT che sono inferiori rispetto al caso saturo. Nel caso non saturo quindi i valori sono stati calcolati alla stessa maniera del caso saturo mantenendo i dati mostrati nella Tabella 15 dato che la configurazione e quindi la lunghezza delle tubazioni non è stata variata.

CASO 1 λf=0			ΔT [°C]	Q[kW]	Q[W]	W/m	W/m^2	kWh	Ricavo €
T=12°C	λ=0,9	ESTATE	0,28	0,15	146,74	4,73	16,47	316,97	53,88
		INVERNO	0,13	0,07	68,13	2,20	7,65	147,16	25,02
	λ=2,26	ESTATE	0,42	0,22	220,12	7,10	24,70	475,45	80,83
		INVERNO	0,17	0,09	89,09	2,87	10,00	192,44	32,72
	λ=3,9	ESTATE	0,56	0,29	293,49	9,47	32,94	633,94	107,77
		INVERNO	0,19	0,10	99,58	3,21	11,18	215,09	36,56
T=14°C	λ=0,9	ESTATE	0,24	0,13	125,78	4,06	14,12	271,69	46,19
		INVERNO	0,17	0,09	89,09	2,87	10,00	192,44	32,72
	λ=2,26	ESTATE	0,36	0,19	188,67	6,09	21,18	407,53	69,28
		INVERNO	0,23	0,12	120,54	3,89	13,53	260,37	44,26
	λ=3,9	ESTATE	0,47	0,25	246,32	7,95	27,65	532,05	90,45
		INVERNO	0,27	0,14	141,50	4,56	15,88	305,65	51,96
T=16°C	λ=0,9	ESTATE	0,20	0,10	104,82	3,38	11,76	226,41	38,49
		INVERNO	0,21	0,11	110,06	3,55	12,35	237,73	40,41
	λ=2,26	ESTATE	0,29	0,15	151,99	4,90	17,06	328,29	55,81
		INVERNO	0,29	0,15	151,99	4,90	17,06	328,29	55,81
	λ=3,9	ESTATE	0,38	0,20	199,15	6,42	22,35	430,17	73,13
		INVERNO	0,35	0,18	183,43	5,92	20,59	396,21	67,36

TABELLA 17 BENCHMARK CASO 1 NON SATURO CON λ_F=0, POTENZA ESTRAIBILE E RICAVO

Anche qui il caso 2 (vedi Tabella 18) presenta dei valori maggiori rispetto al caso 1 (vedi Tabella 17). Coerentemente con quanto già detto prima i valori della potenza estraibile e del ricavo, avendo le tubazioni lo stesso costo, la stessa lunghezza e lo stesso periodo di funzionamento, sono leggermente maggiori nel caso 2 ovvero con la predisposizione

orizzontale delle tubazioni. Valore atteso poiché già nel paragrafo precedente si era osservato che il ΔT nel caso 2 fosse maggiore.

CASO 2 λf=0			ΔT [°C]	Q[kW]	Q[W]	W/m	W/m^2	kWh	Ricavo €
T=12°C	λ=0,9	ESTATE	0,29	0,15	151,99	4,90	17,06	328,29	55,81
		INVERNO	0,14	0,07	73,37	2,37	8,23	158,48	26,94
	λ=2,26	ESTATE	0,44	0,23	230,60	7,44	25,88	498,09	84,68
		INVERNO	0,19	0,10	99,58	3,21	11,18	215,09	36,56
	λ=3,9	ESTATE	0,58	0,30	303,97	9,81	34,12	656,58	111,62
		INVERNO	0,22	0,12	115,30	3,72	12,94	249,05	42,34
T=14°C	λ=0,9	ESTATE	0,25	0,13	131,02	4,23	14,71	283,01	48,11
		INVERNO	0,18	0,09	94,34	3,04	10,59	203,77	34,64
	λ=2,26	ESTATE	0,37	0,19	193,91	6,26	21,76	418,85	71,20
		INVERNO	0,25	0,13	131,02	4,23	14,71	283,01	48,11
	λ=3,9	ESTATE	0,49	0,26	256,80	8,28	28,82	554,69	94,30
		INVERNO	0,31	0,16	162,47	5,24	18,23	350,93	59,66
T=16°C	λ=0,9	ESTATE	0,21	0,11	110,06	3,55	12,35	237,73	40,41
		INVERNO	0,22	0,12	115,30	3,72	12,94	249,05	42,34
	λ=2,26	ESTATE	0,30	0,16	157,23	5,07	17,65	339,61	57,73
		INVERNO	0,31	0,16	162,47	5,24	18,23	350,93	59,66
	λ=3,9	ESTATE	0,41	0,21	214,88	6,93	24,12	464,13	78,90
		INVERNO	0,40	0,21	209,63	6,76	23,53	452,81	76,98

TABELLA 18 BENCHMARK CASO 2 NON SATURO CON λ_F=0, POTENZA ESTRAIBILE E RICAVO

A concludere si riportano i valori dell'ultimo caso studiato relativo al benchmark in cui viene supposto il movimento della falda. Avendo posto alle estremità del modello una differenza di carico idraulico di 10 cm è stata ottenuta una velocità di Darcy pari a 2,4 m/g. Essendo un modello si suppone che tale velocità sia plausibile anche se nei casi reali per un modello cosi superficiale è difficile raggiungere quella velocità di Darcy. Il valore cosi alto della velocità di Darcy è stato scelto anche per sottolineare di quanto migliora la potenza estraibile dallo stesso sistema studiato precedentemente. In Tabella 19 e Tabella 20 vengono riportati i risultati ottenuti. Anche in questo caso non cambiando le lunghezze delle serpentine e nemmeno i costi si otterrà, coerentemente con quanto detto prima, che il caso 2 risulta migliore del caso 1.

CASO 1 ΔH=0,1			ΔT [°C]	Q[kW]	Q[W]	W/m	W/m²	kWh	Ricavo €
T=12°C	λ=0,9	ESTATE	0,61	0,32	319,69	10,31	35,88	690,54	117,39
		INVERNO	0,19	0,10	99,58	3,21	11,18	215,09	36,56
	λ=2,26	ESTATE	0,82	0,43	429,75	13,86	48,23	928,26	157,80
		INVERNO	0,23	0,12	120,54	3,89	13,53	260,37	44,26
	λ=3,9	ESTATE	1,01	0,53	529,33	17,08	59,41	1143,35	194,37
		INVERNO	0,25	0,13	131,02	4,23	14,71	283,01	48,11
T=14°C	λ=0,9	ESTATE	0,51	0,27	267,28	8,62	30,00	577,33	98,15
		INVERNO	0,30	0,16	157,23	5,07	17,65	339,61	57,73
	λ=2,26	ESTATE	0,68	0,36	356,38	11,50	40,00	769,78	130,86
		INVERNO	0,37	0,19	193,91	6,26	21,76	418,85	71,20
	λ=3,9	ESTATE	0,84	0,44	440,23	14,20	49,41	950,90	161,65
		INVERNO	0,43	0,23	225,36	7,27	25,29	486,77	82,75
T=16°C	λ=0,9	ESTATE	0,41	0,21	214,88	6,93	24,12	464,13	78,90
		INVERNO	0,39	0,20	204,39	6,59	22,94	441,49	75,05
	λ=2,26	ESTATE	0,55	0,29	288,25	9,30	32,35	622,62	105,84
		INVERNO	0,50	0,26	262,04	8,45	29,41	566,01	96,22
	λ=3,9	ESTATE	0,67	0,35	351,14	11,33	39,41	758,46	128,94
		INVERNO	0,60	0,31	314,45	10,14	35,29	679,22	115,47

TABELLA 19 BENCHMARK CASO 1 FALDA IN MOVIMENTO ΔH=0,1M, POTENZA ESTRAIBILE E RICAVO

I valori mostrati in Tabella 19 e Tabella 20 sono alti e potrebbero generare una potenza estraibile non certamente da trascurare, tuttavia va sottolineato che la falda in movimento si riferisce a valori alti quindi poco credibili. Avendo analizzato questo caso con dei valori del genere è stato possibile osservare come e di quanto migliora l'impianto. La differenza minima che si instaura tra il caso saturo e il caso non saturo viene messa a confronto con un eventuale caso di falda in movimento con una velocità di Darcy pari a 2,4 m/g.

CASO 2 ΔH=0,1			ΔT [°C]	Q[kW]	Q[W]	W/m	W/m^2	kWh	Ricavo €
T=12°C	λ=0,9	ESTATE	0,57	0,30	298,73	9,64	33,53	645,26	109,69
		INVERNO	0,19	0,10	99,58	3,21	11,18	215,09	36,56
	λ=2,26	ESTATE	0,83	0,43	434,99	14,03	48,82	939,58	159,73
		INVERNO	0,25	0,13	131,02	4,23	14,71	283,01	48,11
	λ=3,9	ESTATE	1,06	0,56	555,53	17,92	62,35	1199,95	203,99
		INVERNO	0,29	0,15	151,99	4,90	17,06	328,29	55,81
T=14°C	λ=0,9	ESTATE	0,48	0,25	251,56	8,11	28,23	543,37	92,37
		INVERNO	0,28	0,15	146,74	4,73	16,47	316,97	53,88
	λ=2,26	ESTATE	0,70	0,37	366,86	11,83	41,17	792,42	134,71
		INVERNO	0,39	0,20	204,39	6,59	22,94	441,49	75,05
	λ=3,9	ESTATE	0,88	0,46	461,20	14,88	51,76	996,18	169,35
		INVERNO	0,46	0,24	241,08	7,78	27,06	520,73	88,52
T=16°C	λ=0,9	ESTATE	0,40	0,21	209,63	6,76	23,53	452,81	76,98
		INVERNO	0,37	0,19	193,91	6,26	21,76	418,85	71,20
	λ=2,26	ESTATE	0,57	0,30	298,73	9,64	33,53	645,26	109,69
		INVERNO	0,51	0,27	267,28	8,62	30,00	577,33	98,15
	λ=3,9	ESTATE	0,71	0,37	372,10	12,00	41,76	803,74	136,64
		INVERNO	0,64	0,34	335,42	10,82	37,64	724,50	123,16

TABELLA 20 BENCHMARK CASO 2 FALDA IN MOVIMENTO ΔH=0,1M, POTENZA ESTRAIBILE E RICAVO

CAPITOLO 5

Il campo sperimentale dell'Energy Center

L'Energy Center è un investimento di 20 milioni di euro, sostenuto in gran parte con le risorse della programmazione 2007-2013 dei fondi Fesr (14 milioni) erogati dalla Regione Piemonte e per la restante parte da Compagnia di San Paolo e Fondazione CRT.

La superficie impiegata per la costruzione dell'Energy Center è di settemila metri quadrati totali, di cui 5mila destinati al centro e 2mila 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. L'energia sotto il punto di vista della sostenibilità, della riduzione del consumo e dell'innovazione. L'obbiettivo è quello di promuovere la creazione di nuove attività imprenditoriali nel settore dell'energia, lavorando sulla crescita delle conoscenze nel settore e favorendo la produzione di innovazioni grazie alla sinergia e allo scambio di informazioni tra i diversi attori che svolgeranno la loro attività all'interno della struttura.

FIGURA 72 ENERGY CENTER

I concetti base sono l'innovazione, la formazione e l'industria attraverso una connessione stretta e diretta con le politiche energetiche sia a livello nazionale che europeo. Il centro sarà gestito dal Politecnico di Torino. L'Energy Center sarà l'occasione per costruire una data-house di supporto alle decisioni politiche e alla creazione di nuove iniziative imprenditoriali. Si pone dunque come una casa comune per soggetti pubblici e privati.

La collocazione della struttura non è casuale, ma è stata volutamente scelta per rispondere all'esigenza di essere collocata in un contesto già fertile e frutto di ricerca e innovazione. La vicinanza del campus universitario Politecnico di Torino, attraverso i dipartimenti universitari, incubatori di imprese e punti di aggregazione convivono tra il pubblico e il privato e negli ultimi 15 anni sono nate 180 nuove imprese. 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.

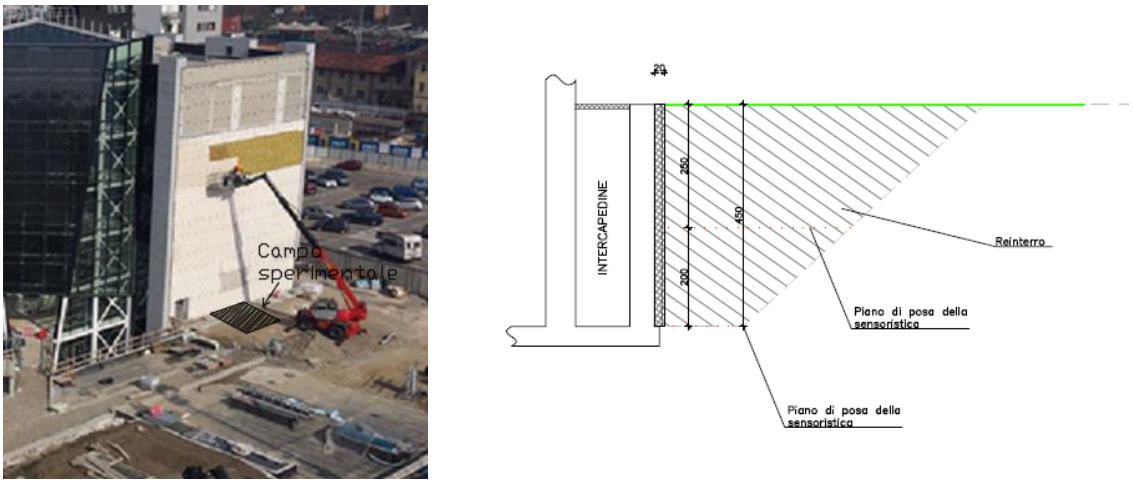


FIGURA 73 CAMPO SPERIMENTALE DELL'ENERGY CENTER CONTESTO GENERALE E SEZIONE

In Figura 73 viene rappresentato il campo sperimentale dell'Energy Center, oggetto del nostro studio. La rappresentazione raffigura un particolare della struttura dell'Energy Center dove andranno applicate le serpentine ed è possibile osservare la sezione tra il muro contro terra e le tubazioni. Nella stessa figura viene riportato anche il posizionamento del campo sperimentale nel complesso della struttura.

5.1 Generazione del modello numerico

I passi per la generazione del modello sono analoghi a quelli descritti per le analisi del capitolo 4. Cambiano solo le configurazioni di disposizione delle serpentine, riferite al campo sperimentale in fase di realizzazione alla data del presente studio. Le dimensioni del modello sono determinate dalla configurazione dei pannelli sui quali vengono fissate le serpentine. Particolare attenzione è stata posta sulla distanza tra il bordo del modello e le serpentine stesse, tenendo in considerazione che i pannelli contenenti le tubazioni vengono posati in maniera modulare. Una posa non corretta o una distanza troppo ravvicinata potrebbe influenzare il corretto funzionamento dell'impianto in esame.

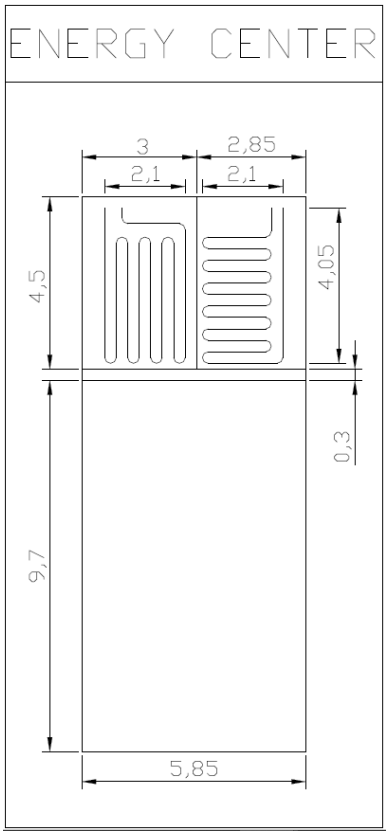


FIGURA 74 GEOMETRIA DEL MODELLO ENERGY CENTER CASO 1 A SINISTRA E CASO 2 A DESTRA

Per la realizzazione del modello reale di studio vengono seguite le stesse modalità operative di come si è lavorato nel capitolo precedente sul caso del benchmark. In questo caso la differenza è che la configurazione della posizione delle serpentine viene fornita ed è leggermente diversa rispetto al caso precedentemente studiato. Il primo passo, come già descritto precedentemente, è stato quello di disegnare la configurazione su AutoCad come riportato in Figura 74. Ottenuto il modello dwg si è passato a lavorare sul software Feflow dove una volta eseguita la "mesh" più opportuna (Figura 75) si è passato alla generazione del modello 3D (Figura 77)

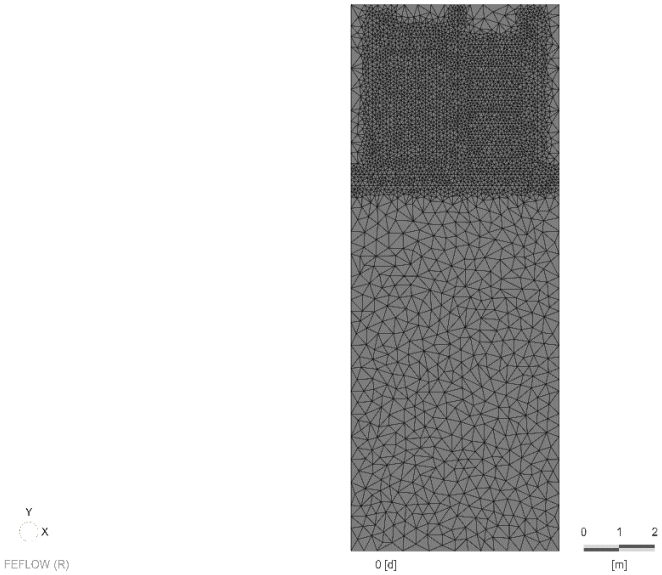


FIGURA 75 ENERGY CENTER GENERAZIONE DELLA MESH

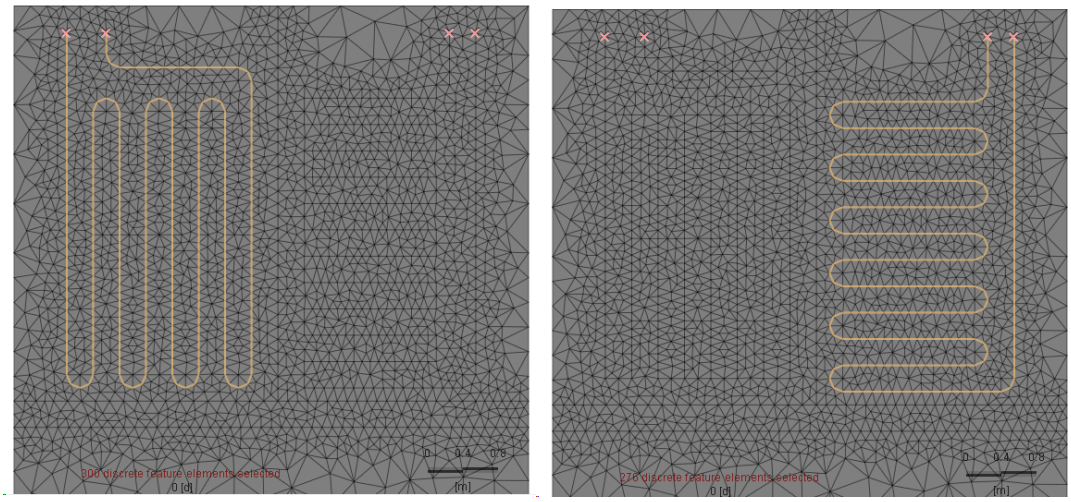


FIGURA 76 PARTICOLARE DELLE DISCRETE FEATURES

In Figura 76 viene rappresentata la "mesh" eseguita e in particolare l'attenzione è stata focalizzata sulla "mesh" intorno alle discrete features, ovvero intorno alle serpentine dentro le quali passa il fluido termovettore.

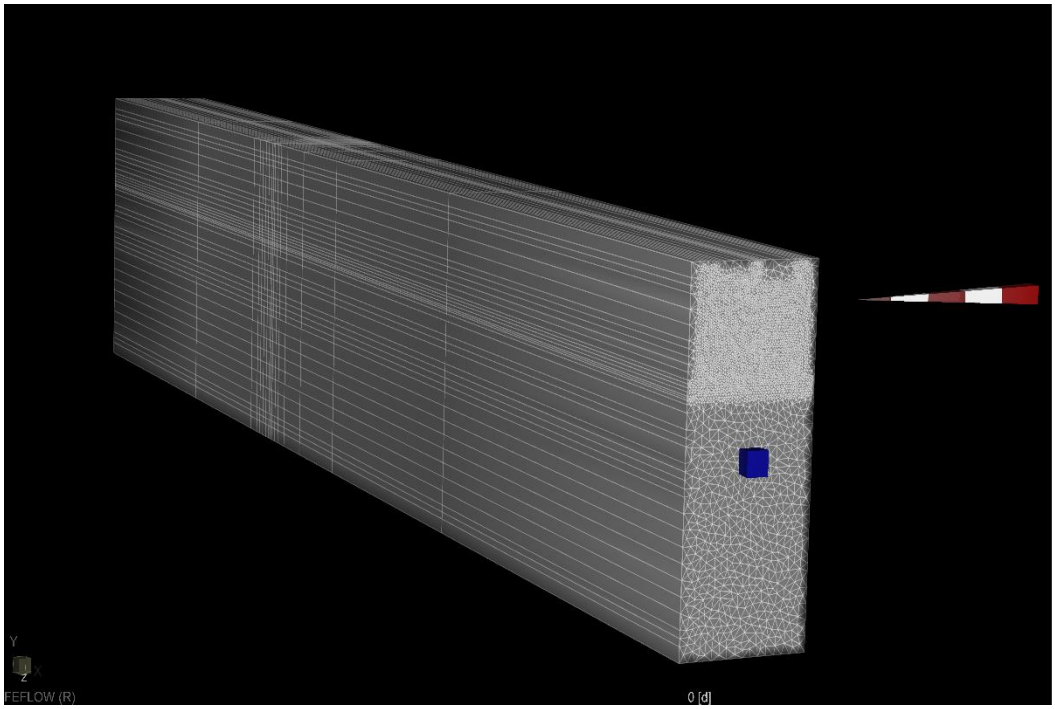


FIGURA 77 ENERGY CENTER VISTA 3D

Ottenuto il modello 3D generato con lo stesso numero di "layers" e "slices" del modello benchmark le condizioni iniziali e al contorno sono le stesse che sono state imposte per il modello benchmark.

5.2 Parametri dei materiali

I parametri del terreno, del muro, dell'aria e delle tubazioni sono quelli già indicati in precedenza e vengono riportati in Tabella 21, Tabella 22, Tabella 23 e Tabella 24. In questo caso sapendo dove è posizionata la struttura, ovvero nella città di Torino, e conoscendo la conducibilità termica del fluido e quella del solido del terreno, non vengono più eseguite una serie di simulazioni ma solo quella corrispondente al caso reale (come riportato in Tabella 25). A priori, sapendo la posizione della struttura, sono noti anche i valori relativi alla temperatura, sul dominio inferiore a 15m di profondità si ha una temperatura costante durante tutto l'anno di 14°C mentre la temperatura esterna dell'aria è quella riportata e già utilizzata per il modello benchmark relativa alla città di Torino (Figura 37 e Figura 38).

Parametro	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica orizzontale ($k_x = k_z$)	$4.15*10^{-3}$	[m/s]
Conducibilità idraulica verticale (k_y)	$2.075*10^{-4}$	[m/s]
Capacità termica del fluido ($\rho_w C_w$)	4.2	[MJ/m^3/K]
Capacità termica del solido ($\rho_s C_s$)	2.0	[MJ/m^3/K]
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	[m^{-1}]
Porosità (n)	0.25	[-]
Dispersione termica longitudinale (α_L)	3.1	[m]
Dispersione termica trasversale (α_T)	0.3	[m]

TABELLA 21 PARAMETRI DEL TERRENO

I parametri idraulici, idro-dispersivi e termici dell'acquifero sono il risultato di prove di pompaggio, con monitoraggio della temperatura, eseguite per tre mesi consecutivi (Barla et al. 2013) come indicato in Tabella 21.

Parametro	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica isotropa ($k_x = k_z = k_y$)	10^{-2}	[m/s]
Capacità termica del fluido ($\rho_w C_w$)	10^{-3}	[MJ/m^3/K]
Coducibilità termica del fluido (λ_w)	0.53	[W/m/K]
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	[m^{-1}]
Porosità (n)	1	[-]
Dispersione termica longitudinale (α_L)	5	[m]
Dispersione termica trasversale (α_T)	0.5	[m]

TABELLA 22 PARAMETRI DELL'ARIA

In Tabella 22 sono riportati i parametri relativi all'aria. Si fa riferimento all'aria nella porzione dove viene realizzato il parcheggio o la struttura sotterranea.

Parametro	Valore	U.M.
Conducibilità idraulica isotropa ($k_x = k_z = k_y$)	10^{-16}	[m/s]
Capacità termica del solido ($\rho_s C_s$)	1.05	[MJ/m^3/K]
Coducibilità termica del solido (λ_s)	1.12	[W/m/K]
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	[m^{-1}]
Porosità (n)	0	[-]

TABELLA 23 PARAMETRI DEL CALCESTRUZZO

La Tabella 23 è quella relativa ai parametri del calcestruzzo. Queste proprietà verranno utilizzate per assegnare le caratteristiche a quella porzione che si interpone tra il terreno e il parcheggio.

Parametro	Valore	U.M.
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	[m^{-1}]
Capacità termica del fluido ($\rho_w C_w$)	4.2	[MJ/m^3/K]
Coducibilità termica del fluido (λ_w)	0.65	[W/m/K]
Area trasversale	3,14	[cm^2]
Raggio idraulico	0.5	[cm]

TABELLA 24 PARAMETRI DELLE TUBAZIONI

Parametri terreno	Valore	U.M.
Conducibilità termica del fluido (λ_w)	0.65	[W/m/K]
Conducibilità termica del solido (λ_s)	2.8	[W/m/K]

TABELLA 25 CONDUCIBILITÀ TERMICA TERRENO (MODELLO REALE DELL'ENERGY CENTER)

In Tabella 24 sono presenti i parametri da assegnare alle tubazioni nelle quali scorre il fluido termovettore mentre la Tabella 25 riporta i valori certi della conducibilità termica del terreno. Conoscendo la zona in cui è stato edificato il caso di studio reale ovvero l'Energy Center, i parametri riferiti alla conducibilità termica del terreno sia quella fluida che quella solida sono noti a priori.

5.3 Condizioni al contorno e condizioni iniziali

La temperatura media annuale di Torino, a una profondità di 15 m dal piano campagna, è di 14°C, pertanto è stata assegnata una temperatura ai punti inferiori del dominio, quelli corrispondenti al limite inferiore del terreno, pari a 14°C. Contrariamente però il limite superiore, essendo a contatto con l'atmosfera, presenta delle variazioni sia giornaliere che mensili. Ai punti relativi al bordo superiore, è stata applicata una temperatura ciclica attraverso una "time series" la quale rappresenta l'andamento delle temperature annuali. Sono stati simulati 10 anni senza l'attivazione delle serpentine e si è osservato l'andamento delle temperature nel terreno. Questa simulazione ha permesso di osservare come e a che profondità il terreno viene influenzato dalle temperature cicliche esterne.

Condizioni al contorno di fondamentale importanza sono quelle inserite nei punti di ingresso e di uscita del fluido. È stata utilizzata la condizione "Fluid-flux BC" sul software FEFLOW per impostare la velocità del fluido all'interno delle sonde geotermiche. In ingresso la velocità assegnata è pari a -0.4 $^{m}/_{s}$ e in uscita 0.4 $^{m}/_{s}$. Il segno negativo indica il fluido in entrata mentre quello positivo il fluido in uscita al dominio.

Un'altra condizione che viene imposta al sistema è quella relativa alla temperatura sul fluido d'ingresso nelle serpentine. Questa condizione viene imposta attraverso il comando "Temperature BC" e viene assegnata sul singolo nodo. Questa temperatura, diversamente dal flusso del fluido che rimane sempre lo stesso, cambia in funzione della stagione in cui stiamo operando. Nelle stagioni invernali sarà uguale a 2°C mentre in quelle estive pari a 30°C.

5.3.1 Simulazione temperatura del terreno prima dell'attivazione delle serpentine

Come accennato nei capitoli precedenti, a seguito delle analisi eseguite sulle temperature del terreno a Torino, a una profondità di 15 m la temperatura del terreno può essere assunta costante e pari a 14°C (Barla et al., 2015). Dall'altro lato però, sulla superfice superiore, persiste il problema legato alla variazione stagionale della temperatura. Per ovviare a questo fattore variabile, verranno simulati 10 anni di inattività delle serpentine con l'obiettivo di studiare come si attesta l'andamento della temperatura nel terreno. Si procede con la definizione della "time series" annuale che agisce sulla superficie superiore, a contatto con l'aria.

La zona di riferimento è quella di Torino, pertanto accedendo sul sito dell'Arpa sono stati selezionati i valori delle temperature annuali di Torino. L'anno di riferimento è il 2017, dal momento che i dati del 2018 non sono completi. Il riferimento è la temperatura media mensile espressa in gradi centigradi. Il minimo si verifica nel mese di gennaio dove la media del minimo è di 1.7°C, mentre il massimo è raggiunto nei mesi estivi di luglio e agosto con valori medi di 25.3°C. Nei mesi invernali sarà massima l'efficienza del riscaldamento mentre nei mesi estivi il raffreddamento. La pompa di calore per ipotesi non verrà utilizzata nei periodi primaverili e

autunnali poiché in quei periodi dentro l'edificio si suppone una temperatura "vivibile". L'andamento della temperatura annuale a Torino è rappresentato in Figura 37 e Figura 38.

È stata creata la "time series" sul programma FEFLOW. Questa verrà applicata sui nodi superiori del modello e simulerà la temperatura dell'aria. La "time series" è una funzione ciclica con un'interpolazione curvilinea di tipo Akima1.

Nel caso del modello reale di studio, come detto in precedenza, i parametri da assegnare sono noti poiché si riferiscono alla città di Torino e quindi l'attivazione del terreno viene eseguita solo una volta. Anche in questo caso le condizioni iniziali e al contorno non cambiano ma cambia solo la geometria di posizionamento delle serpentine. L'attivazione del terreno verrà effettuata solo una volta poiché valida per entrambi i casi.

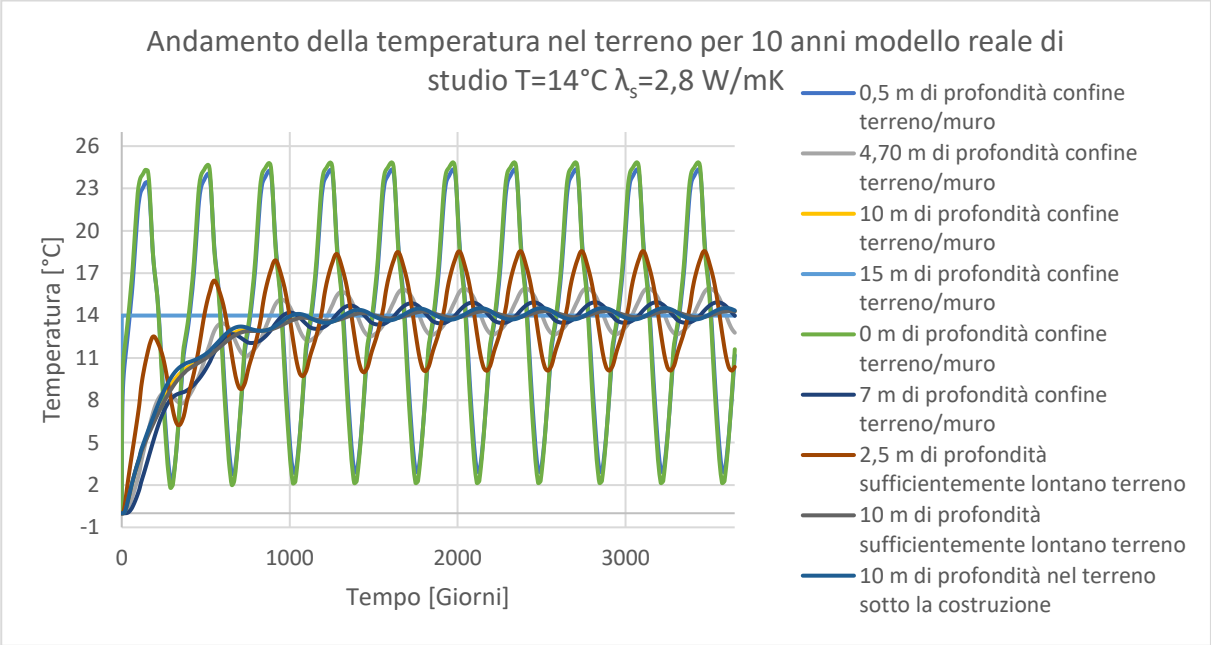


FIGURA 78 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=14°C E λ_S=2,8 W/MK

In questo caso tutte le proprietà sono già state assegnate e poiché la conducibilità solida del terreno λ_s=2,8 W/mK si osserva dal grafico in Figura 78 che il raggiungimento della temperatura ciclicamente stabile avviene dopo 1310 giorni ovvero dopo circa 3,5 anni. Valore conforme alle analisi effettuate con il modello del Benchmark e quindi compreso tra i 4 anni del λ_s=2,26 W/mK e i 2 anni del λ_s=3,9 W/mK.

5.4 Attivazione delle sonde geotermiche

Il modello reale, come descritto in precedenza, si basa solo sulla modellazione delle due disposizioni possibili. Questo è dovuto al fatto che viene simulato nelle condizioni reali per la città di Torino, pertanto la temperatura di riferimento è quella presa dal sito dell'Arpa Piemonte e la conducibilità solida e fluida del terreno sono quelle effettivamente ricavate da prove in situ.

Proseguendo sulla stessa linea del capitolo precedente, i grafici su cui vengono plottati i risultati sono della stessa configurazione di quelli già visti in precedenza. La suddivisione avviene tra funzionamento estivo e quello invernale, dove rispettivamente la temperatura del fluido termovettore in ingresso è pari a 30°C e 2°C. I risultati si riferiscono a due analisi eseguite in maniera diversa. Inizialmente vengono attivate sia la configurazione 1 che la configurazione 2 contemporaneamente mentre successivamente viene attivata solo la configurazione 1 e poi solo la configurazione 2 in modo da poter osservare se si influenzano tra di loro o se lavorano in maniera indipendentemente. Per spiegare l'andamento delle temperature in uscita del fluido termovettore vengono riportate anche le temperature esterne dell'aria.

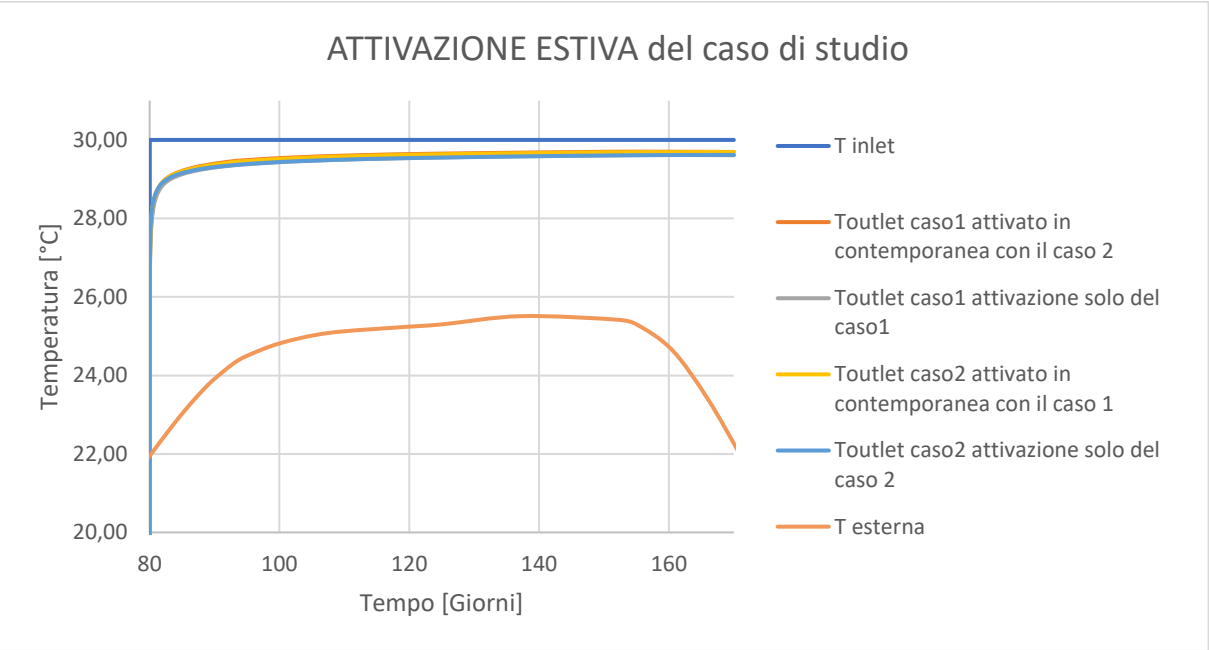


FIGURA 79 ATTIVAZIONE ESTIVA DEL CASO DI STUDIO CON TEMPERATURA ESTERNA

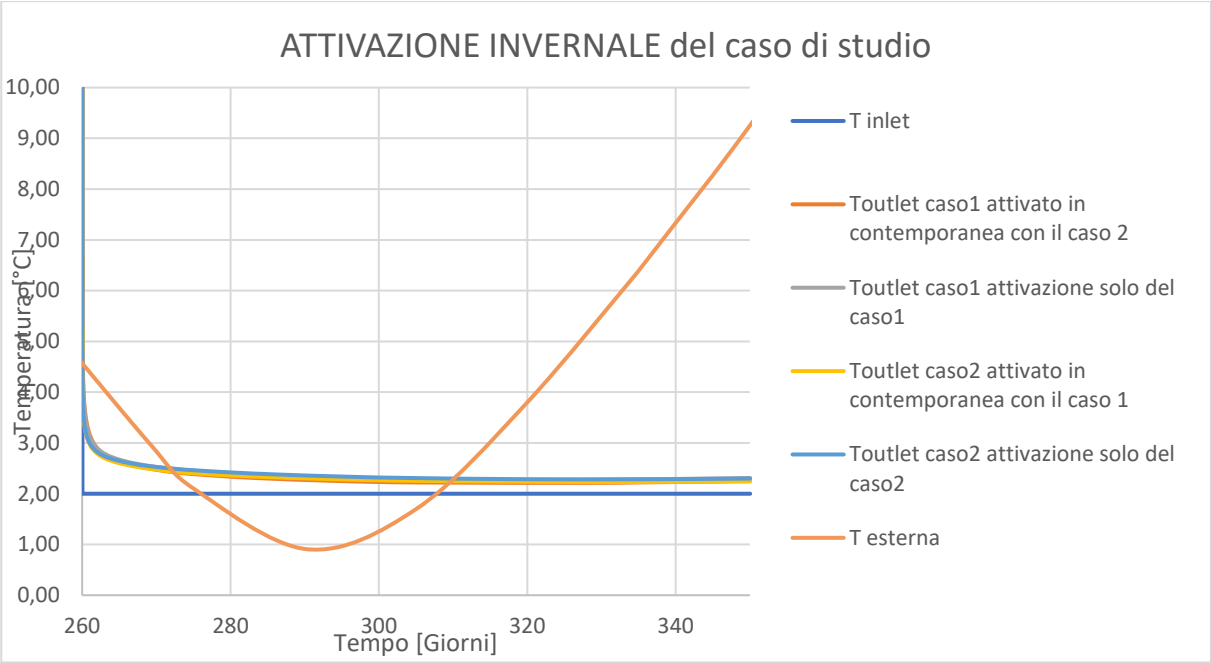


FIGURA 80 ATTIVAZIONE INVERNALE DEL CASO DI STUDIO CON TEMPERATURA ESTERNA

Per permettere una maggiore leggibilità dei grafici e per riuscire a cogliere la differenza di ΔT che si crea in base a come vengono attivate le serpentine si riportano i grafici in Figura 81 e Figura 82 dove l'intervallo lungo y è stato ristretto per poter distinguere e sottolineare la differenza che si instaura.

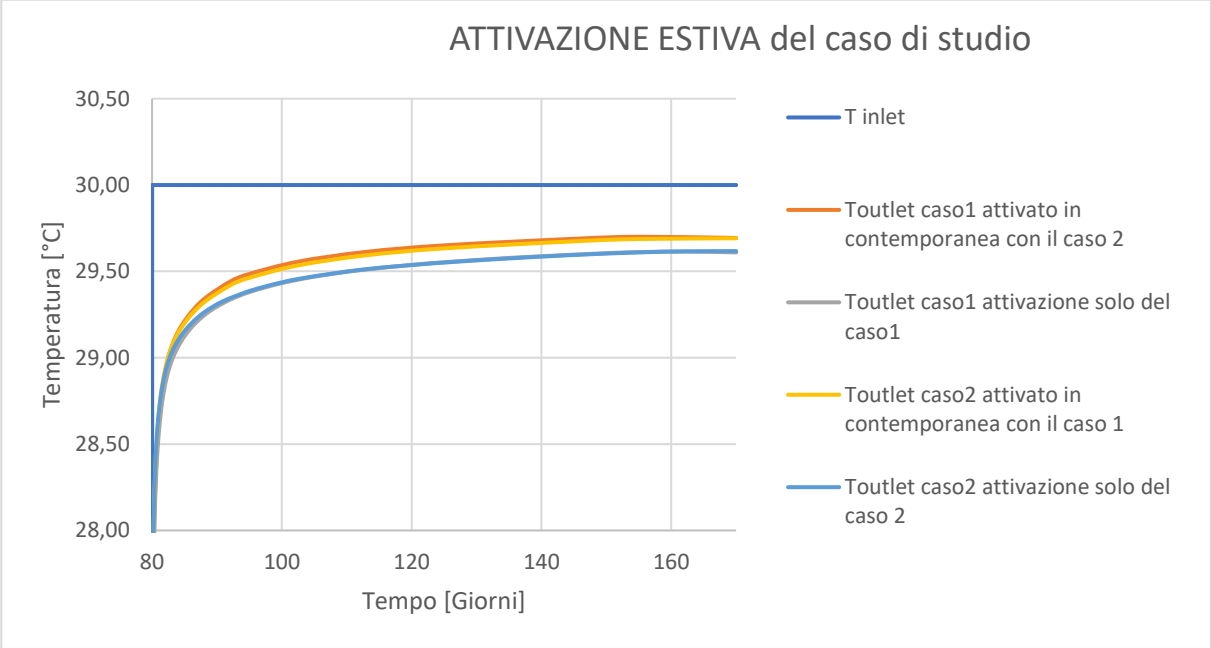


FIGURA 81 ATTIVAZIONE ESTIVA DEL CASO DI STUDIO

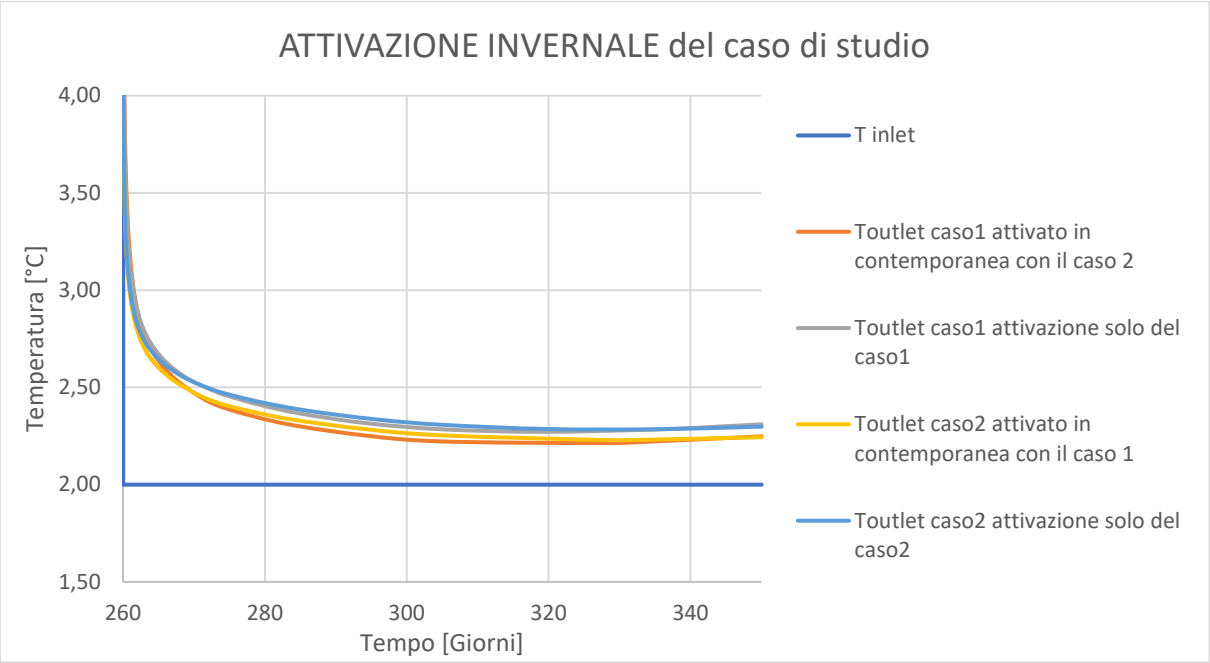


FIGURA 82 ATTIVAZIONE INVERNALE DEL CASO DI STUDIO

Analogamente al capitolo precedente si riportano i valori del ΔT relativi al trentesimo giorno di funzionamento dell'impianto andando così a porsi in una condizione dove il sistema entra a funzionare a pieno regime.

	CASO REALE DI STUDIO CON T=14 e λ=2,8							
	ATTIVAZIONE SOLO CASO 1		ATTIVAZIONE SOLO CASO 2		ATTIVAZIONE CASO 1 + CASO 2			
					CASO 1		CASO 2	
ESTATE	104,84	29,53	102,96	29,51	102,45	29,56	102,45	29,53
	111,96	29,58	112,62	29,57	112,71	29,61	112,71	29,59
INVERNO	285,07	2,35	286,22	2,36	283,19	2,31	283,19	2,34
	294,31	2,28	295,67	2,30	294,39	2,25	294,39	2,28
VALORI MEDIE ESTATE	110	29,57	110	29,56	110	29,60	110	29,59
VALORI MEDIE INVERNO	290	2,30	290	2,33	290	2,27	290	2,30
ΔT ESTATE	0,43		0,44		0,40		0,41	
ΔT INVERNO	0,30		0,33		0,27		0,30	

TABELLA 26 CASO REALE DI STUDIO VALORI DI RIFERIMENTO RELATIVI AL TRENTESIMO GIORNO DI FUNZIONAMENTO

In Tabella 26 sono riportati i valori relativi al trentesimo giorno che successivamente verranno utilizzati per ricavare l'efficienza in termini di energia dell'impianto.

5.5 Quantificazione della potenza estraibile nei casi considerati

La potenza estraibile dai sistemi come visto in precedenza si valuta con la seguente formula

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

Dove:

- Q → potenza estraibile [kW]
- $\dot{m} = \rho_w v A$ → velocità di flusso massica $\left[{}^{kg}/_{s}\right]$
- c → calore specifico dell'acqua $\left[{}^{kJ}/_{kg\ K}\right]$
- ΔT → differenza di temperatura tra il fluido uscente e quello entrante nelle sonde geotermiche
-

In tabella i valori a cui si è fatto riferimento nel calcolo:

Valori per calcolo potenza estraibile	Valore	U.M.
ρ_w	997	[kg/m^3]
v	0,4	[m/s]
A	0,000314	[m^2]
c	4,186	[kJ/(kg K)]
m	0,1252	[kg/s]

TABELLA 27 VALORI PER IL CALCOLO DELLA POTENZA ESTRAIBILE

Più è grande la differenza di temperatura tra il fluido in ingresso e quello in uscita, più è grande il calore scambiato in accordo con il primo principio della Termodinamica.

Il concetto di Potenza scambiata per metro lineare di tubazione $\left({}^{W}/_{m}\right)$ serve per effettuare un'analisi costi-benefici ed è un criterio più solido. È possibile valutare quanti watt vengono scambiati per ogni metro di tubazione in base a ciascuna configurazione analizzata in precedenza. Si prendono i watt calcolati precedentemente e si divide per i metri della tubazione.

Si effettua un'analisi costi benefici. Considerando un costo di 2.7€ al metro lineare di tubazione si procede nella seguente maniera. Non si considerano costi aggiuntivi di manodopera e costi operativi di posa.

Nel modello reale di studio riferito all'Energy Center, i valori di questa modellazione sono riportati in Tabella 28 e fanno riferimento al caso precedentemente studiato. I valori se si

osserva attentamente e come verrà successivamente trattato nell'ultimo capitolo si pongono all'interno delle modellazioni eseguite dal modello benchmark.

Caso reale di studio			ΔT [°C]	Q[kW]	Q[W]	W/m	W/m²	kWh	Ricavo €
SOLO CASO 1		ESTATE	0,43	0,23	225,36	7,51	25,32	486,77	82,75
		INVERNO	0,30	0,16	157,23	5,24	17,67	339,61	57,73
SOLO CASO 2		ESTATE	0,44	0,23	230,60	7,69	25,91	498,09	84,68
		INVERNO	0,33	0,17	172,95	5,76	19,43	373,57	63,51
ATTIVAZIONE CASO 1+2	CASO 1	ESTATE	0,40	0,21	209,63	6,99	23,55	452,81	76,98
		INVERNO	0,27	0,14	141,50	4,72	15,90	305,65	51,96
	CASO 2	ESTATE	0,41	0,21	214,88	7,16	24,14	464,13	78,90
		INVERNO	0,30	0,16	157,23	5,24	17,67	339,61	57,73

TABELLA 28 CASO REALE DI STUDIO POTENZA ESTRAIBILE E RICAVO

Per poter effettuare i calcoli della Tabella 28 sono stati utilizzati i valori della Tabella 29 valori che oltre la lunghezza delle tubazioni sono uguali al caso del modello benchmark.

lunghezza tubazioni [m]	30
prezzo unitario [€]	2,7
Costo [€]	84
prezzo medio kWh [€]	0,17
Funzionamento continuo per 90 giorni [h]	2160

TABELLA 29 VALORI CARATTERISTICI PER IL CALCOLO DELL'EFFICIENZA DEL MODELLO BENCHMARK

CAPITOLO 6

Conclusioni

In questo lavoro l'obiettivo è stato quello di studiare se l'idea di attivare termicamente i muri contro terra funziona e se la potenza estraibile, fornita dagli impianti in esame, fornisce un'aliquota soddisfacente. L'idea base è stata quella di applicare l'impianto sul campo sperimentale di studio ma come prologo del lavoro sono stati eseguite delle analisi parametriche su modelli simili. Partendo dalle geometrie sono state eseguite delle modulazioni su alcuni parametri come la temperatura e la conducibilità andando a studiare l'efficienza dell'impianto in funzione dei parametri assegnati. Successivamente è stato affrontato il caso reale di studio, situato a Torino, con le configurazioni già predisposte. È stato possibile per ogni simulazione ricavare le ΔT e successivamente calcolare la potenza estraibile dell'impianto. Le simulazioni sono state eseguite con il codice di calcolo FEFLOW.

Le analisi effettuate nei capitoli precedenti hanno dimostrato che adottare un impianto di questo genere è una soluzione efficace e redditizia. I risultati ottenuti sono soddisfacenti e garantiscono un ritorno dell'investimento nel lungo periodo. Altro fattore importante che va osservato è come i valori attesi del modello reale di studio vanno a collocarsi negli intervalli ottenuti dai modelli del benchmark.

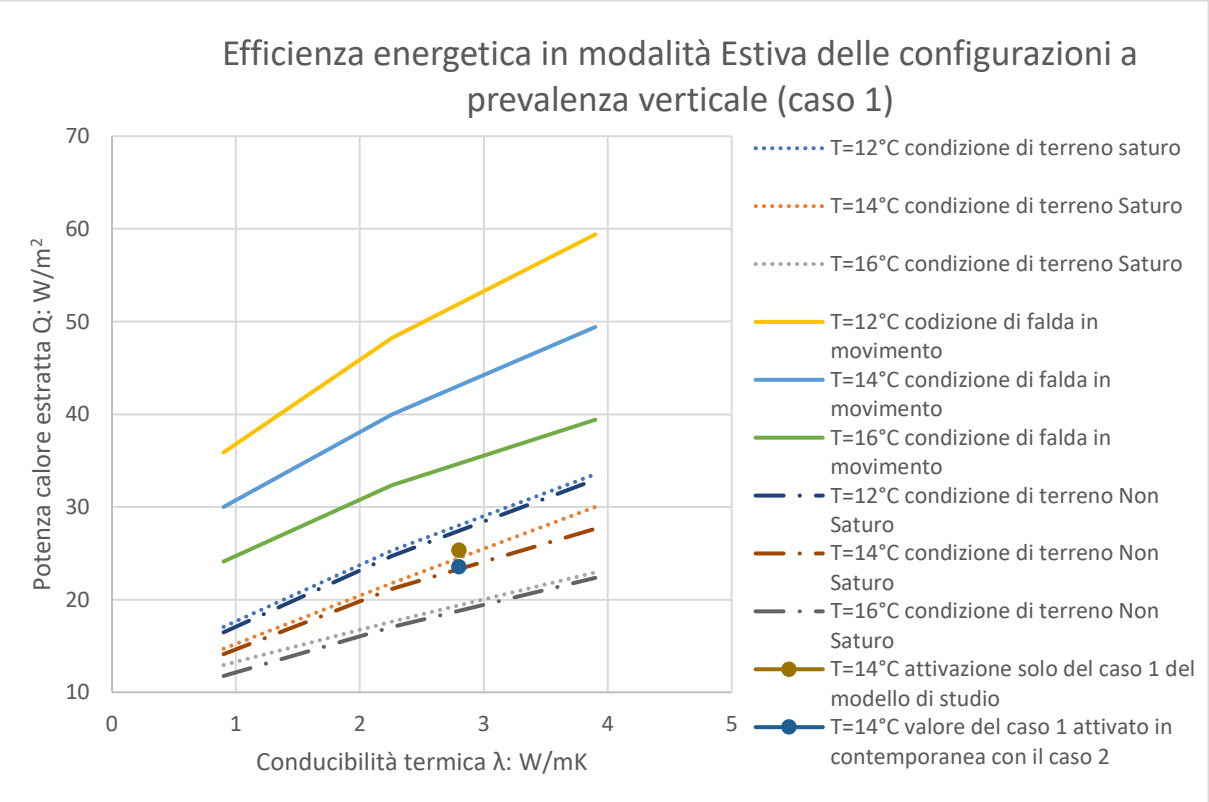


FIGURA 83 EFFICIENZA ENERGETICA IN MODALITÀ ESTIVA DELLE CONFIGURAZIONI A PREVALENZA VERTICALE

Per avere una lettura più facile delle conclusioni ricavate da questo lavoro si osservano la Figura 83 e la Figura 84, dove sono stati messi a confronto i vari modelli che sono stati studiati. Il grafico riporta la potenza del calore estratto in funzione della conducibilità termica del solido. Sulla leggenda sono indicate tutte le simulazioni che sono state eseguite.

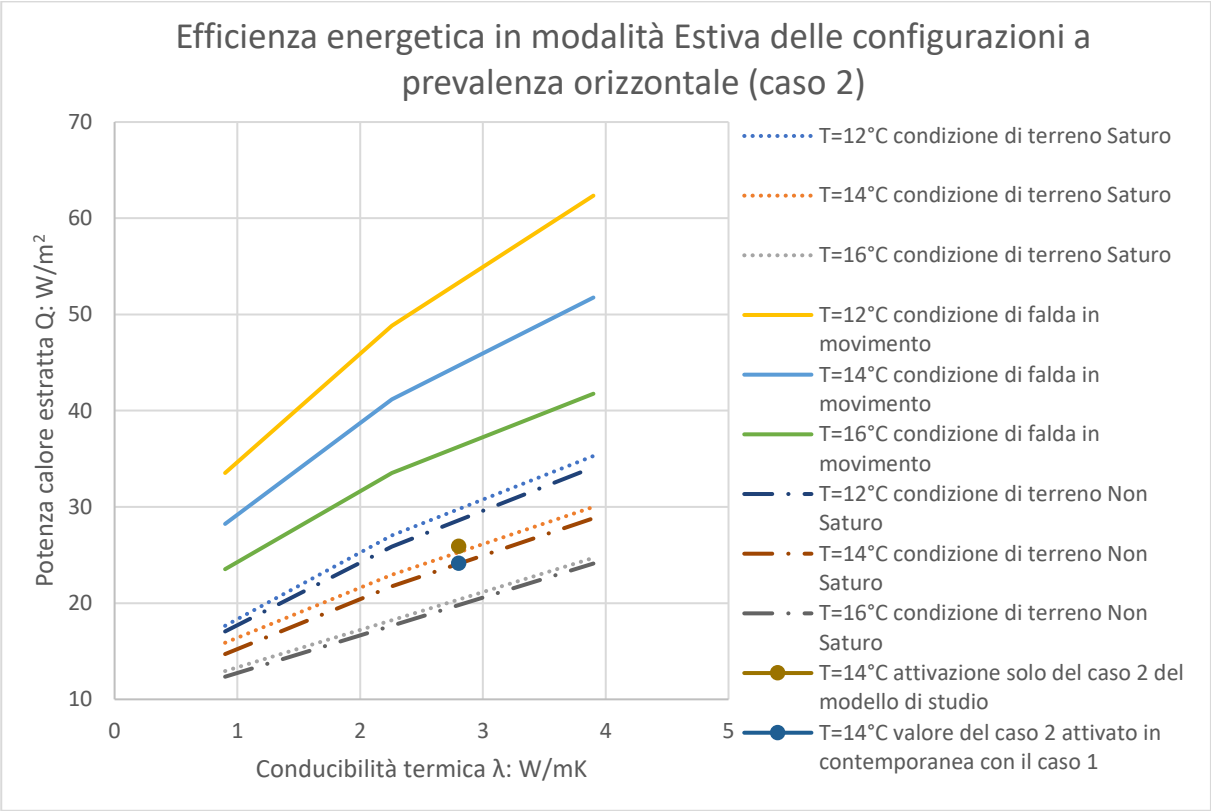


FIGURA 84 EFFICIENZA ENERGETICA IN MODALITÀ ESTIVA DELLE CONFIGURAZIONI A PREVALENZA ORIZZONTALE

In Figura 83 si leggono i valori riferiti alla disposizione a prevalenza verticale delle serpentine mentre in Figura 84 sono quelli relativi alla disposizione a prevalenza orizzontale delle serpentine. Entrambi le figure si riferiscono al caso estivo e vanno letti in funzione della temperatura esterna e in funzione alle condizioni del terreno. Si ricorda che le modulazioni sono state eseguite in caso di terreno saturo e non saturo. Per dare una maggiore completezza è stato simulato anche il caso in cui sia presente un flusso di falda. A partire dei tre casi appena elencati (saturo, non saturo e presenza di flusso di falda) sono state combinate le temperature esterne con $\pm 2°C$ rispetto a 14°C e successivamente è stata modulata la conducibilità solida del terreno con valori di 0,9W/mK, 2,26W/mK e 3,9 W/mK, ottenendo cosi per il caso estivo 54 simulazioni effettuate. A queste 54 simulazioni del modello benchmark leggibili in Figura 84 vanno sommate 4 relative al caso di studio reale. Si osserva in Figura 83 e Figura 84 che i valori del caso di studio rientrano nei valori attesi ricavati con le simulazioni del modello del benchmark.

Discorso analogo è stato fatto per il caso invernale dove anche qui sono state effettuate 54 simulazioni per il modello del benchmark a cui vanno sommate quelle 4 del caso reale di studio come ben visibile in Figura 85 e Figura 86.

La potenza estratta nel caso estivo è di circa 25 W/m^2 mentre nel caso invernale si aggira intorno ai 17 W/m^2.

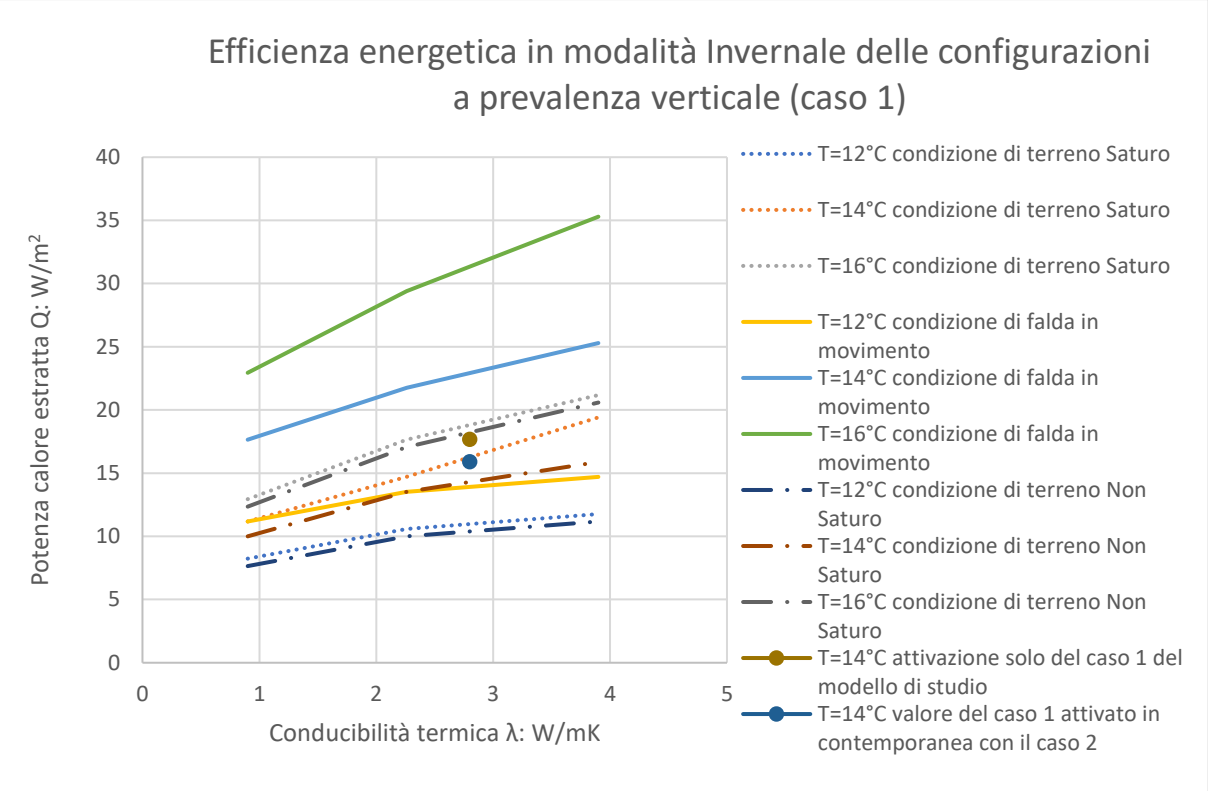


FIGURA 85 EFFICIENZA ENERGETICA IN MODALITÀ INVERNALE DELLE CONFIGURAZIONI A PREVALENZA VERTICALE

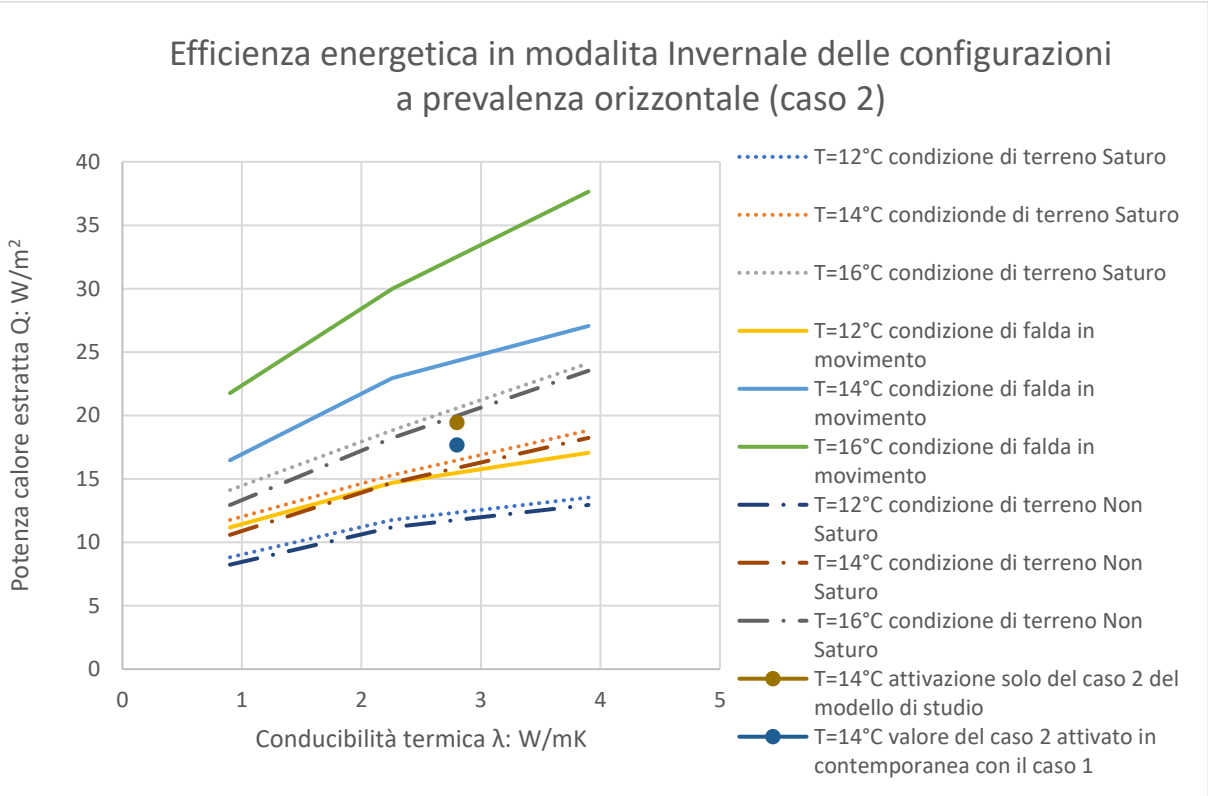


FIGURA 86 EFFICIENZA ENERGETICA IN MODALITÀ INVERNALE DELLE CONFIGURAZIONI A PREVALENZA ORIZZONTALE

Riferimenti bibliografici

Barla, M.; Barla, G.: "Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling", *Geomechanik und Tunnelbau 3* (Vol. 5), pp. 214-231, 2012.

Barla, M., & Di Donna, A. (2015). *Gallerie energetiche in ambiente urbato.* Cagliari.

Barla, M., & Di Donna, A. (2015). *The role of ground conditions on energy tunnels' heat exchange.* ICE publishing.

Barla, M., & Di Donna, A. (2016). *Conci energetici per il rivestimento delle gallerie.*

Barla, M., Di Donna, A., & Baralis, M. (2018). *City-scale analysis of subsoil thermal conditions due to geothermal exploitation.* ICE publishing.

Barla, M., Di Donna, A., & Perino, A. (2016). Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics, 61*, 104-113.

Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 81-122.

Cui, W., Gawecka, K., Potts, D., Zdravković, L., & Taborda, D. (2016). Numerical analysis of coupled thermo-hydraulic problems in geotechnical engineering. *Geomechanics for Energy and the Environment, 6*, 22-34.

C. Brambilla, G. Cusmano. Progettare e realizzare i parcheggi pubblici e privati. Maggioli Editore. Marzo 2005.

Delmastro R., Noce G, "Manuale di geotermia a sonde verticali" , 5ª edizione, Milano, Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2011, p 516, 2015

Di Donna A. (2016), "Energy walls for an underground car park", in the 25th European Young Geotechnical Engineers Conference, Sibiu, Romania.

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.

Gong J., Liu T., Wen B. (2015), "Analysis on Energy Geotechnical Engineering Technology in Diaphragm Wall", Atlantis Press, the Netherlands.

Lancellotta, R.; Criteri di dimensionamento e verifica dei diaframmi, in *Geotecnica*, 3ª edizione, Bologna, Zanichelli, p. 375, luglio 2004

Mauri L., "Analisi termo-meccaniche di diaframmi energeticamente attivi", *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica*, 2015.

Rui Y. (2014), "Finite Element Modelling of Thermal Piles and Walls", PhD thesis, University of Cambridge, UK.

Sterpi D., Angelotti A., Corti D., Ramus M. (2014), "Numerical analysis of heat transfer in thermo-active diaphragm walls" in "Numerical Methods in Geotechnical Engineering" (Hicks MA, Brinkgreve RBJ and Rohe A (eds)), CRC Press, USA.

Suckling T. P., Smith P. E. H. (2002), "Environmentally friendly geothermal piles at Keble College, Oxford, UK".

Zacco F. (2017), "Sfruttamento geotermico della galleria della Linea 2 della metropolitana di Torino", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Italy (in Italian).

Allegati

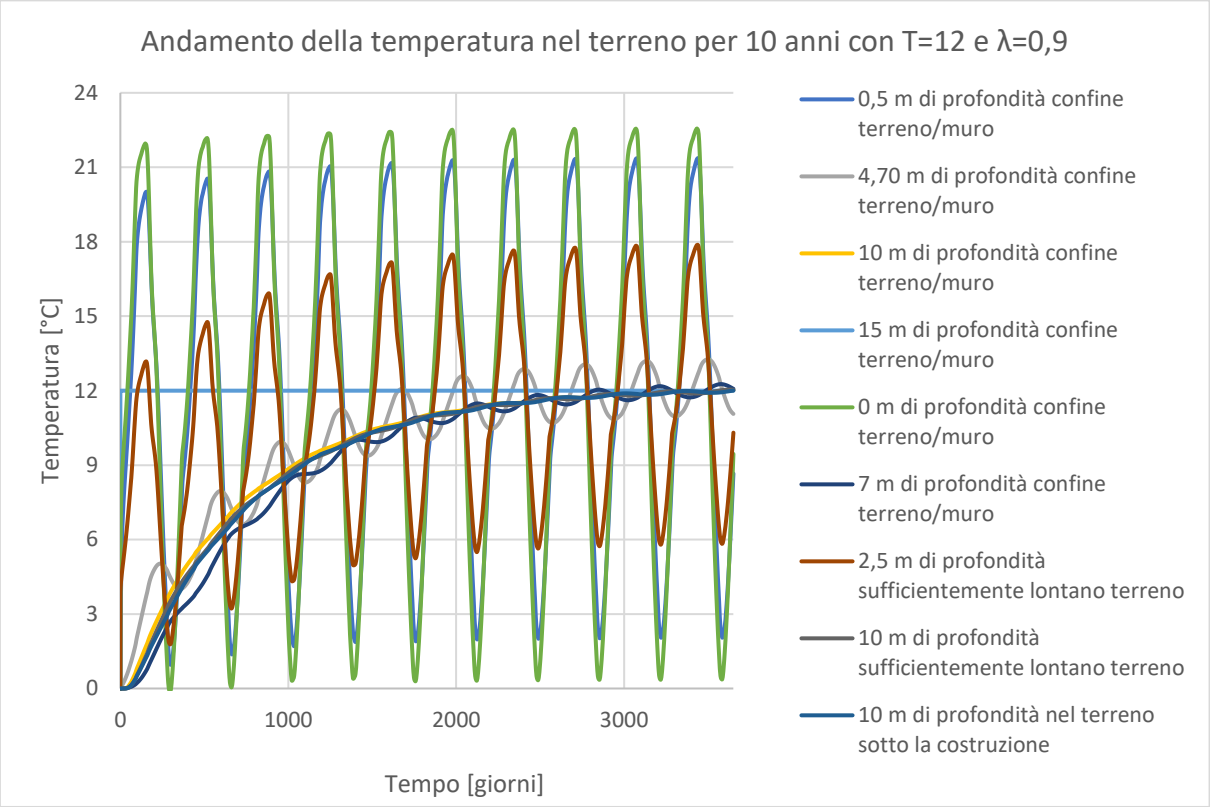


FIGURA X. 1 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=12°C E Λ=0,9

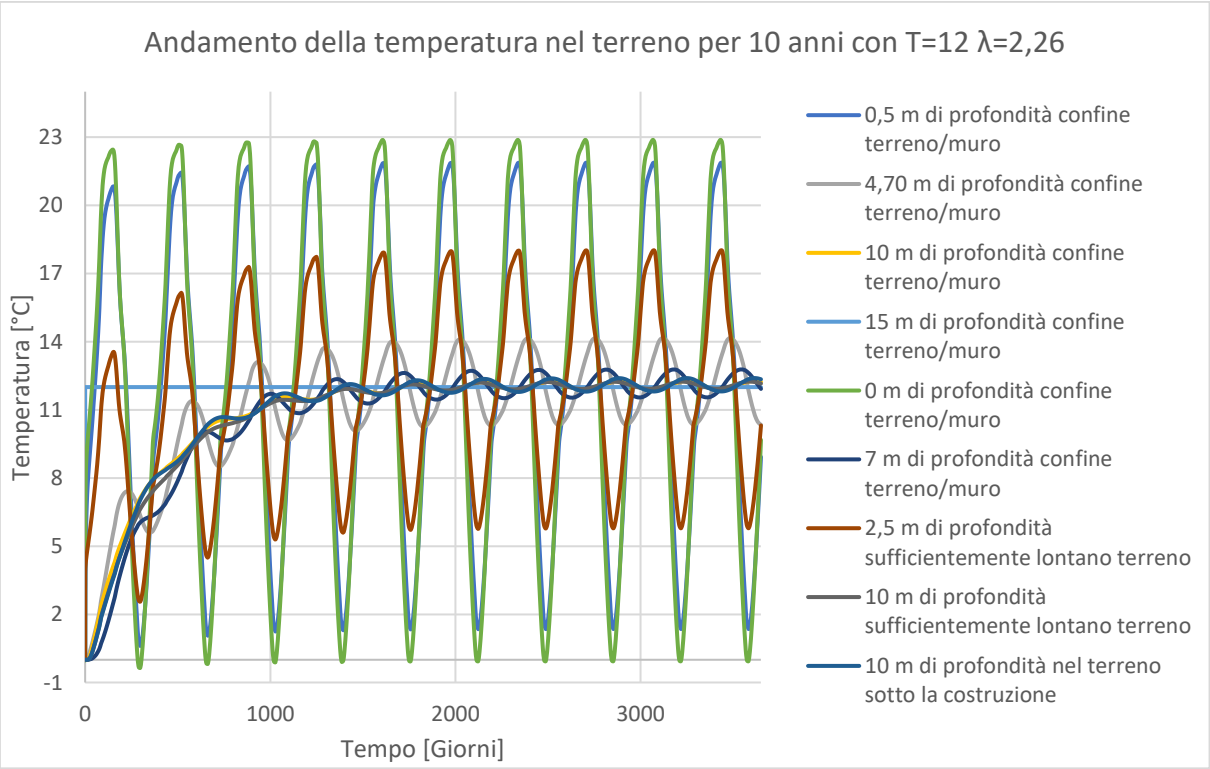


FIGURA X. 2 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=12°C E Λ=2,26

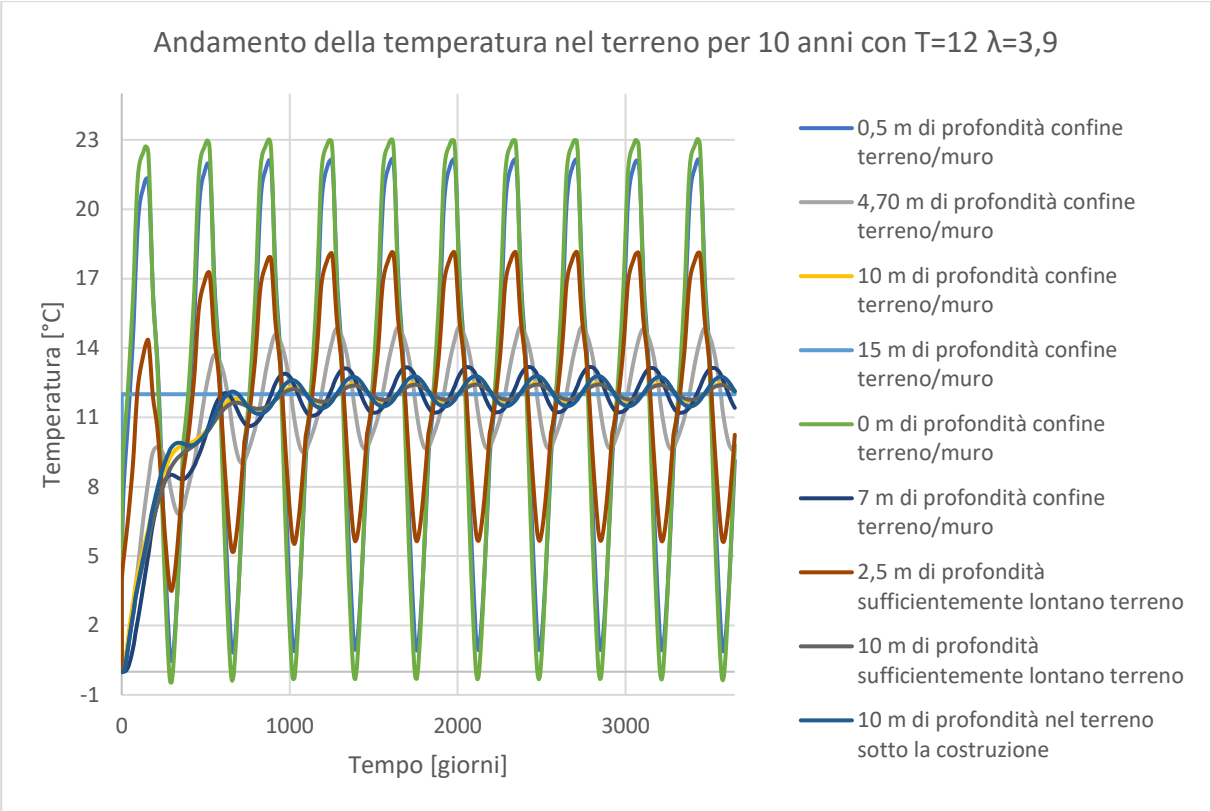


FIGURA X. 3 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=12°C E Λ=3,9

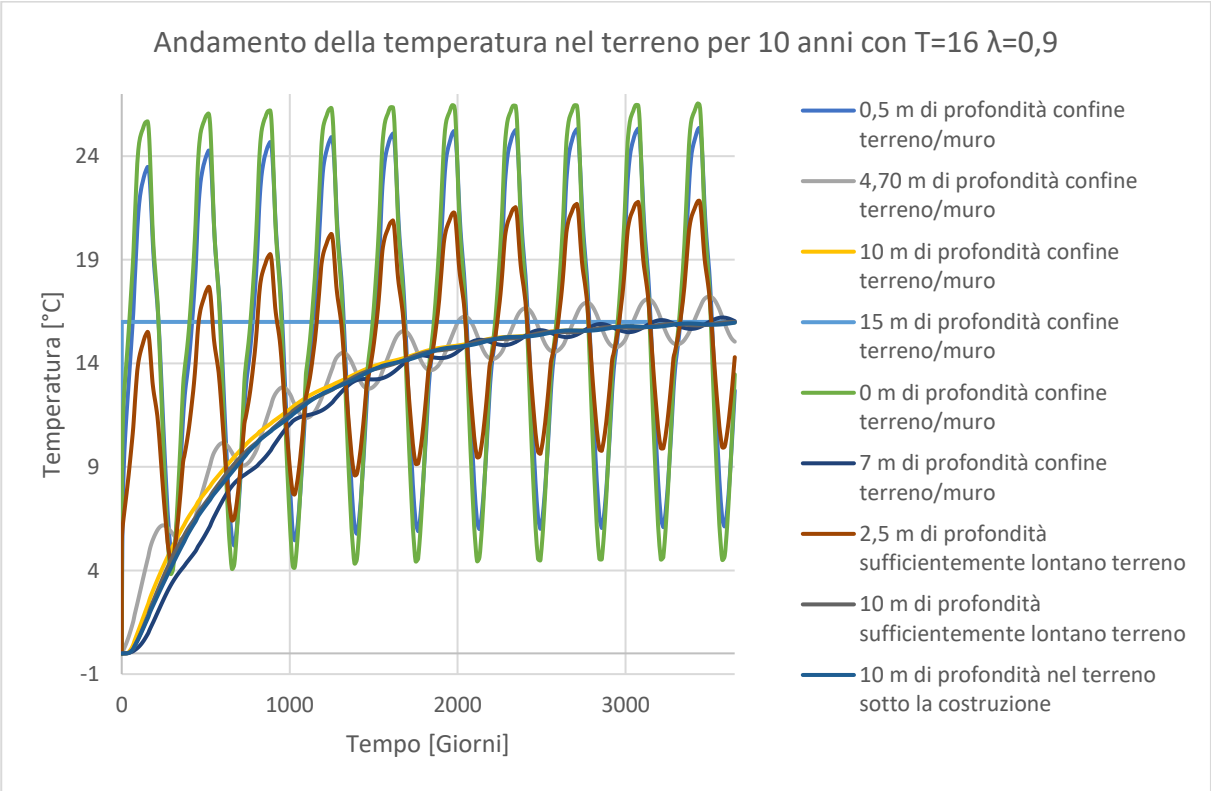


FIGURA X. 4 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=16°C E Λ=0,9

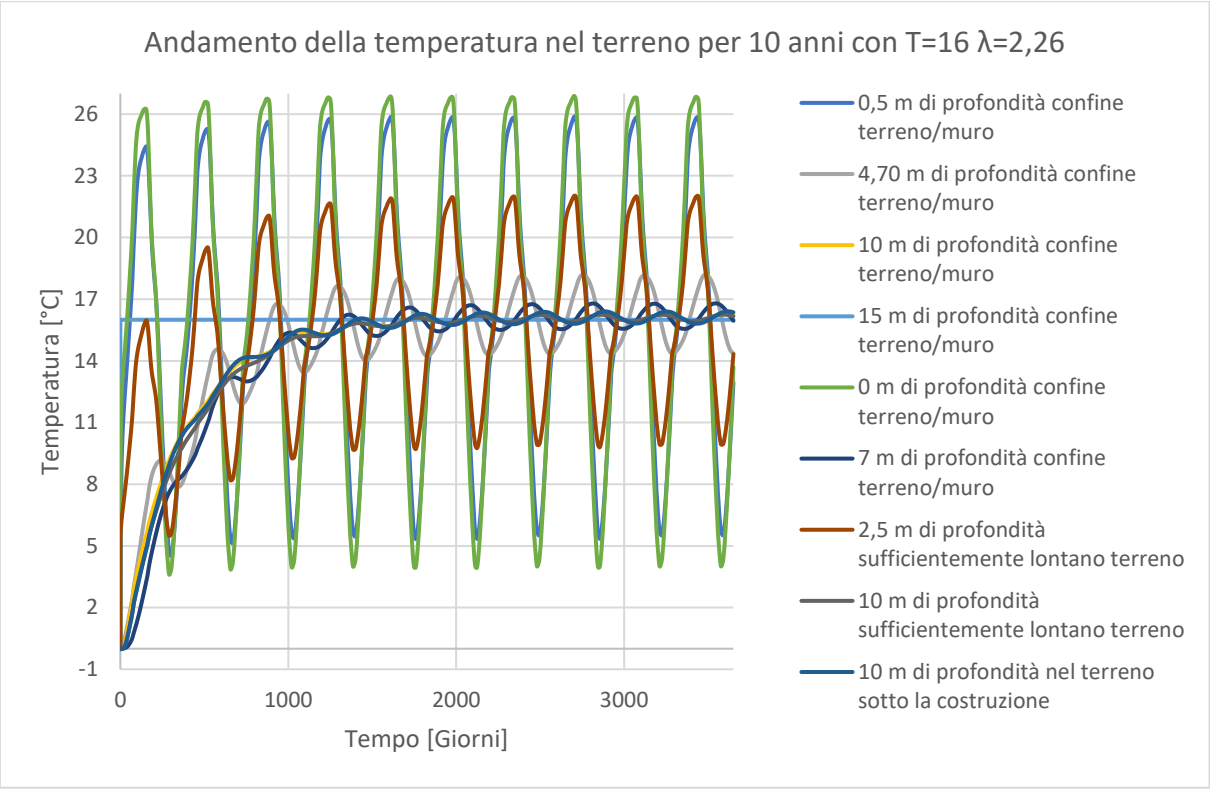


FIGURA X. 5 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=16°C E Λ=2,26

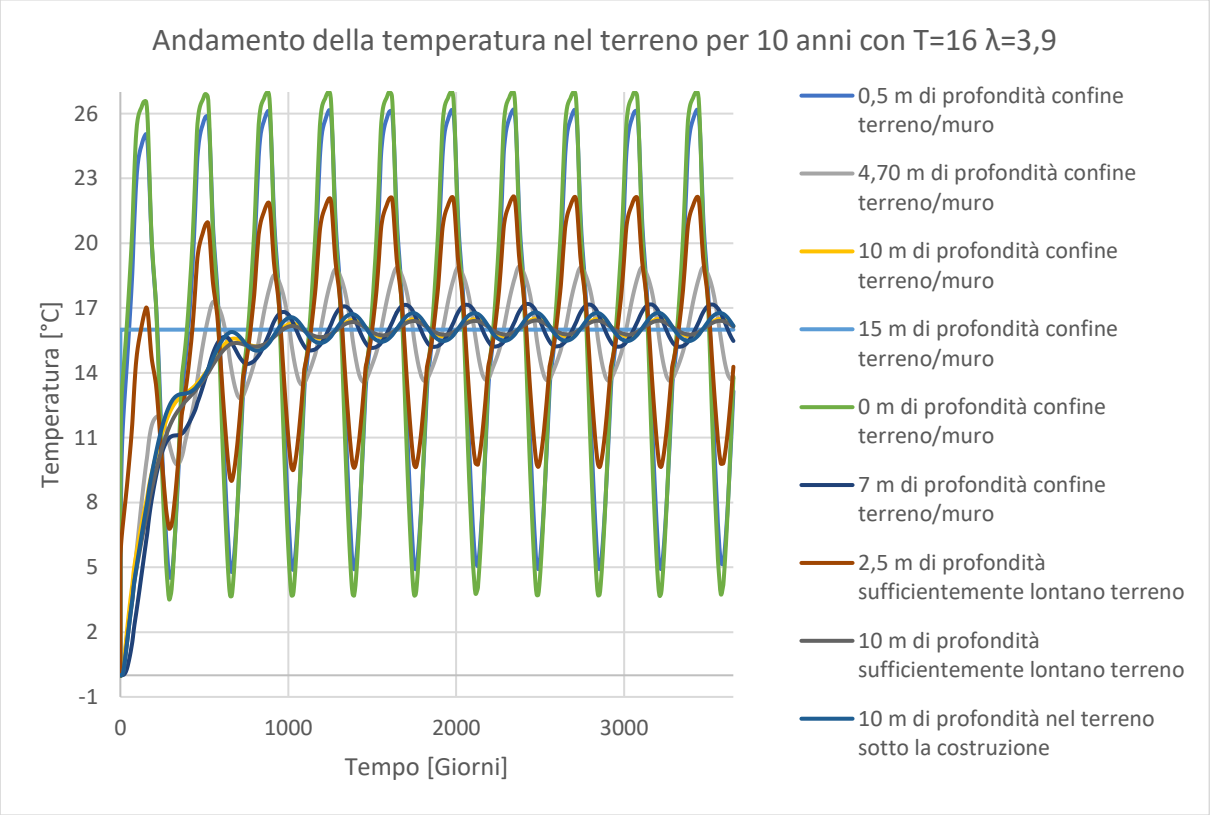


FIGURA X. 6 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TERRENO PER 10 ANNI CON T=16°C E Λ=3,9